



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación del comportamiento hidráulico del desarenador  
de Majes, utilizando el modelo físico construido a escala y  
el modelo numérico ANSYS CFX**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Civil

**Fiorelly Alvarez Guzman**

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

Piura, marzo de 2024



### Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final


Yo, Fiorelly Alvarez Guzman, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 75913238.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:  
"Evaluación del comportamiento hidráulico del desarenador de Majes, utilizando el modelo físico construido a escala y el modelo numérico ANSYS CFX"  
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis<sup>1</sup> para optar el Título profesional<sup>2</sup> de Ingeniero Civil.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escriba número
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escriba número
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escriba número
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escriba número
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
  - Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar, identificado con DNI N° 16477301
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escriba número
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escriba número
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 22/01/2024.

  
Firma del autor optante<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

<sup>2</sup> Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

<sup>3</sup> Idéntica al DNI; no se admite digital, salvo certificado.

### ***Agradecimientos***

*A Dios por ser mi guía y por todas las bendiciones que me ha dado.*

*A mi amado padre que desde el cielo me bendice en cada paso que doy.*

*A mi amada madre por su amor, apoyo incondicional, fortaleza y por siempre impulsarme a alcanzar mis metas.*

*A mis amados hermanos por ser mi motivación en cada logro de mi vida.*

*A toda mi querida familia que siempre me aconsejó y orientó a seguir el camino del conocimiento y la educación.*

*A mis queridos amigos por su apoyo y consejos.*

*A mi asesor Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar por sus enseñanzas, apoyo y orientación durante el proceso del desarrollo de la presente tesis.*

## Resumen

La modelación numérica es una herramienta que nos permite obtener resultados de la simulación del flujo en las estructuras hidráulicas para que mediante su análisis se realice un correcto diseño a escala real en un entorno real, ya que permite ingresar datos y características que simulan las condiciones reales.

El diseño de las estructuras hidráulicas anteriormente se hacía usando la modelación física a escala reducida, sin embargo, este método demanda mucho tiempo y dinero en la etapa de un proyecto, por eso, con el avance en la tecnología de los ordenadores se ha ido implementando el uso de modelos numéricos, que permiten realizar el estudio de estas estructuras en menos tiempo. Tanto la modelación física como numérica se complementan y son importantes durante el diseño de las estructuras hidráulicas.

El análisis de estructuras hidráulicas y el comportamiento del flujo del fluido dentro de estas mediante modelación numérica ha sido tema de investigación durante estos últimos años, y gracias al avance tecnológico se ha podido realizar un estudio más profundo. Se ha podido modelar numéricamente y realizar el análisis de los resultados obtenidos, que han permitido determinar el comportamiento del flujo del fluido y compararlo con la realidad, permitiendo incluso plantear soluciones más efectivas y rápidas. Para la modelación numérica de ambos diseños, original y final, se usó una velocidad de ingreso de 2.67 m/s y un tirante de 2.5 m.

La modelación numérica del desarenador de Majes se realizó mediante el programa ANSYS CFX, que utiliza el método de volúmenes finitos como método numérico de análisis, para modelar el comportamiento del flujo en las estructuras de análisis, en este caso el diseño original y final del desarenador de Majes.

Se evaluó el comportamiento hidráulico de los modelos físicos a escala original y final del desarenador de Majes mediante la modelación numérica en ANSYS CFX. Se analizó los resultados de líneas de corriente y velocidades del modelo físico original para identificar los problemas observados durante la modelación física, además se analizó los resultados de la modelación física final para identificar la solución de esos problemas.

Mediante esta investigación se comprobó que la modelación numérica permite obtener resultados similares a la modelación física, por lo que el estudio de estructuras hidráulicas utilizando ambos modelos reduciría el tiempo de investigación y diseño de las mismas, además de los costos que esto implica.



## Tabla de contenido

<b>Introducción.....</b>	<b>22</b>
<b>Capítulo 1 Marco teórico.....</b>	<b>23</b>
1.1 Desarenador .....	23
1.1.1 Definición .....	23
1.1.2 Principales funciones .....	23
1.1.3 Principales usos.....	23
1.1.4 Clasificación .....	24
1.1.5 Tipos .....	26
1.2 Principales partes del desarenador.....	27
1.2.1 Transición de entrada.....	27
1.2.2 Cámara de sedimentación .....	28
1.2.3 Vertedero.....	28
1.2.4 Compuerta de lavado .....	28
1.2.5 By-pass.....	28
1.3 Criterios de diseño.....	29
1.3.1 Recomendaciones .....	29
1.3.2 Problemas sedimentológicos.....	30
<b>Capítulo 2 Modelo hidráulico del desarenador terminal de Majes .....</b>	<b>31</b>
2.1 Generalidades del proyecto .....	31
2.2 Antecedentes.....	31
2.3 Objetivos de la investigación.....	31
2.4 Alternativas de solución propuestas .....	31
2.5 Conclusiones de la investigación.....	32
2.5.1 Modificaciones de la transición de entrada:.....	32
2.5.2 Modificaciones de la transición de salida: .....	33
2.5.3 Reglas de operación: .....	33
2.6 Modelo físico original a escala del desarenador de Majes .....	34
2.7 Modelo físico final a escala del Desarenador de Majes .....	37
2.8 Condiciones para la simulación numérica .....	41
2.9 Cálculo de la velocidad de ingreso en el canal aguas arriba del desarenador .....	42

2.10 Planos.....	43
<b>Capítulo 3 Modelación numérica.....</b>	<b>47</b>
3.1 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) .....	47
3.1.1 Definición .....	47
3.1.2 Métodos de discretización.....	47
3.1.3 Ecuaciones de Navier Stokes .....	50
3.1.4 Elementos.....	52
3.1.5 Ventajas.....	53
3.1.6 Desventajas .....	53
3.1.7 Aplicaciones en la ingeniería .....	53
3.2 Modelos de turbulencia .....	54
3.2.1 Modelos de turbulencia para Navier Stokes promediados por Reynolds (RANS)..	55
3.2.2 Simulación de remolinos grandes (LES) .....	55
3.2.3 Direct Numerical Simulation (DNS) .....	56
3.2.4 Ecuaciones de Navier Stokes promediados por Reynolds para flujos compresibles	56
3.2.5 Ecuaciones de Navier Stokes promediados por Reynolds para flujos incompresibles (RANS) .....	57
3.2.6 Modelo de turbulencia RANS.....	58
3.2.7 Modelo de turbulencia k- $\epsilon$ .....	59
3.3 Modelo numérico computacional ANSYS CFX .....	60
3.3.1 ANSYS CFX.....	60
3.3.2 Aplicaciones.....	61
3.3.3 Proceso de modelamiento en ANSYS CFX.....	64
<b>Capítulo 4 Simulación numérica del modelo físico original a escala del desarenador de Majes .....</b>	<b>71</b>
4.1 Etapa 1: Pre-procesamiento .....	71
4.1.1 Geometría.....	71
4.1.2 Mallado .....	72
4.1.3 Configuración de la modelación .....	81
4.1.4 Propiedades del fluido.....	85
4.1.5 Condiciones de borde.....	90

4.1.6 Configuración del tipo de análisis.....	100
4.1.7 Control del solucionador.....	101
4.2 Etapa 2: Procesamiento .....	104
4.3 Etapa 3: Post-Procesamiento .....	119
4.3.1 Vectores de velocidad .....	120
4.3.2 Perfiles de velocidad .....	124
4.3.3 Fracción de volumen en un plano longitudinal.....	130
4.3.4 Presiones .....	131
4.3.5 Líneas de corriente.....	132
4.3.6 Volumen de velocidad .....	137
4.3.7 Volumen de velocidad: fracción de volumen .....	140
4.3.8 Región sólida: velocidad.....	141
4.3.9 Cálculo de velocidad promedio en la salida del desarenador .....	146
4.3.10 Cálculo de velocidad en las naves del desarenador .....	148
4.4 Análisis de resultados.....	152
4.5 Comparación de resultados con el modelo físico original.....	153
<b>Capítulo 5 Simulación numérica del modelo físico final a escala del Desarenador de Majes</b> .....	<b>162</b>
5.1 Etapa 1: Pre-Procesamiento.....	162
5.1.1 Geometría.....	162
5.1.2 Mallado .....	164
5.1.3 Configuración de la modelación.....	172
5.1.4 Propiedades del fluido.....	174
5.1.5 Condiciones de borde.....	174
5.1.6 Configuración del tipo de análisis.....	176
5.1.7 Control del solucionador.....	176
5.2 Etapa 2: Procesamiento .....	177
5.3 Etapa 3: Post-procesamiento .....	187
5.3.1 Vectores de velocidad .....	187
5.3.2 Perfiles de velocidad .....	189
5.3.3 Fracción de volumen: plano longitudinal .....	192

5.3.4 Presiones .....	192
5.3.5 Líneas de corriente .....	193
5.3.6 Volumen de velocidad .....	195
5.3.7 Volumen de velocidad: fracción de volumen .....	197
5.3.8 Región sólida: velocidad.....	197
5.3.9 Cálculo de velocidad promedio en la salida del desarenador .....	199
5.3.10 Cálculo de velocidad en las naves del desarenador .....	200
5.4 Análisis de resultados .....	202
5.5 Comparación de resultados con el modelo físico final.....	202
<b>Conclusiones .....</b>	<b>209</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>211</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>212</b>



## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b>	Tipos de desarenadores en función de su operación de limpieza.....	24
<b>Tabla 2</b>	Tipos de desarenadores en función de la velocidad de escurrimiento. ....	25
<b>Tabla 3</b>	Tipos de desarenadores por la disposición de la velocidad de escurrimiento. ....	25
<b>Tabla 4</b>	Desarenadores tipo Detritus. ....	26
<b>Tabla 5</b>	Criterios para una sedimentación más eficiente. ....	30
<b>Tabla 6</b>	Rangos de oblicuidad (Skewness). ....	69
<b>Tabla 7</b>	Número de nodos y elementos para los dos tipos de mallado. ....	80
<b>Tabla 8</b>	Valores de los parámetros de calidad para los diferentes tipos de mallado. ....	80
<b>Tabla 9</b>	Basic Settings de las propiedades del fluido. ....	86
<b>Tabla 10</b>	Configuración de Fluid Models. ....	88
<b>Tabla 11</b>	Configuración de Fluid Pair Models. ....	89
<b>Tabla 12</b>	Configuración de Basic Settings del Solver Control. ....	102
<b>Tabla 13</b>	Comparación 1: Modelo físico original y simulación numérica. ....	153
<b>Tabla 14</b>	Comparación 2: modelo físico original. ....	154
<b>Tabla 15</b>	Comparación 3: modelo físico original. ....	156
<b>Tabla 16</b>	Velocidades promedio en las naves del desarenador del modelo físico original. ..	158
<b>Tabla 17</b>	Comparación 4: modelo físico original. ....	159
<b>Tabla 18</b>	Número de nodos y elementos para los dos tipos de mallado. ....	171
<b>Tabla 19</b>	Valores de los parámetros de calidad para los diferentes tipos de mallado. ....	171
<b>Tabla 20</b>	Comparación 1: modelo físico final. ....	202
<b>Tabla 21</b>	Comparación 2: modelo físico final. ....	204
<b>Tabla 22</b>	Velocidad promedio en las naves del desarenador del modelo físico final. ....	206
<b>Tabla 23</b>	Comparación 3: modelo físico final. ....	207

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Esquema de un desarenador de lavado intermitente.....	24
<b>Figura 2</b> Desarenador con cámaras distribuidas en paralelo.....	25
<b>Figura 3</b> Desarenador tipo vórtice.....	27
<b>Figura 4</b> Variante A-1 y A-2.....	32
<b>Figura 5</b> Variante C-2.....	33
<b>Figura 6</b> Canal aguas arriba y transición de entrada del modelo físico original del Desarenador de Majes.....	34
<b>Figura 7</b> Entrada de las naves del modelo físico original del desarenador de Majes.....	34
<b>Figura 8</b> Naves del modelo físico original del desarenador de Majes.....	35
<b>Figura 9</b> Salida del modelo físico original del desarenador de Majes.....	35
<b>Figura 10</b> Sedimentos en la salida del modelo físico original del desarenador de Majes.....	36
<b>Figura 11</b> Canal aguas arriba y transición de entrada del modelo físico final del desarenador de Majes.....	37
<b>Figura 12</b> Transición de entrada del modelo físico final del desarenador de Majes.....	38
<b>Figura 13</b> Naves del modelo físico final del desarenador de Majes.....	39
<b>Figura 14</b> Salida del modelo físico final del desarenador de Majes.....	40
<b>Figura 15</b> Sistema de purga del modelo físico final del desarenador de Majes.....	41
<b>Figura 16</b> Variante A-2.....	42
<b>Figura 17</b> Vista en planta de la transición de entrada y de las cámaras de sedimentación del desarenador de Majes.....	43
<b>Figura 18</b> Vista en planta del vertedero y transición de salida del desarenador de Majes.....	44
<b>Figura 19</b> Vista longitudinal de la transición de entrada y de las cámaras de sedimentación del desarenador de Majes.....	45
<b>Figura 20</b> Vista longitudinal del vertedero y transición de salida del desarenador de Majes.....	45
<b>Figura 21</b> Corte transversal, sección E-E, del desarenador de Majes.....	46
<b>Figura 22</b> Detalle de la sección transversal de las naves del desarenador de Majes.....	46
<b>Figura 23</b> Volumen de control.....	47
<b>Figura 24</b> Nodos y elementos de una malla.....	48
<b>Figura 25</b> Nodos en los vértices y centro de los volúmenes de control para una grilla cuadrilátera.....	49
<b>Figura 26</b> Mallado de la bifurcación del tramo B del Río Piura.....	61



<b>Figura 27</b> Malla estructurada del desarenador Quiroz. ....	62
<b>Figura 28</b> Mallado del sifón Piura. ....	62
<b>Figura 29</b> Líneas de corriente de velocidad en la poza de disipación. ....	63
<b>Figura 30</b> Vectores de velocidad en la poza de disipación. ....	63
<b>Figura 31</b> Etapas de procesamiento en ANSYS CFX. ....	64
<b>Figura 32</b> Interfaz Workbench. ....	65
<b>Figura 33</b> Herramientas Geometry y Fluid Flow (CFX). ....	65
<b>Figura 34</b> Interfaz Space Claim. ....	66
<b>Figura 35</b> Interfaz Desing Modeler. ....	66
<b>Figura 36</b> Opciones de la herramienta Mesh. ....	67
<b>Figura 37</b> Interfaz Meshing. ....	67
<b>Figura 38</b> Interfaz Desing Modeler. Geometría del modelo físico original a escala del desarenador de Majes. ....	71
<b>Figura 39</b> Interfaz Desing Modeler. Detalle del diseño de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. ....	72
<b>Figura 40</b> Interfaz Mesh. Aplicación de Sweep Method en la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. ....	72
<b>Figura 41</b> Interfaz Mesh. Sweep Method de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. ....	73
<b>Figura 42</b> Malla MultiZone de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. ....	73
<b>Figura 43</b> Malla MultiZone de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. Detalle del mallado en las naves del desarenador. ....	74
<b>Figura 44</b> Número de nodos y elementos de la malla MultiZone. ....	74
<b>Figura 45</b> Parámetro de calidad Element Quality de la malla MultiZone. ....	75
<b>Figura 46</b> Parámetro de calidad Aspect Ratio de la malla MultiZone. ....	75
<b>Figura 47</b> Parámetro de calidad Orthogonal Quality de la malla MultiZone. ....	76
<b>Figura 48</b> Parámetro de calidad Skewness de la malla MultiZone. ....	76
<b>Figura 49</b> Malla Hex Dominant de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. Detalle del mallado en las naves del desarenador. ....	77
<b>Figura 50</b> Número de nodos y elementos de la malla Hex Dominant. ....	77
<b>Figura 51</b> Parámetro de calidad Element Quality de la malla Hex Dominant. ....	78
<b>Figura 52</b> Parámetro de calidad Aspect Ratio de la malla Hex Dominant. ....	78

<b>Figura 53</b> Parámetro de calidad Orthogonal Quality de la malla Hex Dominant. ....	79
<b>Figura 54</b> Parámetro de calidad Skewness de la malla Hex Dominant.....	79
<b>Figura 55</b> Interfaz Mesh. Body Sizing del mallado de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. ....	81
<b>Figura 56</b> Interfaz Mesh. Sizing del mallado de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. ....	81
<b>Figura 57</b> Interfaz Mesh. Pasos para nombrar las partes del desarenador. ....	82
<b>Figura 58</b> Interfaz Mesh. Pasos para nombrar las partes del desarenador. ....	82
<b>Figura 59</b> Interfaz Mesh. Detalle de los nombres de las partes del desarenador. ....	83
<b>Figura 60</b> Interfaz Mesh. Entrada del canal aguas arriba del desarenador.....	83
<b>Figura 61</b> Interfaz Mesh. Salida del desarenador.....	84
<b>Figura 62</b> Interfaz Mesh. Superficie libre del desarenador. ....	84
<b>Figura 63</b> Interfaz Workbench. Pasos para abrir la configuración del Stup. ....	85
<b>Figura 64</b> Interfaz Fluid Flow (CFX).....	85
<b>Figura 65</b> Interfaz Fluid Flow (CFX). Pasos para abrir la configuración del Default Domain. ....	86
<b>Figura 66</b> Configuración de las propiedades del fluido. ....	87
<b>Figura 67</b> Propiedades del agua. ....	87
<b>Figura 68</b> Propiedades del aire. ....	88
<b>Figura 69</b> Configuración de Fluid Models. ....	89
<b>Figura 70</b> Selección del modelo de turbulencia. ....	89
<b>Figura 71</b> Configuración de Fluid Pair Models.....	90
<b>Figura 72</b> Pasos para insertar las fronteras de la geometría. ....	91
<b>Figura 73</b> Creación de los nombres de las fronteras. ....	91
<b>Figura 74</b> Configuración de la frontera Entrada. ....	92
<b>Figura 75</b> Configuración de Basic Settings.....	92
<b>Figura 76</b> Configuración de Boundary Details. ....	93
<b>Figura 77</b> Configuración de Fluid Values – AGUA. ....	93
<b>Figura 78</b> Configuración de Fluid Values – AIRE.....	93
<b>Figura 79</b> Configuración de la frontera Paredes. ....	94
<b>Figura 80</b> Configuración de Basic Settings.....	94
<b>Figura 81</b> Configuración de Boundary Details. ....	95

<b>Figura 82</b> Configuración de la frontera Salida.....	95
<b>Figura 83</b> Configuración de la frontera Salida.....	96
<b>Figura 84</b> Configuración de Flow Direction.....	96
<b>Figura 85</b> Configuración de Boundary Details.....	96
<b>Figura 86</b> Configuración de Fluid Values – AGUA.....	97
<b>Figura 87</b> Configuración de Fluid Values – AIRE.....	97
<b>Figura 88</b> Configuración de la frontera Superficie libre.....	98
<b>Figura 89</b> Configuración de Basic Settings.....	98
<b>Figura 90</b> Configuración de Boundary Details.....	99
<b>Figura 91</b> Configuración de Fluid Values – AGUA.....	99
<b>Figura 92</b> Configuración de Fluid Values – AIRE.....	100
<b>Figura 93</b> Pasos para la configuración del tipo de análisis.....	100
<b>Figura 94</b> Selección del tipo de análisis.....	101
<b>Figura 95</b> Pasos para la configuración de las unidades.....	101
<b>Figura 96</b> Configuración y selección de las unidades.....	101
<b>Figura 97</b> Pasos para configurar Solver Control.....	102
<b>Figura 98</b> Configuración de Basic Settings del Solver Control.....	103
<b>Figura 99</b> Comprobación del proceso realizado en Setup.....	103
<b>Figura 100</b> Pasos para abrir el Solucionador.....	104
<b>Figura 101</b> Vista preliminar del Solver Manager – Configuración de Define Run.....	105
<b>Figura 102</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Momentum and Mass.....	106
<b>Figura 103</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Turbulence (KE).....	107
<b>Figura 104</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Volumen Fractions.....	108
<b>Figura 105</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Momentum and Mass.....	109
<b>Figura 106</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Turbulence (KE).....	110
<b>Figura 107</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Volumen Fractions.....	111

<b>Figura 108</b> Barra de herramientas de la ventana Solution Manger. Creación de un nuevo monitor. ....	111
<b>Figura 109</b> Nombre del nuevo monitor: IMBALANCES.....	112
<b>Figura 110</b> Configuración del nuevo monitor: IMBALANCES.....	112
<b>Figura 111</b> Gráfica de Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido del mallado MultiZone. ....	113
<b>Figura 112</b> Cuadro de Imbalances del mallado MultiZone.....	113
<b>Figura 113</b> Gráfica de Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido del mallado Hex Dominat.....	114
<b>Figura 114</b> Cuadro de Imbalances del mallado Hex Dominat. ....	114
<b>Figura 115</b> Configuración del monitor de IMBALANCES.....	115
<b>Figura 116</b> Configuración del monitor de IMBALANCES para reducir el rango de visualización.....	115
<b>Figura 117</b> Gráfica de Imbalances del mallado MultiZone en un rango de estudio más reciente. ....	116
<b>Figura 118</b> Gráfica de Imbalances del mallado Hex Dominant en un rango de estudio más reciente. ....	117
<b>Figura 119</b> Propiedades y características del fluido al final de la convergencia. ....	118
<b>Figura 120</b> Comprobación del proceso en Solution.....	119
<b>Figura 121</b> Pasos para abrir la ventana de Result. ....	119
<b>Figura 122</b> Vista preliminar del modelo físico original a escala en la ventana Results – CFD-Post.....	120
<b>Figura 123</b> Barra de Herramientas de la interfaz CFD-Post. ....	120
<b>Figura 124</b> Creación del gráfico de vectores de velocidad en la interfaz CFD-Post. ....	120
<b>Figura 125</b> Configuración de geometry para los gráficos de vectores de velocidad. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).....	121
<b>Figura 126</b> Configuración de Symbol para los gráficos de vectores de velocidad. ....	121
<b>Figura 127</b> Vectores de velocidad en el modelo físico original a escala del desarenador de Majes. ....	122
<b>Figura 128</b> Vectores de velocidad en un perfil longitudinal en el modelo físico original a escala del desarenador de Majes. ....	122
<b>Figura 129</b> Configuración de geometry para los gráficos de vectores de velocidad. (Variable: AGUA.Velocity). ....	123

<b>Figura 130</b> Vectores de velocidad en el modelo físico original a escala del desarenador de Majes. ....	123
<b>Figura 131</b> Barra de Herramientas de la interfaz CFD-Post. ....	124
<b>Figura 132</b> Creación del gráfico de perfiles de velocidad en la interfaz CFD-Post.....	124
<b>Figura 133</b> Configuración de Geometry para los gráficos de perfiles de velocidad en la entrada del canal aguas arriba del desarenador. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).....	124
<b>Figura 134</b> Perfil de velocidad en la entrada del canal aguas arriba del desarenador.....	125
<b>Figura 135</b> Configuración de Geometry para los gráficos de perfiles de velocidad en la salida del desarenador. (Variable: AGUA.Superficial Velocity). ....	125
<b>Figura 136</b> Perfil de velocidad en la salida del desarenador. ....	126
<b>Figura 137</b> Perfil de velocidad en la salida del desarenador. ....	126
<b>Figura 138</b> Barra de herramientas de la interfaz CFD-Post. Creación de un plano. ....	127
<b>Figura 139</b> Creación de los planos transversal y longitudinal en la interfaz CFD-Post. ....	127
<b>Figura 140</b> Configuración de Geometry para el plano transversal. ....	127
<b>Figura 141</b> Configuración de Geometry del perfil de velocidad en un plano transversal. (Variable: AGUA.Superficial Velocity). ....	128
<b>Figura 142</b> Perfiles de velocidad en un plano transversal.....	128
<b>Figura 143</b> Configuración de Geometry para el plano longitudinal. ....	129
<b>Figura 144</b> Configuración de Geometry del perfil de velocidad en un plano longitudinal. (Variable: AGUA.Superficial Velocity). ....	129
<b>Figura 145</b> Perfiles de velocidad en un plano longitudinal.....	130
<b>Figura 146</b> Configuración de Geometry del perfil de velocidad: Fracción de volumen en un plano longitudinal. (Variable: AGUA.Volumen Fraction). ....	130
<b>Figura 147</b> Perfiles de velocidad: Fracción de volumen en un plano longitudinal, para una velocidad de flujo en la entrada del canal aguas arriba del desarenador de 2.6667 m/s. ....	131
<b>Figura 148</b> Configuración de Geometry del perfil de velocidad de presiones en las paredes del desarenador. (Variable: Pressure). ....	131
<b>Figura 149</b> Perfiles de velocidad de presiones en las paredes del desarenador. ....	132
<b>Figura 150</b> Barra de Herramientas de la interfaz CFD-Post. ....	132
<b>Figura 151</b> Creación del gráfico de líneas de corriente en la interfaz CFD-Post.....	133
<b>Figura 152</b> Configuración de Geometry para los gráficos de líneas de corriente. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).....	133
<b>Figura 153:</b> Configuración de Color para los gráficos de líneas de corriente. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).....	134



<b>Figura 154</b> Líneas de corriente del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	134
<b>Figura 155</b> Líneas de corriente en un perfil longitudinal del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	135
<b>Figura 156</b> Configuración de Geometry para los gráficos de líneas de corriente. (Variable: AGUA. Velocity).	135
<b>Figura 157:</b> Configuración de Color para los gráficos de líneas de corriente. (Variable: AGUA. Velocity).	136
<b>Figura 158</b> Líneas de corriente de los vectores de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	136
<b>Figura 159</b> Barra de Herramientas de la interfaz CFD-Post.	137
<b>Figura 160</b> Creación del gráfico de volumen de velocidad en la interfaz CFD-Post.	137
<b>Figura 161</b> Configuración de Geometry para los gráficos de volumen de velocidad. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).	137
<b>Figura 162</b> Volumen de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	138
<b>Figura 163</b> Volumen de velocidad en un perfil longitudinal del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	138
<b>Figura 164</b> Configuración de Geometry para los gráficos de volumen de velocidad. (Variable: AGUA. Velocity).	139
<b>Figura 165</b> Volumen de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	139
<b>Figura 166</b> Configuración de Geometry para los gráficos de volumen de velocidad: fracción de volumen. (Variable: AGUA. Velocity).	140
<b>Figura 167</b> Volumen de velocidad: fracción de volumen del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	140
<b>Figura 168</b> Barra de herramientas de la interfaz CFD-Post.	141
<b>Figura 169</b> Creación del gráfico de región de velocidad en la interfaz CFD-Post.	141
<b>Figura 170</b> Configuración de Geometry para los gráficos de región de velocidad. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).	142
<b>Figura 171</b> Configuración de Color para los gráficos de región de velocidad. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).	142
<b>Figura 172</b> Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	143



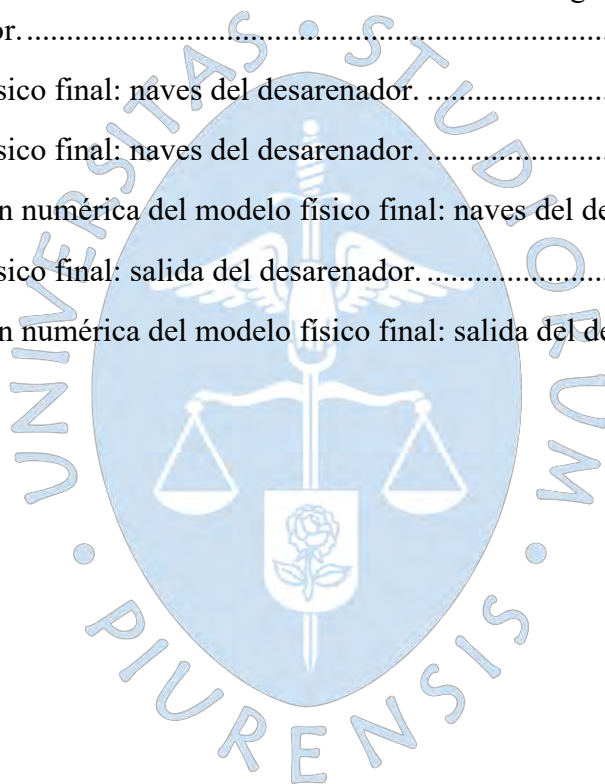
<b>Figura 173</b> Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes para una velocidad de 6 m/s. ....	143
<b>Figura 174</b> Configuración de Geometry para los gráficos de región de velocidad. (Variable: AGUA. Velocity). ....	144
<b>Figura 175</b> Configuración de color para los gráficos de región de velocidad. (Variable: AGUA. Velocity). ....	144
<b>Figura 176</b> Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes. ....	145
<b>Figura 177</b> Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes para una velocidad de 6 m/s. ....	145
<b>Figura 178</b> Barra de herramientas de la interfaz CFD-Post. ....	146
<b>Figura 179</b> Cálculo de la velocidad promedio, nombre de la expresión en la interfaz CFD-Post. ....	146
<b>Figura 180</b> Cálculo de la velocidad promedio, inserción de la expresión en la interfaz CFD-Post. ....	146
<b>Figura 181</b> Cálculo de la velocidad promedio, inserción de la variable AGUA.Surface Velocity. ....	147
<b>Figura 182</b> Cálculo de la velocidad promedio, inserción de la ubicación (Locations): Salida. ....	147
<b>Figura 183</b> Cálculo de la velocidad promedio en la salida del desarenador ....	148
<b>Figura 184</b> Comprobación final del proceso de modelación. ....	148
<b>Figura 185</b> Barra de herramientas de la interfaz CFD-Post. ....	148
<b>Figura 186</b> Distancias en X para cada nave del desarenador. ....	149
<b>Figura 187</b> Cálculo de la velocidad en la nave 1. ....	149
<b>Figura 188</b> Cálculo de la velocidad en la nave 2. ....	150
<b>Figura 189</b> Cálculo de la velocidad en la nave 3. ....	150
<b>Figura 190</b> Cálculo de la velocidad en la nave 4. ....	151
<b>Figura 191</b> Áreas de las naves. ....	151
<b>Figura 192</b> Modelo físico original: canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador. ....	153
<b>Figura 193</b> Simulación numérica del modelo físico original: canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador. ....	154
<b>Figura 194</b> Modelo físico original: entrada de las naves del desarenador. ....	155

<b>Figura 195</b> Simulación numérica del modelo físico original: entrada de las naves del desarenador.....	155
<b>Figura 196</b> Simulación numérica del modelo físico original: entrada de las naves del desarenador.....	156
<b>Figura 197</b> Modelo físico original: naves del desarenador. ....	157
<b>Figura 198</b> Modelo físico original: naves del desarenador. ....	157
<b>Figura 199</b> Simulación numérica del modelo físico original: naves del desarenador.....	158
<b>Figura 200</b> Modelo físico original: salida del desarenador. ....	160
<b>Figura 201</b> Modelo físico original: salida del desarenador. ....	161
<b>Figura 202</b> Simulación numérica del modelo físico original: salida del desarenador. ....	161
<b>Figura 203</b> Interfaz Desing Modeler. Geometría del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.....	162
<b>Figura 204</b> Interfaz Desing Modeler. Detalle del diseño de la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes. ....	163
<b>Figura 205</b> Interfaz Mesh. Aplicación de Sweep Method en la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes. ....	164
<b>Figura 206</b> Interfaz Mesh. Sweep Method de la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes. ....	164
<b>Figura 207</b> Malla MultiZone de la geometría del modelo físico final del desarenador de majes. detalle del mallado en las naves del desarenador. ....	165
<b>Figura 208</b> Número de nodos y elementos de la malla MultiZone. ....	165
<b>Figura 209</b> Parámetro de calidad Element Quality de la malla MultiZone.....	166
<b>Figura 210</b> Parámetro de calidad Aspect Ratio de la malla MultiZone. ....	166
<b>Figura 211</b> Parámetro de calidad Orthogonal Quality de la malla MultiZone.....	167
<b>Figura 212</b> Parámetro de calidad Skewness de la malla MultiZone. ....	167
<b>Figura 213</b> Malla Hex Dominant de la geometría del modelo físico final del desarenador de majes. detalle del mallado en las naves del desarenador.....	168
<b>Figura 214</b> Número de nodos y elementos de la malla Hex Dominant. ....	168
<b>Figura 215</b> Parámetro de calidad Element Quality de la malla Hex Dominant. ....	169
<b>Figura 216</b> Parámetro de calidad Aspect Ratio de la malla Hex Dominant.....	169
<b>Figura 217</b> Parámetro de calidad Orthogonal Quality de la malla Hex Dominant. ....	170
<b>Figura 218</b> Parámetro de calidad Skewness de la malla Hex Dominant.....	170

<b>Figura 219</b> Interfaz Mesh. Body Sizing del mallado de la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes. ....	172
<b>Figura 220</b> Interfaz Mesh. Sizing del mallado de la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes. ....	172
<b>Figura 221</b> Interfaz Mesh. Entrada del canal aguas arriba del desarenador. ....	173
<b>Figura 222</b> Interfaz Mesh. Salida del desarenador. ....	173
<b>Figura 223</b> Interfaz Mesh. Superficie libre del desarenador. ....	174
<b>Figura 224</b> Configuración de la frontera Entrada. ....	174
<b>Figura 225</b> Configuración de la frontera Paredes. ....	175
<b>Figura 226</b> Configuración de la frontera Salida. ....	175
<b>Figura 227</b> Configuración de la frontera Superficie libre. ....	176
<b>Figura 228</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Momentum and Mass. ....	177
<b>Figura 229</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Turbulence (KE). ....	178
<b>Figura 230</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Volumen Fractions. ....	179
<b>Figura 231</b> Gráfica de Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido del mallado MultiZone. ....	180
<b>Figura 232</b> Cuadro de Imbalances del mallado MultiZone. ....	180
<b>Figura 233</b> Gráfica de Imbalances del mallado MultiZone en un rango de estudio más reciente. ....	181
<b>Figura 234</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Momentum and Mass. ....	182
<b>Figura 235</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Turbulence (KE). ....	183
<b>Figura 236</b> Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Volumen Fractions. ....	184
<b>Figura 237</b> Gráfica de Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido del mallado Hex Dominant. ....	185
<b>Figura 238</b> Cuadro de Imbalances del mallado Hex Dominat. ....	185
<b>Figura 239</b> Gráfica de Imbalances del mallado Hex Dominant en un rango de estudio más reciente. ....	186

<b>Figura 240</b> Vista preliminar del modelo físico final a escala en la ventana Results – CFD-Post.	187
<b>Figura 241</b> Vectores de velocidad en el modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	187
<b>Figura 242</b> Vectores de velocidad en un perfil longitudinal en el modelo físico final a escala del Desarenador de Majes.	188
<b>Figura 243</b> Vectores de velocidad en el modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	188
<b>Figura 244</b> Perfil de velocidad en la entrada del canal aguas arriba del desarenador.	189
<b>Figura 245</b> Perfil de velocidad en la salida del desarenador.	189
<b>Figura 246</b> Perfil de velocidad en la salida del desarenador.	190
<b>Figura 247</b> Perfiles de velocidad en un plano transversal.	190
<b>Figura 248</b> Perfiles de velocidad en un plano longitudinal.	191
<b>Figura 249</b> Perfiles de velocidad: fracción de volumen en un plano longitudinal, para una velocidad de flujo en el canal aguas arriba del desarenador de 2.67 m/s.	192
<b>Figura 250</b> Perfiles de velocidad de presiones en las paredes del desarenador.	192
<b>Figura 251</b> Líneas de corriente del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	193
<b>Figura 252</b> Líneas de corriente en un perfil longitudinal del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.	193
<b>Figura 253</b> Líneas de corriente de los vectores de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	194
<b>Figura 254</b> Volumen de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	195
<b>Figura 255</b> Volumen de velocidad en un perfil longitudinal del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	195
<b>Figura 256</b> Volumen de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	196
<b>Figura 257</b> Volumen de velocidad: fracción de volumen del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	197
<b>Figura 258</b> Región de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	197
<b>Figura 259</b> Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes para una velocidad de 6 m/s.	198
<b>Figura 260</b> Región de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.	198

<b>Figura 261</b> Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes para una velocidad de 6 m/s. ....	199
<b>Figura 262</b> Cálculo de la velocidad promedio en la salida del desarenador. ....	199
<b>Figura 263</b> Cálculo de la velocidad en la nave 1. ....	200
<b>Figura 264</b> Cálculo de la velocidad en la nave 2. ....	200
<b>Figura 265</b> Cálculo de la velocidad en la nave 3. ....	201
<b>Figura 266</b> Cálculo de la velocidad en la nave 4. ....	201
<b>Figura 267</b> Modelo físico final: canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador. ....	203
<b>Figura 268</b> Simulación numérica del modelo físico final: canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador. ....	203
<b>Figura 269</b> Modelo físico final: naves del desarenador. ....	205
<b>Figura 270</b> Modelo físico final: naves del desarenador. ....	205
<b>Figura 271</b> Simulación numérica del modelo físico final: naves del desarenador. ....	206
<b>Figura 272</b> Modelo físico final: salida del desarenador. ....	207
<b>Figura 273</b> Simulación numérica del modelo físico final: salida del desarenador. ....	208





## **Introducción**

En esta investigación se verificará y comparará los resultados de la simulación del flujo (velocidades del flujo a la salida y el comportamiento del mismo dentro del desarenador) de los modelos físicos original y final a escala del Desarenador de Majes con la modelación numérica mediante ANSYS CFX.

En el primer capítulo se describe el marco teórico, teniendo como tema principal el desarenador y su funcionamiento, también se menciona sus principales usos, clasificación, elementos y criterios de diseño.

En el segundo capítulo se describe las condiciones iniciales del diseño original y las condiciones finales del diseño final del desarenador de Majes, además se presentan los planos, las condiciones para la simulación y el cálculo de la velocidad al ingreso del del desarenador.

En el tercer capítulo se describe los fundamentos teóricos de la Dinámica de Fluidos Computacional, los modelos de turbulencia, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido, los modelos numéricos más conocidos y también se describe el método de procesamiento del modelo numérico ANSYS CFX.

En el cuarto capítulo se describe el proceso de modelación del modelo físico original a escala del desarenador de Majes, desde su etapa de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento, en este capítulo se explica también el análisis de los resultados obtenidos de la modelación numérica y se compara con los del modelo físico.

En el quinto capítulo se describe el proceso de modelación del modelo físico final a escala del desarenador de Majes, desde su etapa de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento, en este capítulo se explica también el análisis de los resultados obtenidos de la modelación numérica y se compara con los del modelo físico.

Finalmente, se describen las conclusiones del proyecto, así como también se brindan algunas recomendaciones para ampliar el tema de investigación.



## **Capítulo 1**

### **Marco teórico**

#### **1.1 Desarenador**

##### **1.1.1 Definición**

Es una estructura hidráulica que sirve para separar, decantar, remover y evacuar el material sólido que lleva el agua de un canal. Se ubica posterior a una fuente de captación de agua superficial, con la finalidad de remover las partículas de material sólido suspendidas en el agua mediante un proceso de sedimentación, para que después sean devueltas al cauce natural del cual se capta el recurso hídrico (Albuja et al., 2013).

Los desarenadores al realizar dos procesos simultáneamente, decantar y evacuar, permite la evacuación de los sólidos suspendidos en el agua producto de la conducción, sin embargo, su correcta operación y mantenimiento garantiza que estas estructuras hidráulicas trabajen de manera eficiente y efectiva, además la correcta eliminación de los sedimentos acumulados en el fondo de las naves impide la obstrucción de estos en el sistema de distribución a continuación.

##### **1.1.2 Principales funciones**

- Eliminar partículas de material sólido suspendidas en el agua producto de la captación, las cuales se decantan debido a la disminución de la velocidad del agua en las naves del desarenador.
- Permitir solo el paso del agua superficial sin sedimentos, para su posterior uso, empujando los sedimentos hacia el fondo del desarenador, las naves, donde posteriormente serán decantados, filtrados y eliminados.
- Permitir fácilmente la eliminación de las partículas sedimentadas (arenas) contenidas en el agua de captación de la fuente superficial, a través de las compuertas de lavado.
- Eliminar los sólidos que puedan contener algunas bacterias, mejorando así la calidad del agua.
- Tener alta capacidad de acumulación de sólidos producto de la decantación.
- Proteger la línea de captación superficial.
- Proteger equipos y accesorios instalados aguas abajo.
- Evitar problemas de erosión, acumulación y obstrucción de sedimentos y materiales que pueden desgastar y afectar el rendimiento del sistema de conducción del agua.

##### **1.1.3 Principales usos**

- En las represas hidroeléctricas
- En el abastecimiento de agua potable para el consumo humano
- En la captación de agua para los sistemas de riego de cultivos
- En plantas de tratamiento de aguas residuales
- En sistemas de aguas industriales dentro de las fábricas
- En tomas para acueductos

### 1.1.4 Clasificación

#### 1.1.4.1 En función de su operación de limpieza

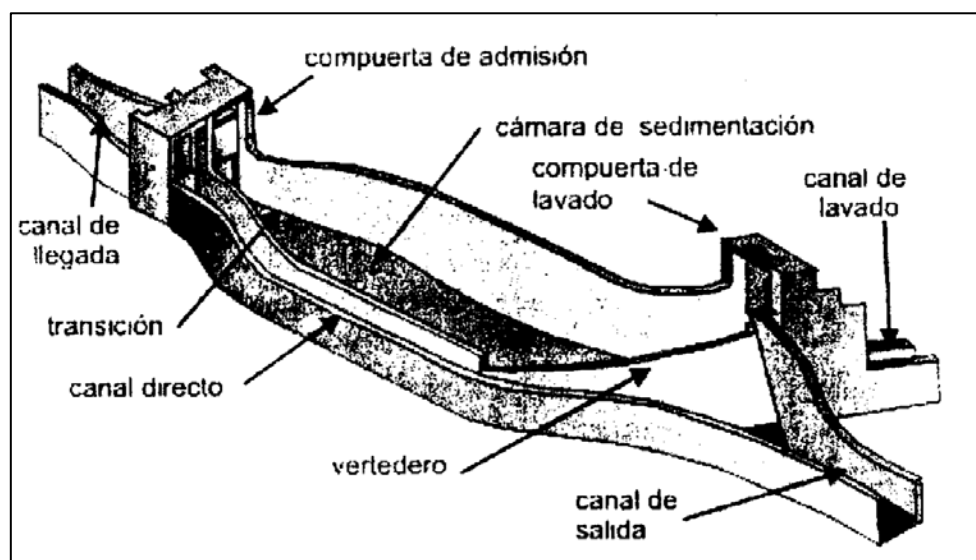
**Tabla 1**

*Tipos de desarenadores en función de su operación de limpieza.*

De lavado continuo	De lavado intermitente
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La sedimentación y evacuación se realizan al mismo tiempo, simultáneamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiene dos fases la sedimentación y la evacuación (purga), primero almacena los sedimentos y luego los expulsa en movimientos discontinuos (ver figura 1).</li> </ul>

**Figura 1**

*Esquema de un desarenador de lavado intermitente.*



*Nota.* Adaptado de (Villón Béjar, 2005)

### 1.1.4.2 En función de la velocidad

**Tabla 2**

*Tipos de desarenadores en función de la velocidad de escurrimiento.*

Velocidad de escurrimiento baja	Velocidad de Escurrimiento Alta
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>V &lt; 1 \text{ m/s}</math> (0.20 – 0.60 m/s)</li> <li>- Elimina partículas finas de diámetro 0.15 mm.</li> <li>- La cantidad de agua necesaria para la purga varía del 5% al 10% del gasto producido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>V &gt; 1 \text{ m/s}</math> (1 – 1.5 m/s)</li> <li>- Elimina partículas de material medio o grueso de diámetro menor a 0.50 mm.</li> <li>- La cantidad de agua necesaria para la purga varía del 2% al 10% del gasto producido.</li> </ul>

### 1.1.4.3 Por la disposición de la velocidad de escurrimiento

**Tabla 3**

*Tipos de desarenadores por la disposición de la velocidad de escurrimiento.*

En serie	En paralelo
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Está conformado por dos o más cámaras distribuidas una a continuación de la otra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Está conformado por dos o más cámaras distribuidas paralelamente y diseñados para que operen con una fracción del caudal derivado (ver figura 2).</li> </ul>

**Figura 2**

*Desarenador con cámaras distribuidas en paralelo.*



*Nota.* Adaptado de (PERÚ21, 2014)

### 1.1.5 Tipos

#### 1.1.5.1 Tipo Detritus

Son los más conocidos y utilizados, pueden ser de flujo horizontal, vertical y de alta velocidad.

**Tabla 4**

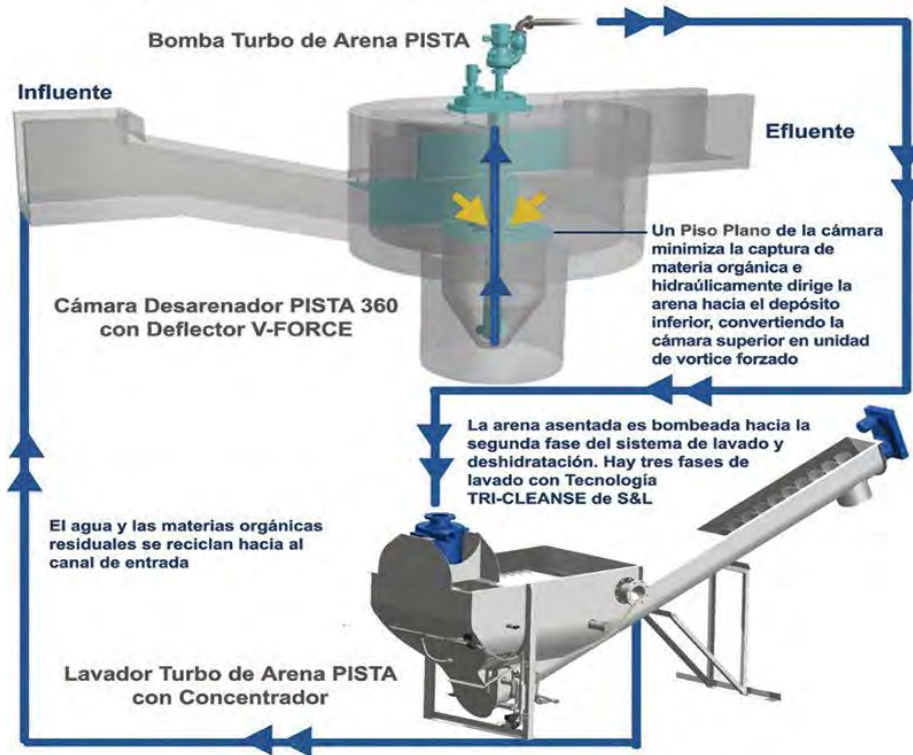
*Desarenadores tipo Detritus.*

De flujo horizontal	De flujo vertical	De alta velocidad
Es convencional. Las partículas se sedimentan al disminuir la velocidad con la que son transportadas por el agua. Regularmente suelen ser de forma rectangular y alargada. La parte esencial es el volumen útil donde ocurre la sedimentación. (Albuja et al., 2013)	Las partículas se sedimentan cuando el agua sube, ya que el flujo se efectúa desde la parte inferior hacia arriba. Pueden ser circulares, cuadrados o rectangulares. Su costo suele ser más elevado, y son muy utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales. (Albuja et al., 2013)	Consiste en un conjunto de tubos circulares, cuadrados o hexagonales o simplemente láminas planas paralelas, que se disponen con un ángulo de inclinación, con el fin de que el agua ascienda con flujo laminar. Es más funcional, ocupa menos espacio, es más económico y más eficiente. (Albuja et al., 2013)

#### 1.1.5.2 Tipo Vórtice

Consiste en un sistema mecánico de vórtices en el fondo del desarenador que provocan remolinos, con la intención de agitar el agua para que los sólidos queden atrapados en las tolvas centrales de un tanque circular que recogen la arena (Nuñez, n.d.).

Incluye dos diseños básicos: cámara de fondo plano con abertura pequeña que sirve para recoger la arena y cámaras de fondo inclinado con una abertura grande que lleva a la tolva. El vórtice dirige los sólidos hacia el centro, las paletas rotativas aumentan la velocidad para levantar el material orgánico más liviano y de ese modo retornarlo al flujo que pasa a través de la cámara de arena (Albuja et al., 2013).

**Figura 3***Desarenador tipo vórtice.*

*Nota.* Adaptado de Desarenador Vortex, 2017

## 1.2 Principales partes del desarenador

### 1.2.1 Transición de entrada

Es la zona donde se une el canal con el desarenador, la energía del agua que llega con alguna velocidad de la captación se disipa. Su función más importante es distribuir uniformemente las líneas de flujo y la velocidad, para reducir la turbulencia y evitar que los sedimentos se decanten en esta zona de transición.

La eficiencia de la sedimentación depende de la uniformidad de la velocidad en la sección transversal, por lo que se debe tener cuidado en el cálculo de la longitud de transición, para su diseño se puede utilizar la fórmula de Hind (Villón Béjar, 2005):

$$L = \frac{T_1 - T_2}{2 * tg(22.5^\circ)}$$

Donde:

$L$  = Longitud de la transición

$T_1$  = Espejo de agua del desarenador

$T_2$  = Espejo de agua en el canal

### 1.2.2 Cámara de sedimentación

Es la zona donde se realiza el proceso de decantación de los sedimentos, debido a la disminución de la velocidad producida por el aumento de la sección transversal y por acción de la gravedad las partículas sólidas caen al fondo, sedimentándose en las naves desarenadoras, las cuales deben tener una pendiente transversal entre 1:5 a 1:8, que permita la concentración de las partículas hacia el centro y facilite su limpieza.

### 1.2.3 Vertedero

Es la zona final de la cámara, por aquí pasa el agua limpia hacia el canal, debe trabajar con descarga libre, y ser diseñado para mantener una velocidad que no altere el reposo de las partículas sólidas sedimentadas.

La velocidad de paso en el vertedero debe ser baja, para evitar que se produzca turbulencia en el desarenador, y que se arrastre menos material en suspensión. La velocidad máxima de llegada debe ser de 1 m/s y una carga máxima de 25 cm.

Por lo general la longitud del vertedero es mayor que el ancho del desarenador, deben tener una relación largo/ancho entre de 10 y 20, se debe ubicar a lo largo de una curva circular, que comienza en uno de los muros laterales y continúa hasta la compuerta de lavado (ver figura 1).

### 1.2.4 Compuerta de lavado

Se construye de tal manera que permita el deslizamiento de las partículas sólidas hacia el canal de limpieza de los sedimentos. Sirve para desalojar los sedimentos depositados en el fondo de las naves desarenadoras. El fondo del desarenador debe tener una gradiente del 2% al 6% para facilitar el movimiento de las partículas sólidas hacia la compuerta.

El proceso de limpieza consiste en cerrar las compuertas de admisión y abrir las de lavado, de esta manera el agua sale con gran velocidad arrastrando la mayor parte de los sedimentos, mientras el caudal normal sigue pasando al canal a través de canal directo o a través de otra cámara del desarenador. Una vez que está vacía la cámara, se abren parcialmente las compuertas de admisión y el agua que entra circula con gran velocidad sobre los sedimentos que han quedado, erosionándolos y completando el lavado. Para lavar una cámara del desarenador por lo general se cierran las compuertas de lavado, pero también deben poder vaciarse con estas abiertas, por lo que deben ser diseñadas para un caudal igual al que ingresa por el canal más el caudal de lavado que se obtiene dividiendo el volumen del desarenador entre el tiempo de lavado. Se considera que para que el lavado pueda efectuarse en forma rápida y eficaz la velocidad de descarga debe ser capaz de arrastrar los sólidos y estar entre 3 m/s y 5 m/s (Villón Béjar, 2005).

### 1.2.5 By-pass

Conocido también como canal directo, su función es evitar que se interrumpa la operación y servicio del desarenador en caso de limpieza, inspección o mantenimiento del mismo, por lo que se colocan dos compuertas, una a la entrada del desarenador y otra al canal



directo. Solo en caso de que el desarenador cuente con dos o más cámaras, el canal directo se vuelve innecesario, porque una de las cámaras trabaja temporalmente con el caudal total mientras la otra está fuera de servicio o se lava.

### 1.3 Criterios de diseño

#### 1.3.1 Recomendaciones

- Se debe determinar la mejor ubicación de captación del flujo de agua, que garantice la mayor eficacia en la captación de recurso hídrico para los sistemas de abastecimiento que se tienen planeados (Noblecilla Palomino, 2019).
- La ubicación del desarenador debe ser lo más cerca posible del sitio de captación, debe garantizar que el sistema de limpieza pueda hacerse por gravedad y que la tubería de desagüe no tenga una longitud excesiva (Albuja et al., 2013).
- El fondo de la estructura debe estar preferiblemente por encima del nivel freático. En caso contrario deben tomarse las medidas estructurales correspondientes de flotación y sub-presión, ya que debe proporcionar suficiente seguridad a la estructura y no debe presentar riesgo de inundaciones (Albuja et al., 2013).
- El área de la localización debe ser suficientemente grande para permitir la ampliación de las unidades durante el periodo de diseño del sistema (Albuja et al., 2013).
- Los desarenadores de flujo horizontal deben ser diseñados para remover partículas de diámetro medio igual o superior a 0.2 mm, por lo que se debe tratar de controlar y mantener la velocidad del flujo alrededor de 0.3 m/s con una tolerancia +20% (NTP OS.090, 2009).
- El caudal en las naves desarenadoras se debe distribuir uniformemente, no debe presentar vórtices de eje horizontal o vertical, por lo que las líneas de corriente deben ser paralelas y no provocar remanso en el canal aguas arriba. Además, el caudal en cada nave debe distribuirse uniformemente, esto es esencial durante la etapa de limpieza de las mismas (Gonzales Naquiche, 2020).
- No debe proyectarse en curva la llegada del flujo de agua en la zona de transición para evitar velocidades altas en los lados de la cámara de sedimentación (Organización Panamericana de la Salud, 2005).
- Se debe garantizar que la transición entre el canal y el desarenador tenga una velocidad uniforme en la zona de entrada, con un ángulo de divergencia suave no mayor a  $12^{\circ} 30'$  y que esté sin sedimentos, ya que estos deben decantarse en las cámaras, para que puedan ser descargados hacia el exterior, mediante una purga uniforme de las naves desarenadoras (Organización Panamericana de la Salud, 2005).
- La velocidad de paso por el vertedero de salida debe ser pequeña para causar menor turbulencia y arrastre de material (Krochin,  $V = 1\text{m/s}$ ), evitando así que los sedimentos decantados se suspendan nuevamente (Organización Panamericana de la Salud, 2005).
- Se debe tener en cuenta criterios económicos y técnicos de 8 a 16 años, con un periodo de operación de 24 horas por día para el periodo de diseño (Organización Panamericana de la Salud, 2005).

- El número de unidades mínimas en paralelo es 2 para efectos de mantenimiento. En caso de caudales pequeños y turbiedades bajas se podrá contar con una sola unidad que deba contar con un canal de by-pass para efectos de mantenimiento (Organización Panamericana de la Salud, 2005).
- Se debe tener en cuenta los siguientes criterios para una sedimentación más eficiente (Organización Panamericana de la Salud, 2005):

**Tabla 5**

*Criterios para una sedimentación más eficiente.*

<b>Sólidos</b>	<b>Diámetro de las partículas (cm)</b>	<b>Régimen</b>	<b>Número de Reynold (Re)</b>
<b>Arena fina</b>	$d < 0.01$	Laminar	$Re < 1.0$
<b>Arena gruesa</b>	$0.015 < d < 0.1$	Transición	$1.0 < Re < 1000$
<b>Grava</b>	$d > 1.0$	Turbulento	$Re > 1000$

### 1.3.2 Problemas sedimentológicos

Las ineficiencias de un desarenador y la acumulación de sedimentos en la transición de entrada o salida del mismo pueden generar (Villón Béjar, 2005):

- Disminución de la sección de los canales producto de la acumulación de sólidos en el fondo de estos, esto genera un aumento en el costo anual de mantenimiento y constantes interrupciones en el servicio del canal.
- Desgaste de turbinas en plantas hidroeléctricas, debido a la arena arrastrada por el agua, generando una disminución del rendimiento e incluso su reposición frecuentes y costosas.
- Fallo en el desarenador generaría obstrucción y desgaste en las tuberías, taponamiento de filtros, disminución de la capacidad del tanque, etc., lo que conlleva a daños estructurales posteriores a la captación del recurso hídrico, incluso fugas y problemas ambientales.

## **Capítulo 2**

### **Modelo hidráulico del desarenador terminal de Majes**

#### **2.1 Generalidades del proyecto**

El proyecto de Majes es un sistema hidráulico ubicada en el departamento de Arequipa, en la provincia de Cailloma, cuya función es regular las aguas de los ríos Colca y Apurímac, por medio de dos reservorios: Condoroma y Angostura, y derivar estas aguas al río Sihuas mediante un sistema de conducción conformado por túneles.

El proyector además genera energía eléctrica antes de entregar sus aguas al río Sihuas, de donde es captada por la bocatoma de Pitay para ser utilizada en la agricultura mediante riego tecnificado.

El Desarenador Terminal está situado al principio de la red de distribución de agua del sistema de irrigación de las pampas de Majes, que abarca en su primera etapa una superficie de 22 mil hectáreas y su caudal de diseño es de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  (Instituto de Hidráulica – Universidad de Piura, 1990).

#### **2.2 Antecedentes**

El desarenador terminal de Majes registra deficiencias funcionales en su operación, por lo que AUTODEMA (Ministerio de la Presidencia Instituto Nacional de Desarrollo Autoridad Autónoma de Majes) contrató al Instituto de Hidráulica de la Universidad de Piura para la verificación del diseño original del desarenador y las reglas de operación mediante una Investigación en Modelo Hidráulico. Esta investigación culminó en 1989 con la conclusión de que algunas modificaciones eran ineludibles (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 1990).

#### **2.3 Objetivos de la investigación**

La investigación tuvo como condición proponer modificaciones fáciles de introducir en el prototipo, porque el riego no debía ser interrumpido por mucho tiempo, además deberían tener un costo limitado, porque la estructura ya estaba construida. En base a esto los objetivos de la investigación fueron (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 1990):

- Alcanzar una distribución uniforme del caudal en las cuatro naves, con las modificaciones mínimas necesarias.
- Establecer condiciones de operación para la limpieza hidráulica de los sedimentos depositados en el fondo de la transición de salida.

#### **2.4 Alternativas de solución propuestas**

Después de la investigación se observó que la causa de la falta de distribución uniforme del caudal en las cuatro naves se debe a la formación de macrovórtices en la transición de entrada. Para romper estos vórtices se plantea que son necesarios elementos estructurales que podrían tener la forma de una o varias rejillas de elementos verticales angulares o la forma de partidores, siendo posible utilizar una combinación de ambas y sus variaciones. Para la limpieza

del fondo de la transición de salida se considera el suministro de agua para una limpieza hidráulica (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 1990).

## 2.5 Conclusiones de la investigación

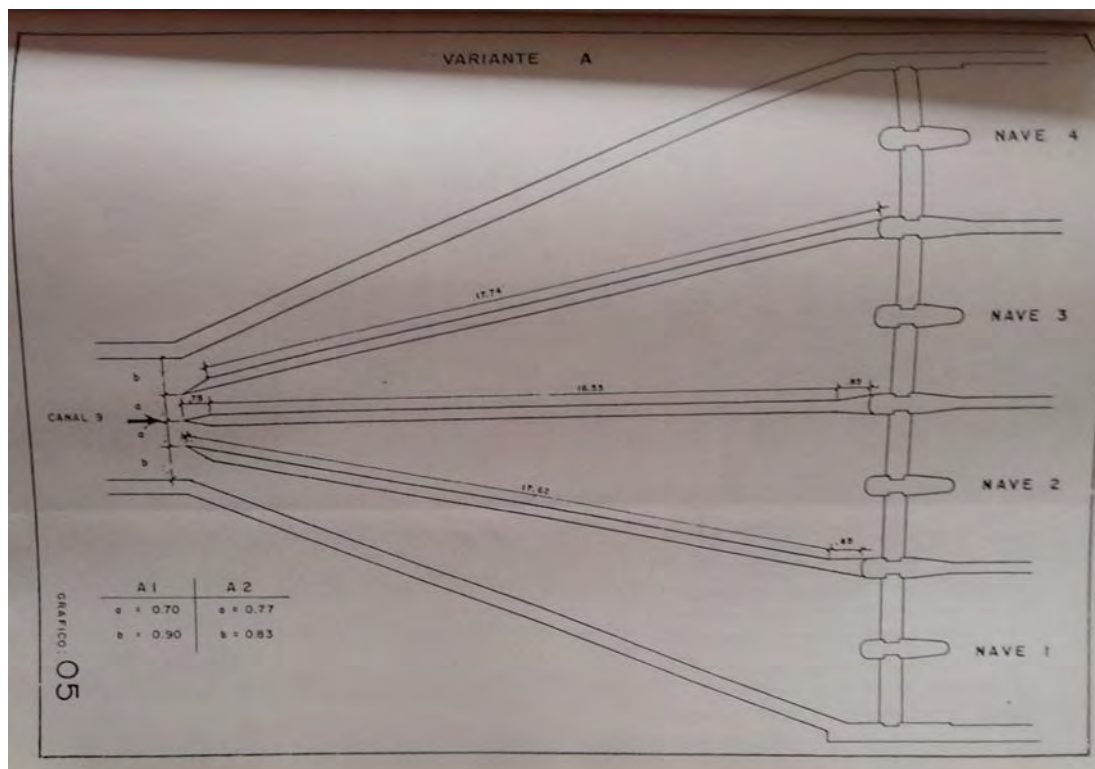
Se recomendaron modificaciones del modelo original y reglas de operación para cumplir los objetivos de la investigación (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 1990).

### 2.5.1 Modificaciones de la transición de entrada:

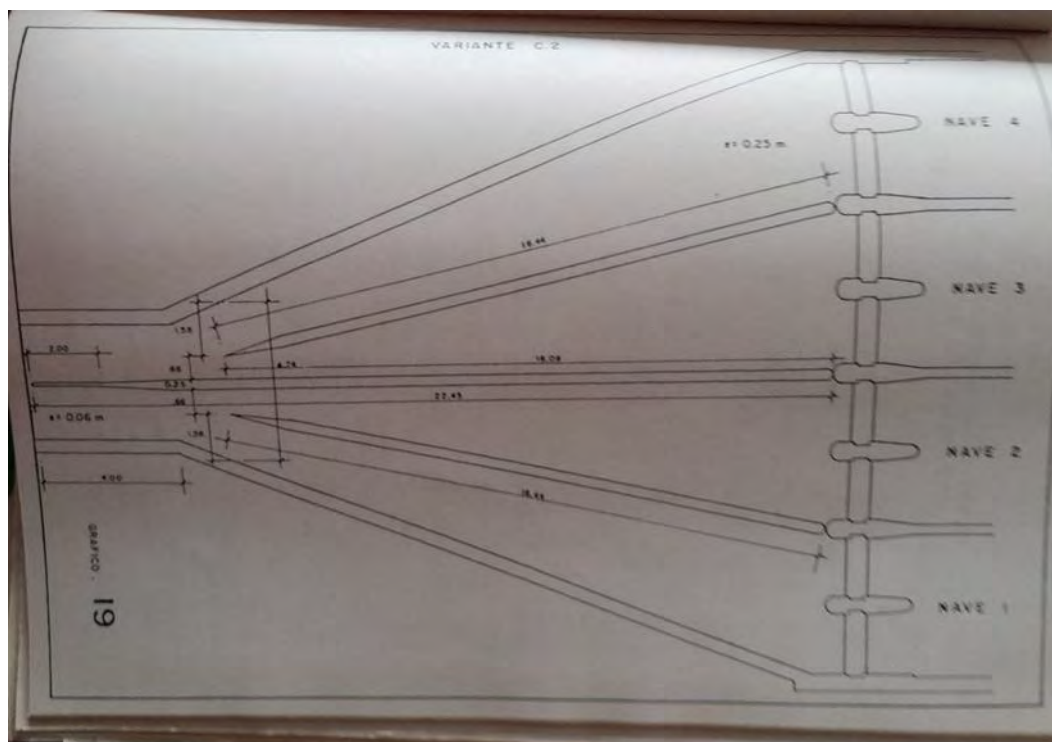
El laboratorio recomendó las siguientes modificaciones: para caudales menores a  $16 \text{ m}^3/\text{s}$  construir la variante C-2 (ver figura 5), de tal manera que los elementos estructurales puedan ser reubicados de la forma requerida por la variante A-2 (ver figura 4) para caudales mayores a  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ . Además, recomendó la construcción de un vertedero lateral en los últimos kilómetros del canal para protegerlo contra el rebosamiento.

**Figura 4**

*Varinte A-1 y A-2.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 1990)

**Figura 5***Variante C-2.*

*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 1990)

**2.5.2 Modificaciones de la transición de salida:**

El laboratorio recomendó una contrapendiente en el fondo, con una serie de pequeños muros guías destinados a asegurar la limpieza de todas las partes de la superficie. La acción de limpieza se produce mediante el flujo derivado de otras naves, desde el fin de la transición hacia la nave.

**2.5.3 Reglas de operación:**

Se recomendó que la concentración de sedimentos sea mayor que 1 gr/lit, trabajar con la purga continua de  $Q_p = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.375 \text{ m}^3/\text{s}$  por nave), y concentraciones menores recomendó abrir las compuertas de purga una por cada 24 horas durante un tiempo de 15 minutos. No recomienda la purga de naves una por una para caudales mayores a  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ , y en el caso de la variante C-2 no hacerlo para caudales mayores a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  por un tema de seguridad.

Recomienda lavar la derivación y el desarenador con un caudal de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , cada vez que los depósitos formados en la transición de entrada, lleguen con su altura máxima hasta el inicio de las naves.

Recomendó que para la evaluación continua de la eficiencia se debe llevar un registro permanente de las concentraciones de sedimentos al inicio del desarenador y en las tomas. El rango de eficiencia para la partícula  $d = 0.2 \text{ mm}$  debe ser de 75% a 80%, de lo contrarios demandaría el cierre parcial o completo de la bocatoma Pitay.



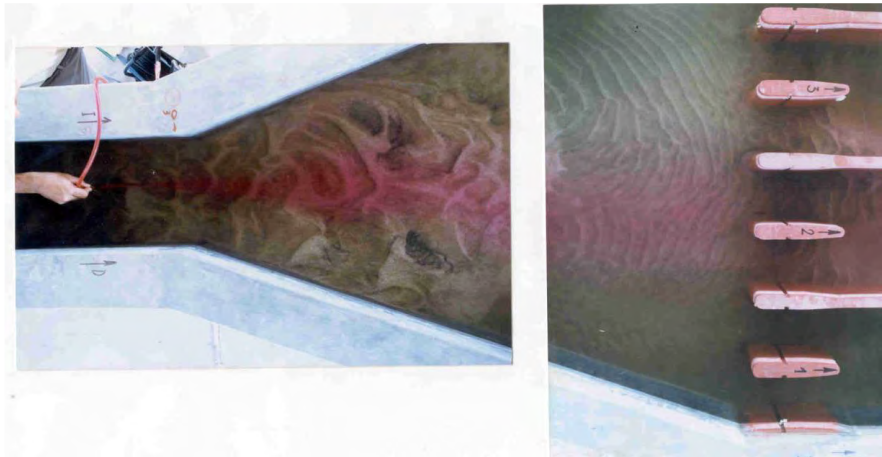
## 2.6 Modelo físico original a escala del desarenador de Majes

Condiciones iniciales:

- El diseño del modelo físico original del desarenador consiste en una transición directa.

**Figura 6**

*Canal aguas arriba y transición de entrada del modelo físico original del Desarenador de Majes*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

- Se puede identificar que los sedimentos se decantan al ingreso del desarenador y no llegan en su totalidad a las naves, esto es a casusa de que el flujo no es uniforme en la transición.

**Figura 7**

*Entrada de las naves del modelo físico original del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)



- En la entrada de las naves del desarenador se observa que el caudal no se distribuye uniformemente, las líneas de corriente no son paralelas y presenta vórtices. Esto se puede deber a que la sección transversal se reduce drásticamente en el ingreso de las naves, lo que produce el aumento de la velocidad y que se genere turbulencia.

**Figura 8**

*Naves del modelo físico original del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

- Se puede identificar la poca acumulación de los sedimentos en las naves del desarenador, la mayoría se decantaron en la transición de entrada.

**Figura 9**

*Salida del modelo físico original del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

- En la salida del desarenador se observa turbulencia, flujo no uniforme y la formación de vórtices, lo que produce la alteración de los sólidos decantados y que estos se resuspendan, acumulándose así en la salida.

**Figura 10**

*Sedimentos en la salida del modelo físico original del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

## 2.7 Modelo físico final a escala del Desarenador de Majes

Condiciones finales:

- El diseño del modelo físico original se modificó con la finalidad de dar solución a los problemas presentados en la simulación anterior. Se optó por reducir la sección transversal desde la transición de entrada hasta las naves, conectándolas mediante estructuras de acero (ver figura 11).

**Figura 11**

*Canal aguas arriba y transición de entrada del modelo físico final del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

- Se puede observar en la transición de entrada que el flujo es uniforme, no presenta turbulencias ni alteraciones, esto permite que los sedimentos se transporten hasta las naves del desarenador donde se producirá su sedimentación.



**Figura 12**

*Transición de entrada del modelo físico final del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

- Se observa la disminución de sedimentos decantados en la transición de entrada del desarenador.

**Figura 13**

*Naves del modelo físico final del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

- Se observa el aumento de sedimentos decantados en las naves del desarenador y la reducción de estos en la salida del mismo.

**Figura 14**

*Salida del modelo físico final del desarenador de Majes.*



*Nota.* (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

- En la salida del desarenador se observa un flujo uniforme, sin formación de turbulencia, lo que permite que los sedimentos decantados en las naves no se alteren ni se resuspendan.



**Figura 15**

*Sistema de purga del modelo físico final del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

- Se observa que el sistema de purga, limpieza, del desarenador funciona correctamente, permitiendo la evacuación de los sedimentos hacia el canal de salida.

## **2.8 Condiciones para la simulación numérica**

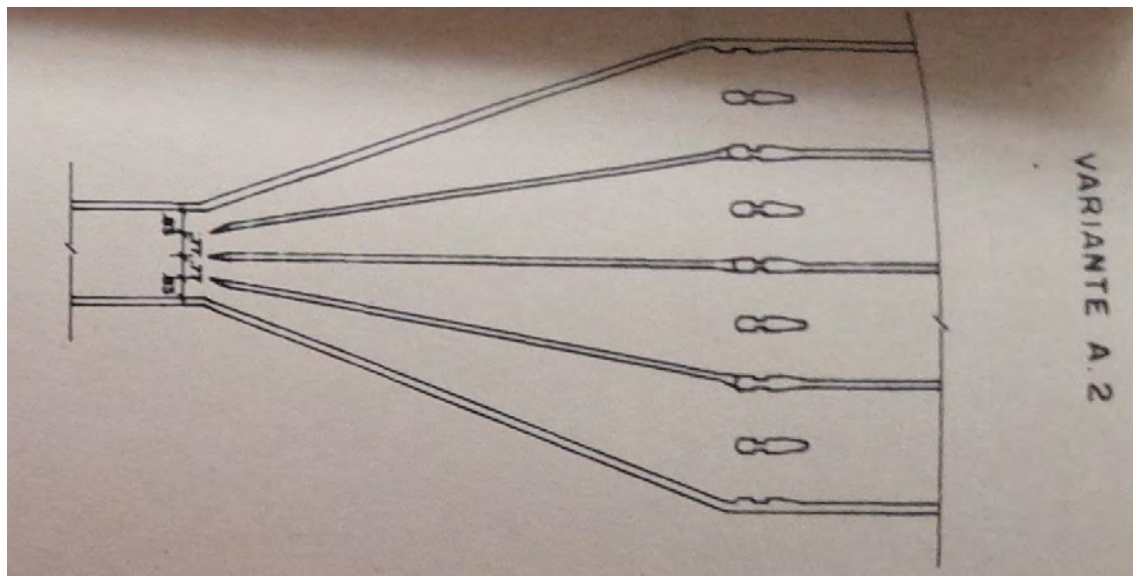
### **a) Condiciones iniciales:**

- Caudal de diseño usado para la simulación:  $Q = 20 \frac{m^3}{s}$
- Características del canal de ingreso (aguas arriba): Es de sección rectangular, tiene un ancho de solera de 3 m, una longitud de 20 m, será revestido de concreto, cuya rugosidad “n” es de 0.016, y la pendiente longitudinal es de 0.002.

### **b) Condiciones finales:**

- Se realizó las modificaciones recomendadas por el laboratorio establecidas en la variante A-2.

**Figura 16**  
*Variante A-2.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 1990)

## 2.9 Cálculo de la velocidad de ingreso en el canal aguas arriba del desarenador

Fórmula:

$$Q = V * A$$

Datos:

- Área del canal rectangular ( $A$ ):

$$b = 3 \text{ m}$$

$$y = 2.5 \text{ m}$$

$$A = b * y$$

$$A = 3 * 2.5$$

$$A = 7.5 \text{ m}^2$$

- Velocidad al ingreso del canal ( $V$ ):

$$V = \frac{Q}{A}$$

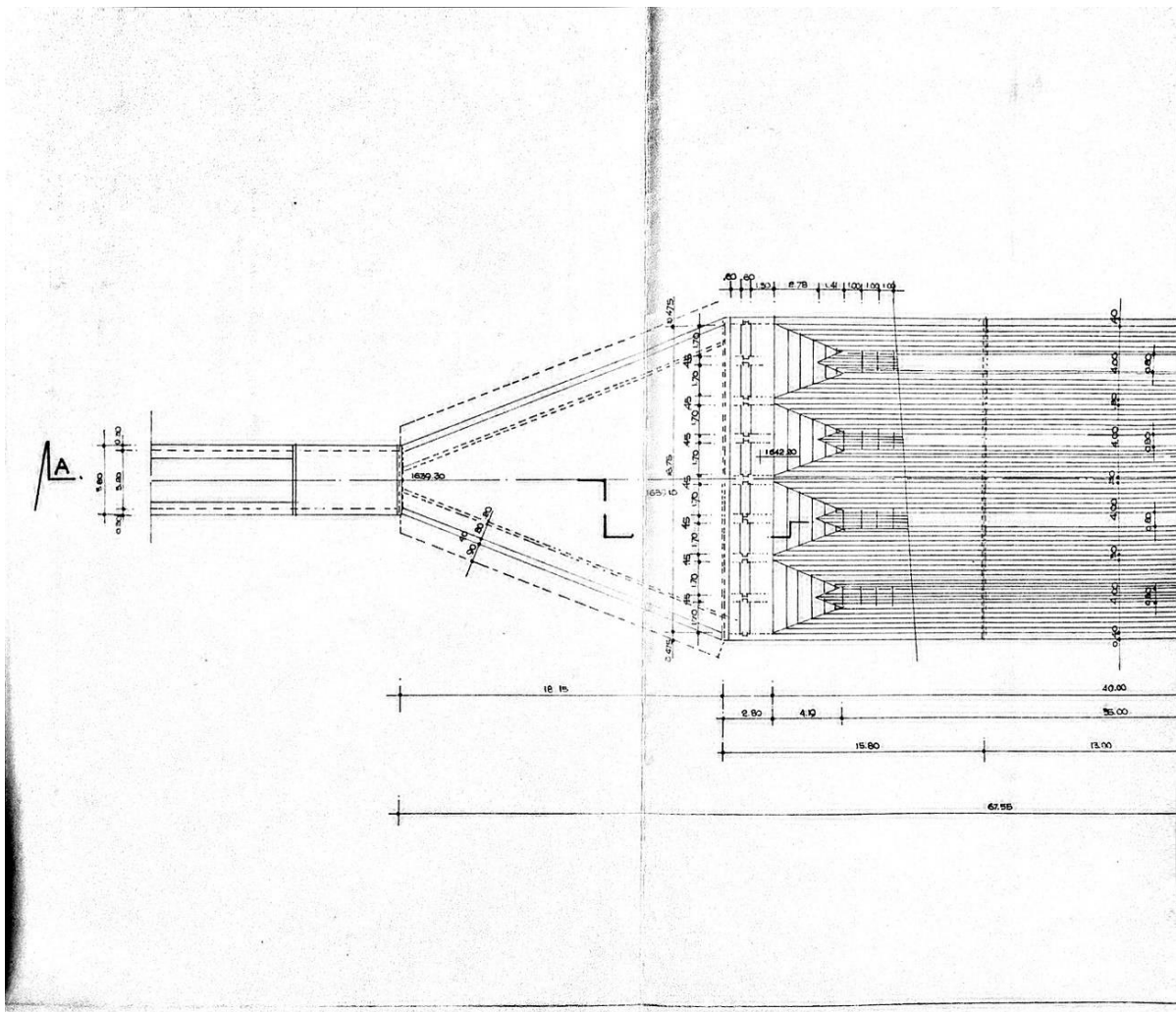
$$V = \frac{20 \text{ m}^3/\text{s}}{7.5 \text{ m}^2}$$

$$V = 2.67 \text{ m/s}$$

## 2.10 Planos

**Figura 17**

*Vista en planta de la transición de entrada y de las cámaras de sedimentación del desarenador de Majes.*

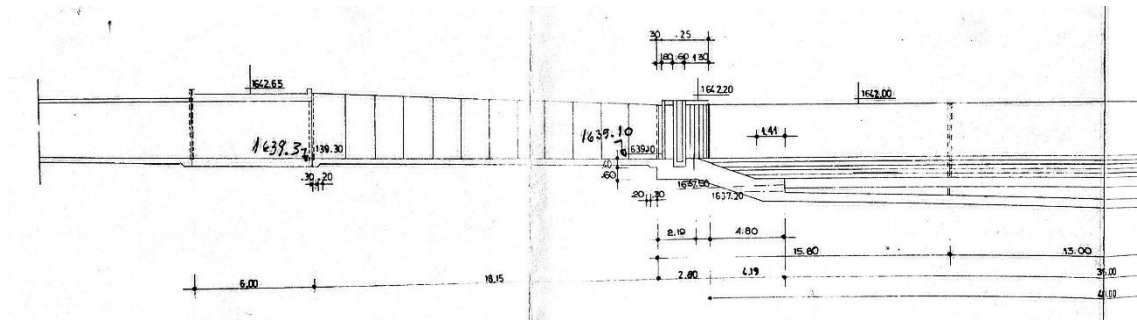


*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 19**

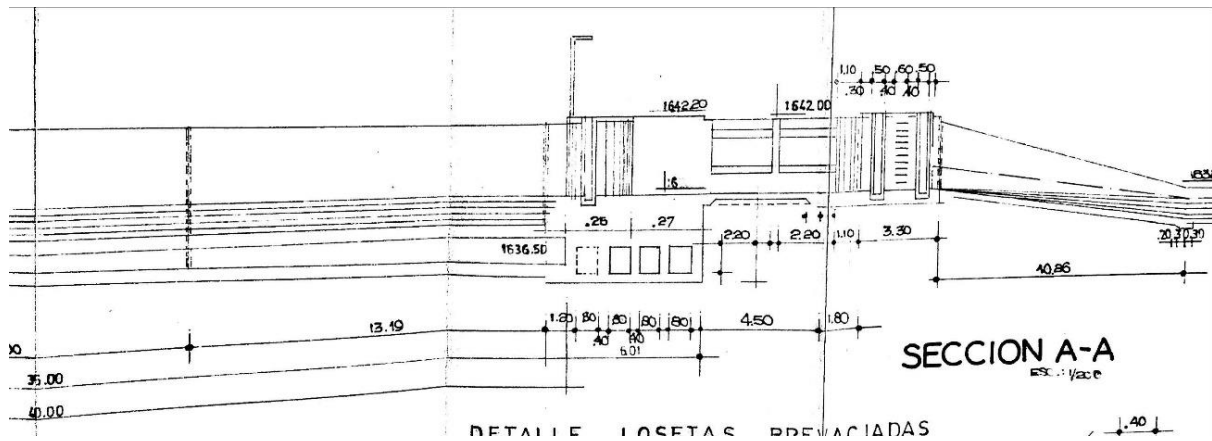
*Vista longitudinal de la transición de entrada y de las cámaras de sedimentación del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 20**

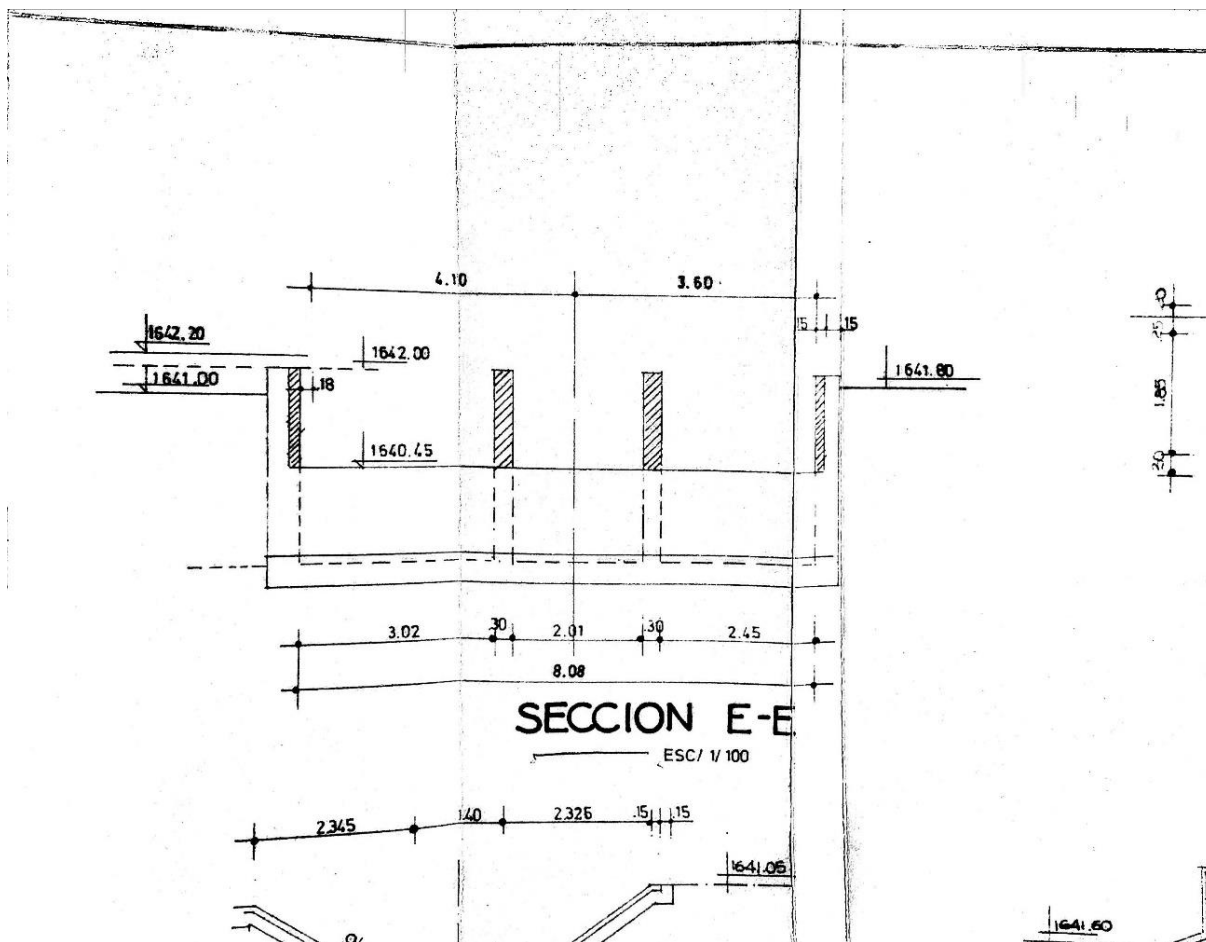
*Vista longitudinal del vertedero y transición de salida del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 21**

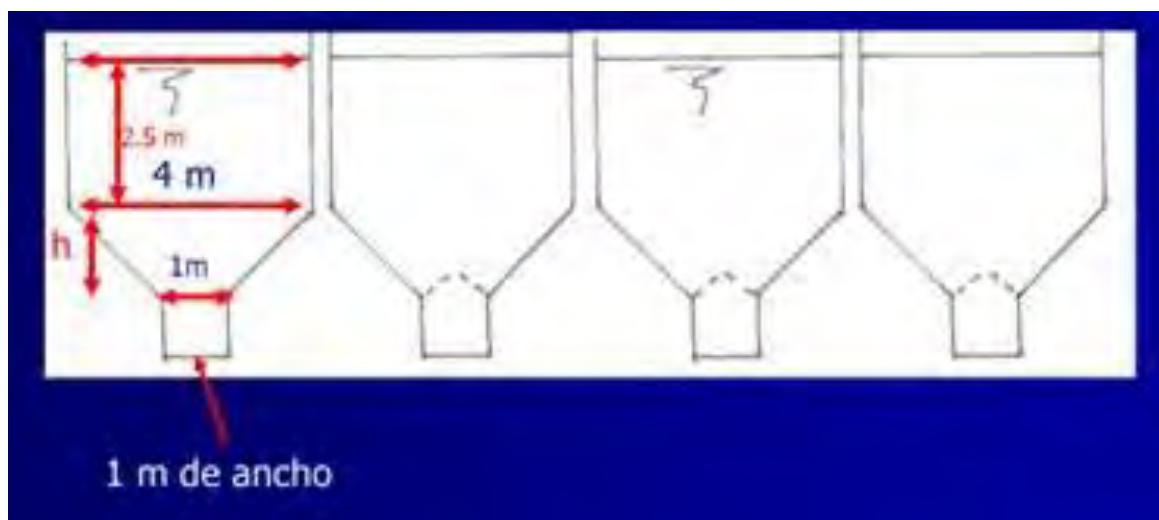
Corte transversal, sección E-E, del desarenador de Majes.



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 22**

*Detalle de la sección transversal de las naves del desarenador de Majes.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)



## Capítulo 3

### Modelación numérica

#### 3.1 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

##### 3.1.1 Definición

Computational Fluid Dynamics (CFD) en inglés, o Dinámica de Fluidos Computacional en español, es una herramienta de análisis de sistemas sobre simulación numérica de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados tales como reacciones químicas, combustión y aeroacústica mediante el uso de un ordenador (ESSS, 2016).

Al no existir una solución analítica de las ecuaciones de conservación resueltas por la Dinámica de Fluidos Computacional, es necesario utilizar algún método de discretización, como el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo este último el más utilizado en la CFD (ESSS, 2016).

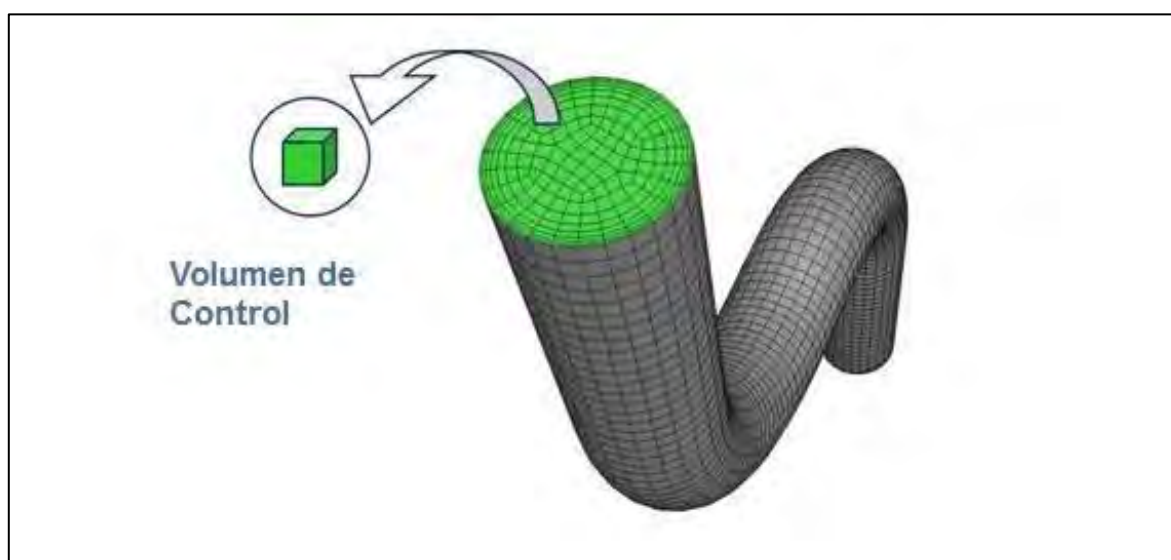
El método de volúmenes finitos se basa en que el dominio se discretiza en un conjunto de volúmenes de control, que para resolverlos utiliza las ecuaciones de conservación de la energía, masa, momento (Ecuaciones de Navier Stokes), las ecuaciones diferenciales parciales se discretizan en un sistema de ecuaciones algebraicas y se resuelven numéricamente para presentar una solución (ESSS, 2016).

##### 3.1.2 Métodos de discretización

El método de discretización consiste en intercambiar el dominio continuo por un dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar el dominio original, es decir, es discretizado en pequeños volúmenes (volúmenes de control) y la ecuación algebraica es resuelta para cada uno de estos elementos, ver figura 23 (ESSS, 2016).

**Figura 23**

*Volumen de control.*



*Nota.* Adaptado de (ESSS, 2016)

### 3.1.2.1 Método de elementos finitos

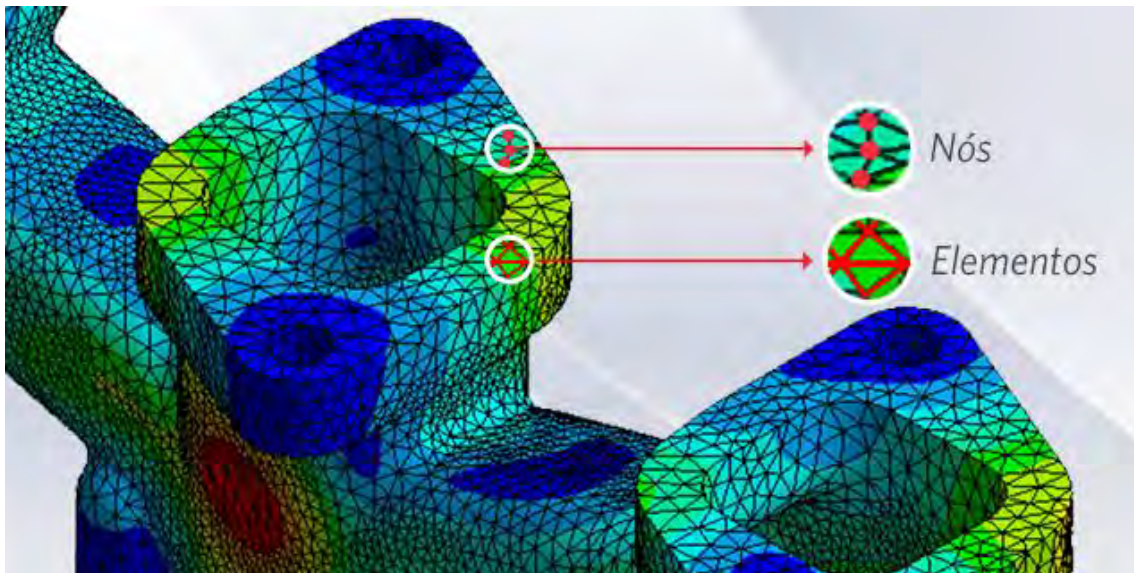
El método de elementos finitos consiste en dividir en partes pequeñas, conocidas como “elementos”, la geometría que se está analizando y que representa el dominio continuo del problema. Esto permite resolver un problema complejo en problemas más simples, permitiéndole a la computadora hacer las tareas con mayor eficiencia (Mirlisenna, 2016).

El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Esas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre otros, dependiendo del tipo y tamaño del problema. Como el número de elementos es limitado, son llamados “elementos finitos” (Mirlisenna, 2016).

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, nodos o puntos nodales. El conjunto de estos se denomina malla. Debido a la subdivisión de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico se resolverán de manera aproximada para este método numérico, ya que su precisión depende mucho de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis (Mirlisenna, 2016).

**Figura 24**

*Nodos y elementos de una malla.*



*Nota.* Adaptado de (Mirlisenna, 2016)

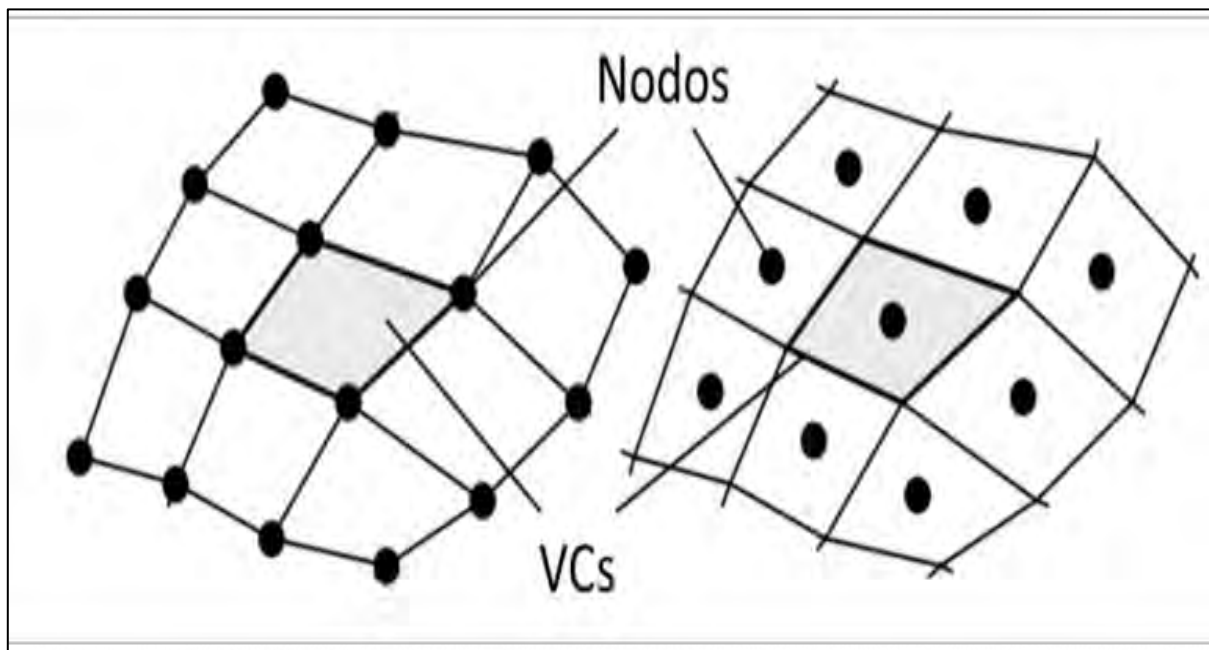
La principal aplicación de este método está en la resolución y diagnóstico de problemas de análisis estructural ya que permite obtener desplazamientos, deformaciones y tensiones, representar diferentes escenarios y evaluar el rendimiento de productos con aplicación de criterios de resistencia, rigidez o fatiga (Mirlisenna, 2016).

### 3.1.2.2 Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos, Finite Volume Method (FVM) en inglés, permite resolver con éxito los problemas de la mecánica de fluidos, y problemas más complejos relacionados a flujos multifásicos, reactivos, o fuertemente turbulentos. Se basa en la descomposición del dominio en pequeños volúmenes de control (VCs) donde las variables son almacenadas en los nodos. Usualmente, los volúmenes de control y los nodos son definidos con una grilla numérica, la malla. Los nodos, donde se guardan las variables a resolver, se ubican en los vértices de esta malla o en los centros de los volúmenes, y es la referencia con la que se cuenta para aproximar la solución en el resto del dominio (ver figura 25). Después de haber definido los VCs, las ecuaciones de conservación son descritas en su forma integral para cada volumen (Osses, 2016).

**Figura 25**

*Nodos en los vértices y centro de los volúmenes de control para una grilla cuadrilátera.*



*Nota.* Adaptado de (Osses, 2016)

La modelación matemática se basa en los principios de conservación de masa, momento y energía, cuyas ecuaciones discretas son deducidas por el método de volúmenes finitos.

El método no se limita solo a problemas de mecánica de fluidos, y de forma general se basa en los siguientes pasos (Osses, 2016):

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

### 3.1.3 Ecuaciones de Navier Stokes

Las ecuaciones de Navier Stokes son ecuaciones complejas, no poseen una solución analítica por el momento, están expresadas en derivadas parciales elípticas, son altamente no lineales, dependientes en el tiempo, tridimensionales, incluyen esfuerzos viscosos, consideran la compresibilidad del fluido, se encuentran acopladas entre sí y describen el comportamiento de un fluido, junto con la ecuación de continuidad (Çengel & Cimbala, 2006).

Gracias al avance en las computadoras estas ecuaciones forman parte de la modelación mediante CFD, ya que permiten determinar el comportamiento dinámico de un fluido (Çengel & Cimbala, 2006).

Para un flujo incompresible y viscosidad constante, en coordenadas cartesianas, la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier Stokes son (Çengel & Cimbala, 2006):

- Ecuación de continuidad para flujo incompresible:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

- Componente x de la ecuación de Navier Stokes para flujo incompresible:

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

- Componente y de la ecuación de Navier Stokes para flujo incompresible:

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

- Componente z de la ecuación de Navier Stokes para flujo incompresible:

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$\mu$ : Viscosidad dinámica ( $N - s/m^2$ )

Para un flujo compresible, en coordenadas cartesianas las ecuaciones de Navier Stokes son (Noblecilla Palomino, 2019):

### 3.1.3.1 Ecuación de conservación de la masa

Esta ecuación representa la variación de masa por unidad de volumen y unidad de tiempo en cierto punto del espacio, los otros términos representan la variación de velocidad de entrada y salida del material en el sistema (Noblecilla Palomino, 2019):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad

$u$ : Velocidad en dirección  $x$  (m/s)

$v$ : Velocidad en dirección  $y$  (m/s)

$w$ : Velocidad en dirección  $z$  (m/s)

$t$ : Tiempo (s)

### 3.1.3.2 Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento (Momentum)

Estas ecuaciones representan la igualdad entre la aceleración local sumada a tres términos de advección, en un extremo, con un gradiente de presión adicionado a tres términos de difusión en el otro extremo (Noblecilla Palomino, 2019):

$$Mx: \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.6)$$

$$My: \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3.7)$$

$$Mz: \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (3.8)$$

Donde:

$Mx$ : Momentum  $x$  (N.s)

$My$ : Momentum  $y$  (N.s)

$Mz$ : Momento  $z$  (N.s)

$P$ : Presión (N/m<sup>2</sup>)

### 3.1.3.3 Ecuación de la conservación de la energía

Esta ecuación representa la igualdad entre la aceleración local sumada a tres términos de advección, en un extremo, con una expresión de difusión en el otro extremo (Noblecilla Palomino, 2019):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.9)$$



Donde:

$T$ : Cantidad de calor del fluido ( $J/kg - K$ )

$\lambda$ : Conductividad térmica ( $W/m - K$ )

$C_p$ : Calor específico del fluido ( $J/kg - K$ )

### 3.1.4 Elementos

La aplicación de la CFD tiene 3 elementos principales: el pre – proceso, la solución y el post-proceso (Versteeg & Malalasekera, 2007).

#### 3.1.4.1 El pre – proceso

El pre – proceso consiste en la entrada de un problema de flujo a un programa CFD por medio de una interfaz amigable para el operador y la posterior transformación de esta entrada en una forma adecuada para que la use el solucionador. Las principales actividades en esta etapa son las siguientes (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Definición de la geometría: el dominio computacional
- Generación de cuadrícula (malla): la subdivisión del dominio en varios subdominios más pequeños que no se superponen (volúmenes de control)
- Selección de los fenómenos físicos y químicos que necesitan ser modelados
- Definición de propiedades de fluidos
- Especificación de las condiciones de contorno apropiadas en las celdas que coinciden o tocan el límite del dominio

#### 3.1.4.2 La solución

La simulación teniendo en cuenta el método de volumen finito consiste en (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Integración de las ecuaciones gobernantes del comportamiento de los fluidos sobre todos los volúmenes de control (finitos) del dominio
- Discretización: conversión de las ecuaciones integrales resultantes en un sistema de ecuaciones algebraicas
- Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo

#### 3.1.4.3 El post-proceso

El post-proceso consiste en la comparación y análisis de los resultados mediante las siguientes herramientas versátiles de visualización de datos que forman parte de la CFD (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Visualización de cuadrícula y geometría de dominio
- Gráficos vectoriales
- Gráficos de líneas y contornos sombreados
- Gráficos de superficie 2D Y 3D
- Seguimiento de partículas
- Manipulación de vistas (traducción, rotación, escalado, etc.)



- Salida PostScrip en color
- Exportación de datos

### 3.1.5 Ventajas

Las principales ventajas de la CFD y su aplicación son las siguientes (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Permite realizar simulaciones numéricas de diversos ambientes, con alta resolución en espacio y tiempo, de manera rápida y es muy económico.
- Reduce sustancialmente los plazos de entrega y los costos de los nuevos diseños.
- Permite estudiar sistemas muy grandes en lo que los experimentos controlados son difíciles o imposibles de realizar.
- Permite estudiar sistemas en condiciones peligrosas como escenarios de accidentes, más allá de sus límites de rendimiento normales.
- Detalle de los resultados prácticamente ilimitado.

### 3.1.6 Desventajas

Dado a la complejidad del comportamiento de los fluidos, y a la aproximación de los modelos matemáticos las principales desventajas de la aplicación de la CFD son las siguientes (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Puede presentar errores numéricos, de redondeo o truncamiento, modelamiento, discretización e implementación, por lo que habrá diferencias entre los resultados calculados y la realidad.
- El modelo matemático del problema puede ser inadecuado y la precisión de los resultados no será del 100%, viéndose limitado por la capacidad computacional disponible. (Noblecilla Palomino, 2019)
- Los resultados no siempre son precisos, ya que dependen mucho de las condiciones iniciales y límites esperados en el modelo matemático. (Gonzales Naquiche, 2020)
- Las soluciones se basan en modelos físicos del mundo real, por lo que sus resultados solo pueden ser tan precisos como los modelos físicos en los que se basan.
- Requiere de un aprendizaje y grado de conocimiento para analizar correctamente y hacer juicios críticos acerca de los resultados calculados.

### 3.1.7 Aplicaciones en la ingeniería

La CFD tiene su principal aplicación en el estudio del comportamiento de un fluido y dentro de la Ingeniería se tiene las siguientes aplicaciones (ESSS, 2016):

- Simular difusión y convección de sustancias fluidas en diferentes ambientes.
- Realizar la planificación y gestión de recursos híbridos.
- Analizar la aerodinámica y aerotermodinámica de vehículos.
- Evaluar la refrigeración de equipamientos, como reactores nucleares, motores, etc.
- Hacer estudios de caracterización de polución ambiental, dispersión de gases, análisis y simulación de lanzamiento de poluentes y contaminantes en corrientes hídricas.
- Simular hidrodinámica y hemodinámica.

- Probar y desarrollar proyectos de sistemas propulsivos y de generación de energía en general.

Otras áreas en las que la CFD también es una herramienta importante de investigación son las siguientes (Versteeg & Malalasekera, 2007):

- Aerodinámica de aeronaves y vehículos: sustentación y arrastre.
- Hidrodinámica de barcos.
- Planta de energía: combustión interna en motores y turbinas de gas.
- Turbomaquinaria: flujos dentro de pasajes giratorios, difusores, etc.
- Ingeniería eléctrica y electrónica: refrigeración de equipo, incluidos microcircuitos.
- Ingeniería de procesos químicos: mezcla y separación, moldeo de polímeros.
- Entorno externo e interno de los edificios: carga de viento y calefacción/ventilación.
- Ingeniería marina: cargas en estructuras marinas.
- Ingeniería ambiental: distribución de contaminantes y efluentes.
- Hidrología y oceanografía: caudales en ríos estuarios, océanos.
- Meteorología: predicción del tiempo.
- Ingeniería biomédica: la sangre que fluye a través de arterias y venas.

### 3.2 Modelos de turbulencia

La turbulencia es una condición del flujo irregular, se refiere al movimiento de remolino, donde la vorticidad suele ser muy intensa, y da lugar a una mezcla de tensiones efectivas (consecuencia del impulso de “mezcla”). La turbulencia juega un papel fundamental en la difusión de sustancias solubles, sólidos en suspensión, transporte y mezcla de contaminantes y sedimentos (Wilcox, 2006b).

Los modelos de turbulencia son una simplificación matemática que permiten capturar los principales efectos de los vórtices que aparecen en los flujos reales con un rango muy amplio de escalas de longitud y tiempo, que interactúan en una dinámica muy compleja. Permite resolver numéricamente las ecuaciones de Navier Stokes creando una aproximación de los vórtices naturales de manera general. Los más usados en ingeniería para predecir flujos turbulentos son los basados en métodos estadísticos (Wilcox, 2006).

Un fluido presenta diferentes propiedades y características, que son importantes identificar para el posterior análisis de su comportamiento. Se entiende por flujo compresible el que puede comprimirse con la aplicación de una presión externa, como consecuencia de esta presión el volumen se reduce y la densidad cambia. Esta característica del flujo se mide con el número de Mach el cual es mayor que 0.3 para flujo compresible y para flujo incompresible es inferior a 0.3, este último es aquél que no se puede comprimir, reducir su volumen o cambiar su densidad con la aplicación de una presión sobre el fluido. Un flujo también puede ser estacionario si las líneas de corriente, sus propiedades y características permanecen inalteradas en el transcurso del tiempo, y no estacionario, si ocurre lo contrario. Un flujo puede ser rotacional o irrotacional si cualquier partícula posee o no velocidad angular neta respecto al punto en el que se encuentra. Cuando las características y propiedades del flujo son expresadas en función de una sola coordenada espacial y del tiempo, es decir, tomadas a lo largo de una

línea de corriente o conducto, y todas las magnitudes físicas tienen un valor constante en un instante dado se trata de un flujo unidimensional, caso contrario, se trataría de un flujo bidimensional. La viscosidad también es una característica importante del flujo, definida como la fricción entre las diferentes capas fluidas que se mueven con distintas velocidades, lo que conduce a la pérdida de energía mecánica (Wilcox, 2006b).

En flujos turbulentos se suele caracterizar según el número de Reynolds, que es una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, de esta manera se tiene dos características importantes (Wilcox, 2006):

- Flujo laminar: Se trata de un flujo constante, ordenado, suave, en el que las capas adyacentes de fluido se deslizan entre sí de manera ordenada sin entremezclarse, sus condiciones de contorno cambian con el tiempo y tiene valores por debajo del número de Reynolds crítico ( $Re_{crit}$ ).
- Flujo turbulento: Se trata de un flujo cuyas velocidades y todas las demás propiedades del flujo varían de forma aleatoria y caótica, sus valores del número de Reynolds están por encima del crítico ( $Re_{crit}$ ).

### 3.2.1 Modelos de turbulencia para Navier Stokes promediados por Reynolds (RANS)

Este modelo fue propuesto por Reynolds en 1895 y consiste en descomponer las variables de interés (velocidad, presión, etc.) en un valor medio y otro fluctuante. Su análisis se centra en el efecto de la turbulencia en las propiedades del flujo.

Antes de la aplicación de los métodos numéricos, las ecuaciones de Navier-Stokes se promediaban en el tiempo, posteriormente aparecen términos adicionales en las ecuaciones de flujo promediadas en el tiempo o promediadas por Reynolds debido a las interacciones entre varias fluctuaciones turbulentas (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Estos términos adicionales se modelan con modelos de turbulencia clásicos: entre los más conocidos se encuentran el modelo  $k-\epsilon$  y el modelo de tensiones de Reynolds. Los recursos informáticos requeridos para cálculos de flujo razonablemente precisos son modestos, por lo que este enfoque ha sido el pilar de los cálculos de flujo de ingeniería durante las últimas tres décadas (Versteeg & Malalasekera, 2007).

### 3.2.2 Simulación de remolinos grandes (LES)

Este modelo permite el cálculo de turbulencia que rastrea el comportamiento de los remolinos más grandes. El método implica el filtrado espacial de las ecuaciones inestables de Navier-Stokes antes de los cálculos, lo que pasa por los remolinos más grandes y rechaza los remolinos más pequeños. Los efectos sobre el flujo resuelto debido a los remolinos más pequeños no resueltos se incluyen por medio del llamado modelo a escala de subcuadrícula. Las ecuaciones de flujo no estacionario deben resolverse, por lo que las demandas de recursos informáticos en términos de almacenamiento y volumen de cálculos son grandes, pero esta técnica está comenzando a abordar problemas de CFD con geometría compleja (Versteeg & Malalasekera, 2007).

A pesar de los esfuerzos de un siglo para desarrollar modelos de turbulencia RANS, hasta ahora ha resultado ser difícil encontrar un modelo de propósito general adecuado para una amplia gama de aplicaciones prácticas. Esto se debe en gran medida a las diferencias en el comportamiento de los remolinos grandes y pequeños. Los remolinos más pequeños son casi isotrópicos y tienen un comportamiento universal (al menos para flujos turbulentos con números de Reynolds suficientemente altos). Por otro lado, los remolinos más grandes, que interactúan y extraen energía del flujo medio, son más anisotrópicos y su comportamiento está dictado por la geometría del dominio del problema, las condiciones de contorno y las fuerzas del cuerpo. Cuando se utilizan las ecuaciones promediadas de Reynolds, el comportamiento colectivo de todos los remolinos debe describirse mediante un solo modelo de turbulencia, pero la dependencia del problema de los remolinos más grandes complica la búsqueda de modelos ampliamente aplicables. Un enfoque diferente para el cálculo de flujos turbulentos acepta que los remolinos más grandes deben calcularse para cada problema con una simulación dependiente del tiempo. El comportamiento universal de los remolinos más pequeños, por otro lado, debería ser más fácil de capturar con un modelo compacto. Esta es la esencia del enfoque de simulación de grandes remolinos (LES) para el tratamiento numérico de la turbulencia (Versteeg & Malalasekera, 2007).

### 3.2.3 Direct Numerical Simulation (DNS)

Este modelo calcula el flujo medio y todas las fluctuaciones de velocidad turbulenta. Las ecuaciones inestables de Navier-Stokes se resuelven en cuadrículas espaciales suficientes que pueden resolver las escalas de longitud de Kolmogorov en las que tiene lugar la disipación de energía y con pasos de tiempo lo suficientemente pequeños como para resolver el período de las fluctuaciones más rápidas. Estos cálculos son muy costosos en términos de recursos informáticos, por lo que el método no se utiliza para cálculos de flujo industrial (Versteeg & Malalasekera, 2007).

### 3.2.4 Ecuaciones de Navier Stokes promediados por Reynolds para flujos compresibles

Son ecuaciones para fluidos Newtonianos compresibles (Gonzales Naquiche, 2020):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho u_i u_i) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_{ij}} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i H) = \frac{\partial \rho}{\partial x_j} (u_j \tau_{ij}) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_{ij}} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.12)$$

$\mu_i$ : Representa la componente de la velocidad en la dirección  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

Se ha renombrado las componentes de la velocidad ( $u, v, w$ ) por  $(u_1, u_2, u_3)$ .

Los elementos del tensor de esfuerzos viscosos  $\tau_{ij}$  se define como:

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} + \lambda \frac{\partial \mu_k}{\partial x_k} \delta_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(\frac{2\mu}{3}\right) \frac{\partial \mu_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (3.13)$$

El término de la divergencia de la velocidad  $\frac{\partial \mu_k}{\partial x_k}$  desaparece para el caso de flujos incompresibles.

Las componentes del tensor de deformación están dadas por:

$$\delta_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.14)$$

El tensor de rotación se determina como:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.15)$$

A partir de estas expresiones, se obtiene la energía total E y la entalpía total H:

$$E = e + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (3.16)$$

$$H = H + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (3.17)$$

### 3.2.5 Ecuaciones de Navier Stokes promediados por Reynolds para flujos incompresibles (RANS)

Son ecuaciones para la modelación de la turbulencia, promedia en función del tiempo las ecuaciones de continuidad y momento de Navier Stokes para evitar las fluctuaciones turbulentas de un flujo incompresible en función de las velocidades medias, presiones medias, esfuerzos medios, etc.

Las componentes de la velocidad y presión para un movimiento turbulento estacionario según el sistema de referencia cartesiano xyz son  $u, v, w$  y  $p$ , respectivamente, se expresan como la suma de un valor medio y sus correspondientes fluctuantes en el tiempo (Noblecilla Palomino, 2019):

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.18)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (3.19)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (3.20)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (3.21)$$

Donde:

$\bar{u}$ : Velocidad media en dirección x (m/s)

$\bar{v}$ : Velocidad media en dirección y (m/s)



$\bar{w}$ : Velocidad media en dirección  $z$  (m/s)

$\bar{p}$ : Presión media (N/m<sup>2</sup>)

$u'$ : Velocidad de fluctuación en dirección  $x$  (m/s)

$v'$ : Velocidad de fluctuación en dirección  $y$  (m/s)

$w'$ : Velocidad de fluctuación en dirección  $z$  (m/s)

$p'$ : Presión de fluctuación (N/m<sup>2</sup>)

- Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.22)$$

- Ecuación de cantidad de movimiento (momentum):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{u})}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{w}\bar{u})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\bar{p})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) - \left( \frac{\partial (\bar{u}'u')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}'u')}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{w}'u')}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{w}\bar{v})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\bar{p})}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) - \left( \frac{\partial (\bar{u}'v')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}'v')}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{w}'v')}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{w})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{w})}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{w}\bar{w})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (\bar{p})}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) - \left( \frac{\partial (\bar{u}'w')}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}'w')}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{w}'w')}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.25)$$

### 3.2.6 Modelo de turbulencia RANS

#### 3.2.6.1 Algebraic Stress Model (ASM)

Este modelo representa el primer intento de encontrar una forma económica de contabilizar la anisotropía de las tensiones de Reynolds sin llegar a la solución completa de sus ecuaciones de transporte (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Se lograron predicciones realistas de las distorsiones del flujo primario y del flujo secundario en conductos cuadrados y rectangulares. Este último es causado por la anisotropía de las tensiones normales de Reynolds y, por lo tanto, no se puede representar mediante simulaciones de la misma situación con el modelo  $k-\epsilon$  estándar (Versteeg & Malalasekera, 2007).



**a) Ventajas (Versteeg & Malalasekera, 2007):**

- Es económico para tener en cuenta la anisotropía de tensión de Reynolds.
- Hace posible la modelación de los efectos de flotabilidad y rotación junto al modelo  $k-\epsilon$ .
- Se aplica con éxito a capas delgadas de corte isotérmicas y flotantes.
- Funciona bien si los términos de convección y difusión son insignificantes.

**b) Desventajas (Versteeg & Malalasekera, 2007):**

- Más caro que el modelo  $k-\epsilon$ .
- No es tan ampliamente validado como los modelos de longitud de mezcla y  $k-\epsilon$ .
- Está restringido en flujos donde no se aplican los supuestos de transporte para los efectos de convección y difusión.

**3.2.6.2 Reynolds Stress Model (RMS)**

Este modelo ofrece las formulaciones RANS, deja a un lado la viscosidad turbulenta isotrópica y cierra las ecuaciones promediadas de Navier Stokes por medio de los esfuerzos de Reynolds, además de una ecuación para la tasa de disipación. Establece que puede ejecutar de manera más rigurosa las simulaciones de flujo curvos, rotación y la tasa de deformación, por lo que es recomendable para la simulación de fluidos complejos.

Este modelo se limita a flujos circulares, fluidos altamente oscilantes, flujos en cámaras de combustión y esfuerzos inducidos en ductos, debido al gasto en la capacidad computacional en la modelación de disipación de calor y de los altos gradientes de presión. (ANSYS Inc., 2013)

Este modelo presenta las siguientes ventajas y desventajas: (Versteeg & Malalasekera, 2007)

**a) Ventajas:**

- Es el más general de todos los modelos de turbulencia clásicos.
- Solo necesita las condiciones iniciales y/o de contorno.
- Proporciona un cálculo muy preciso de las propiedades de flujo medio y todas las tensiones de Reynolds para muchos flujos simples y más complejos, incluidos chorros de pared, canales asimétricos y flujos de conductos no circulares y flujos curvos.

**b) Desventajas:**

- Costos informáticos muy elevados.
- No es tan ampliamente validado como los modelos de longitud de mezcla y  $k-\epsilon$ .
- Funciona tan mal como el modelo  $k-\epsilon$  en algunos flujos (por ejemplo, chorros axisimétricos y flujos recirculantes no confinados).

**3.2.7 Modelo de turbulencia  $k-\epsilon$** 

Es un modelo utilizado para predecir la energía cinética turbulenta presente en el sistema, garantizando su aportación a los campos de velocidad que representan el comportamiento del flujo. Consta de las siguientes ecuaciones:

$$[k] \dots \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_T \partial k}{\sigma_k \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_T \partial k}{\sigma_k \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_T \partial k}{\sigma_k \partial z} \right) + (P - D) \quad (3.27)$$

$$[\varepsilon] \dots \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{K} (C_1 P - C_2 D) \quad (3.28)$$

$$P \dots 2\mu_T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu_T \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho \mu_T k \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3.29)$$

Donde:

D:  $\rho$

$k$ :  $\frac{1}{2} u''_i u''_i$ , con  $i = 1, 2, 3$ , Energía cinética turbulenta

$\varepsilon$ :  $\mu_T \left( \frac{\partial u'_1}{\partial y_j} \right) \left( \frac{\partial u'_1}{\partial y_j} \right)$ , con  $i, j = 1, 2, 3$ ; Tasa de disipación de la energía cinética.

$\mu_T$ :  $C_u \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ , Viscosidad turbulenta

$C_u, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ : Constantes del modelo Launder and Saplding (adimensionales).

El valor de las constantes ha sido obtenido por numerosas iteraciones de ajuste de datos para una amplia gama de flujos turbulentos y son las siguientes (Mora, 2017):

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

$P$  y  $D$ : Son términos de producción y destrucción

$\sigma$  y  $C$ : Son constantes ajustables

Este es uno de los modelos de turbulencia que presenta el programa ANSYS CFX (ver figura 70), por lo que las simulaciones numéricas de esta investigación se realizaron seleccionando este modelo.

### 3.3 Modelo numérico computacional ANSYS CFX

#### 3.3.1 ANSYS CFX

Es una herramienta de análisis y simulación CFD que permite la simulación de distintas especialidades de la Ingeniería, como la hidráulica, para modelar el comportamiento de un fluido. Cuenta con la interfaz Ansys Workbench en la que se puede crear la geometría y definir el tipo del mallado de la estructura que se quiere analizar antes de la configuración CFX. Este programa utiliza el método de volúmenes finitos (MVF) para la simulación numérica.

ANSYS es un software que permite desarrollar y adquirir códigos numéricos, de tal forma que hoy en día cuenta con la capacidad de realizar simulaciones numéricas de fluidos

estructurales, electromagnéticas, térmicas, químicas, etc. Herramienta usada para la modelación numérica de fluidos, permite dar solución a diversos fenómenos naturales, entre ellos el flujo a superficie libre, advección agua-aire, flujo en tuberías, flujos multifásicos, transferencias de calor, etc. (Noblecilla Palomino, 2019).

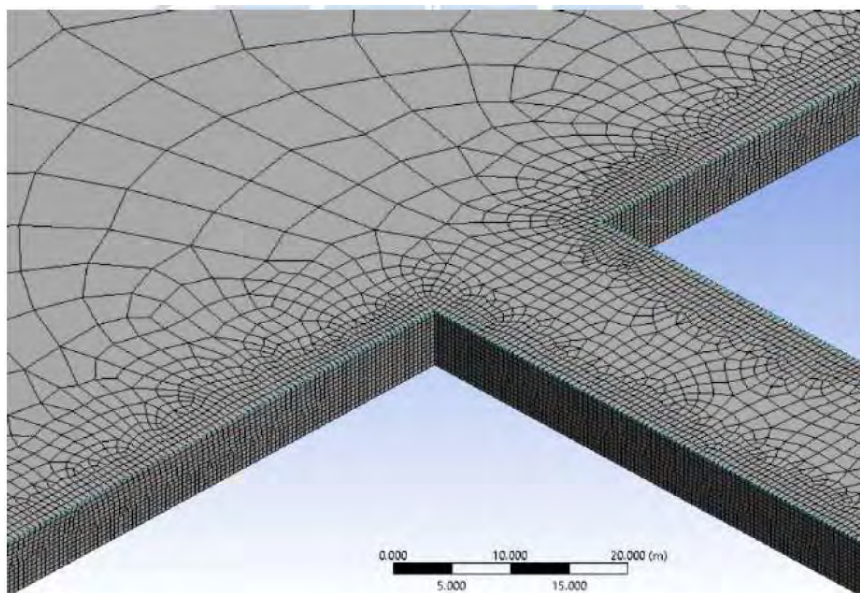
### 3.3.2 Aplicaciones

Algunos ejemplos de su aplicación son los siguientes:

Noblecilla, L. (2019) realizó la modelación numérica con este software para determinar la orientación de una bifurcación en un tramo del Río Piura.

**Figura 26**

*Mallado de la bifurcación del tramo B del Río Piura.*

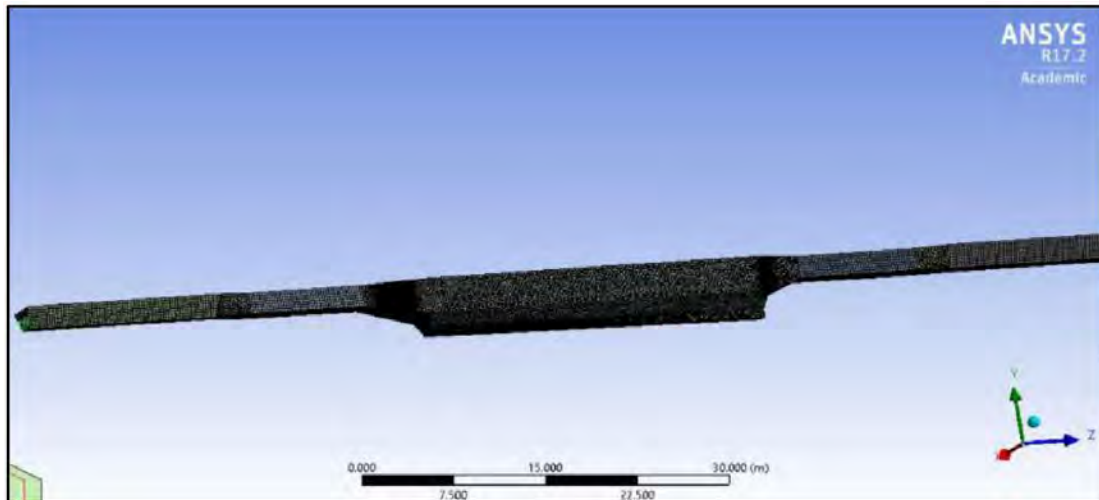


*Nota.* Adaptado de (Noblecilla Palomino, 2019)

Gonzales, S. (2020) utilizó esta herramienta para verificar el comportamiento hidráulico del Desarenador de la Central Hidroeléctrica Quiroz.

**Figura 27**

*Malla estructurada del desarenador Quiroz.*

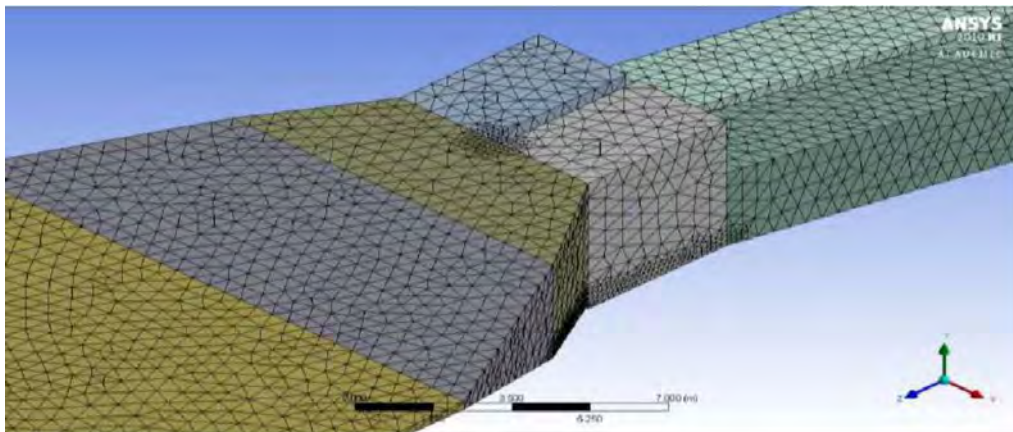


*Nota.* Adaptado de (Gonzales Naquiche, 2020)

Montalvan, X. (2021) realizó la simulación numérica del flujo y comportamiento del Sifón Piura utilizando Ansys.

**Figura 28**

*Mallado del sifón Piura.*



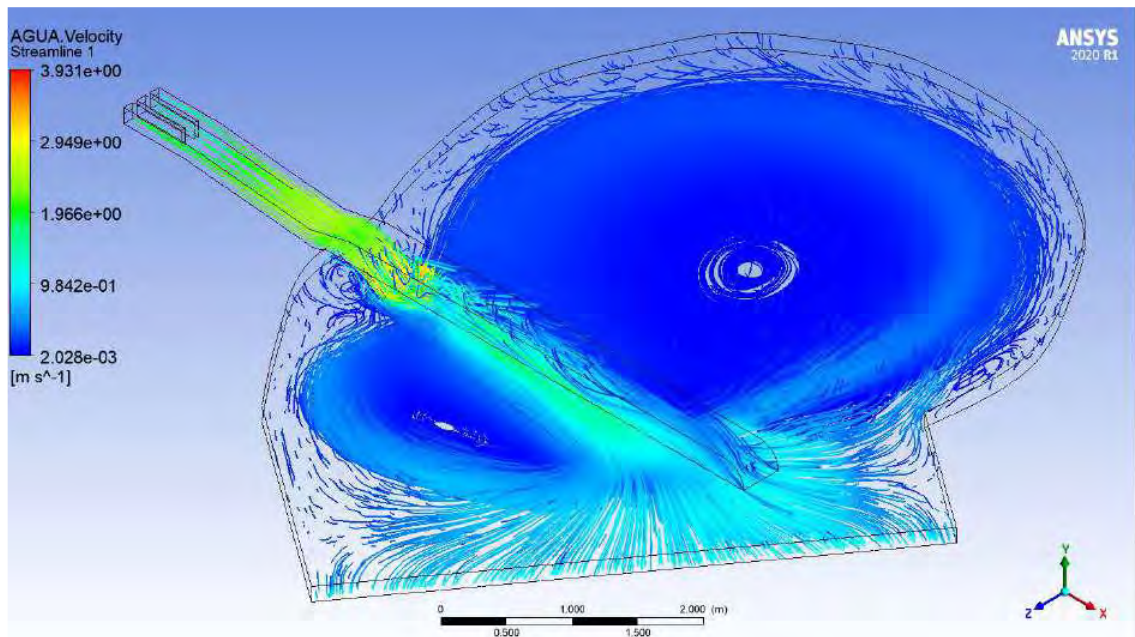
*Nota.* Adaptado de (Montalvan Portero, 2021)



Mendoza, B. (2022) realizó la simulación del aliviadero de compuertas, el salto de esquí y la poza de disipación del Reservorio Poechos con el objetivo de reproducir los fenómenos que ocurren en la poza de disipación y obtener información relevante sobre la erosión en las proximidades de los cimientos de la presa.

**Figura 29**

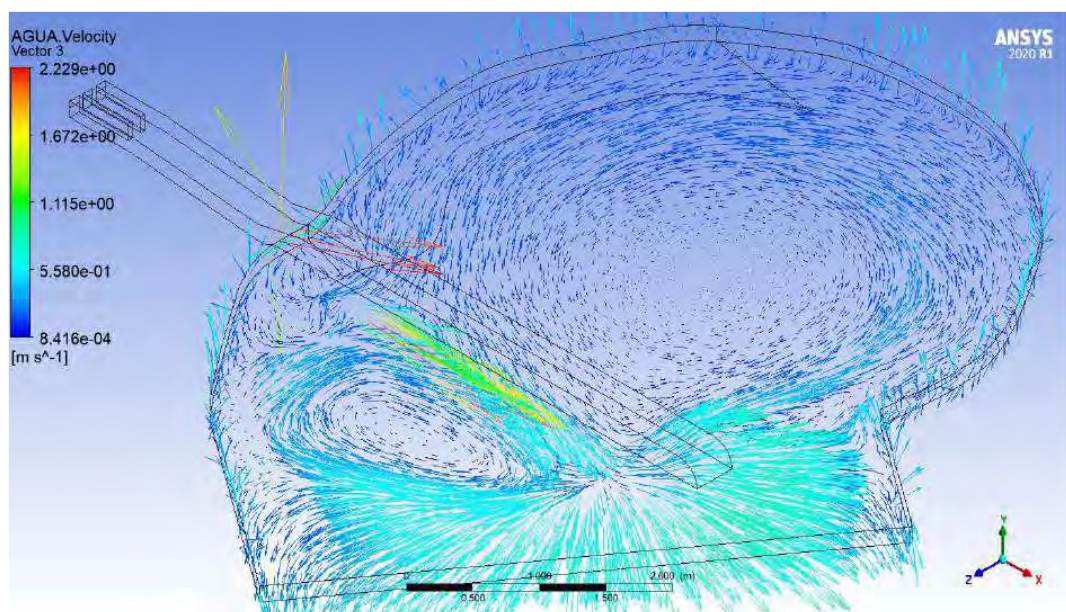
*Líneas de corriente de velocidad en la poza de disipación.*



*Nota.* Adaptado de (Mendoza, 2022)

**Figura 30**

*Vectores de velocidad en la poza de disipación.*



*Nota.* Adaptado de (Mendoza, 2022)

### 3.3.3 Proceso de modelamiento en ANSYS CFX

En esta investigación para realizar la modelación numérica se utilizó el software ANSYS CFX, para simular el comportamiento del flujo de los modelos físico original y final a escala del desarenador de Majes. El proceso de modelamiento se realizó siguiendo tres etapas, que se describen a continuación:

**Figura 31**

*Etapas de procesamiento en ANSYS CFX.*



*Nota.* Adaptado de (Reyes Salazar, 2019a)

#### 3.3.3.1 Pre – procesamiento

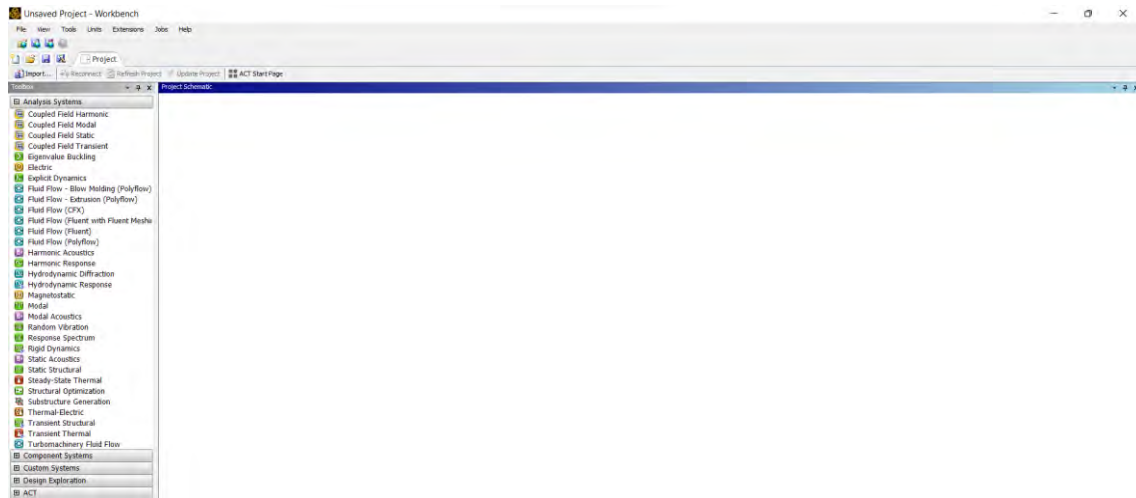
##### a) Crear la geometría

La creación de la geometría se realiza mediante la herramienta Workbench, que es parte del programa ANSYS CFX, representa la pantalla de inicio al abrir el programa.

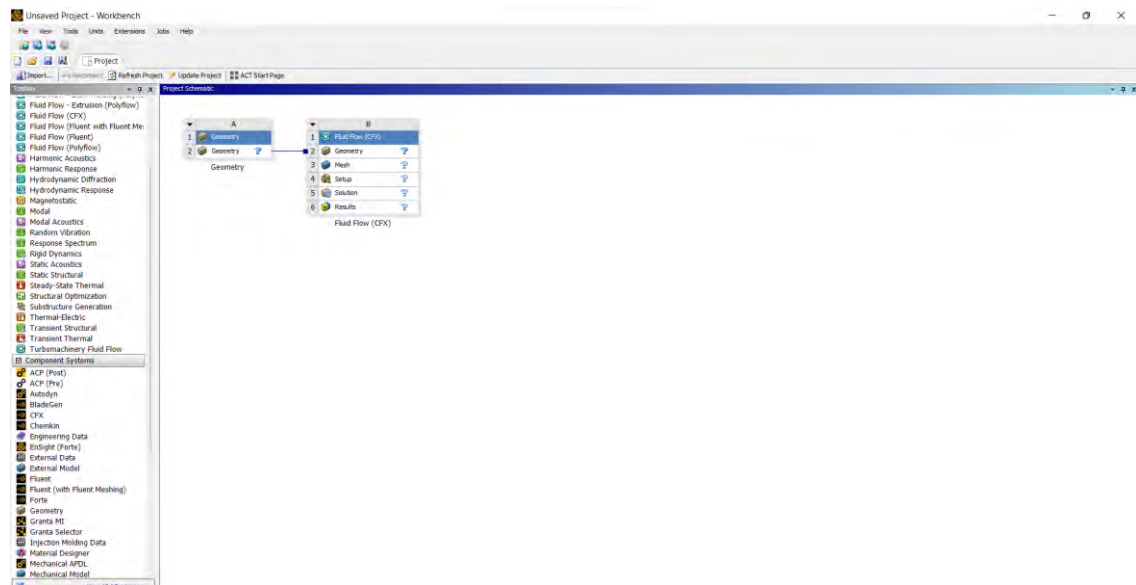
En Workbench, se tiene la barra de herramientas *Tolbox*, *Component Systems* es una de las herramientas que se muestran y en la que se tiene la opción *Geometry*, la cual se arrastra al escritorio *Project Schematic*, haciendo clic se pueden identificar las opciones de diseño: *Design Modeler* y *Space Claim*, en esta investigación se usará la primera opción para definir el dominio de la geometría. En *Tolbox* se tiene también la herramienta *Analysis System*, que cuenta con la opción *Fluid Flow (CFX)*, esta se arrastra al escritorio *Project Schematic*. Una vez definida la geometría en *Design Modeler* se enlaza a *Fluid Flow (CFX)* para realizar la posterior configuración de la modelación numérica.



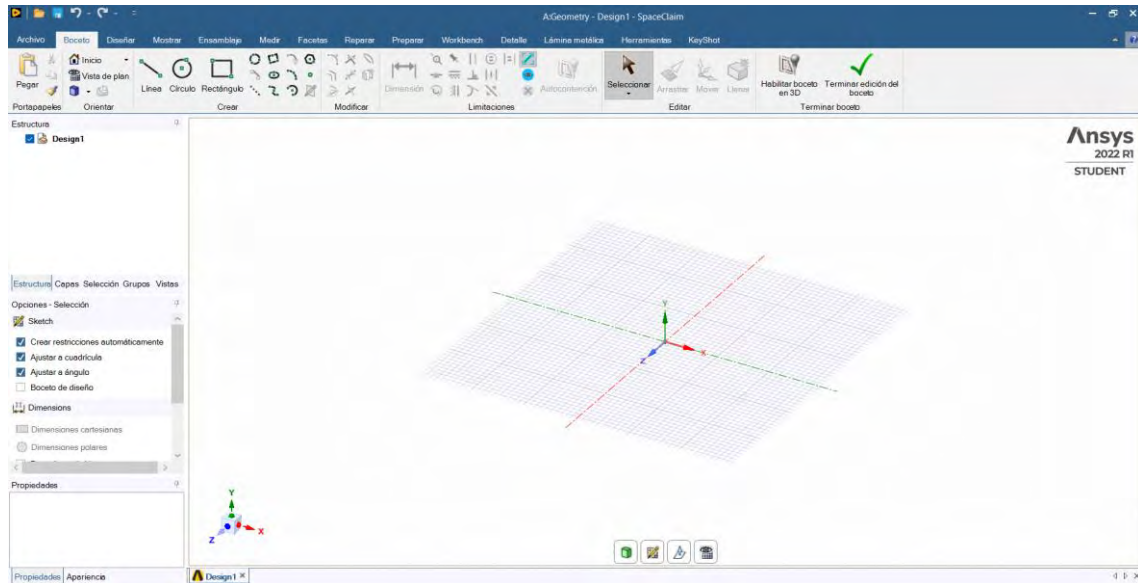
**Figura 32**  
*Interfaz Workbench.*



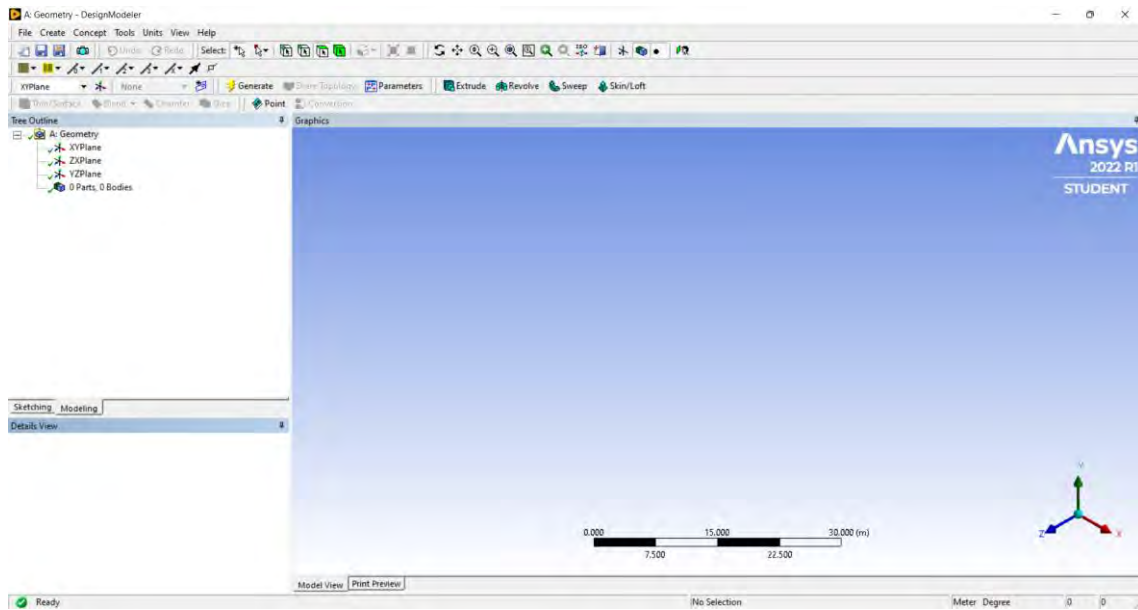
**Figura 33**  
*Herramientas Geometry y Fluid Flow (CFX).*



**Figura 34**  
*Interfaz Space Claim.*



**Figura 35**  
*Interfaz Desing Modeler.*

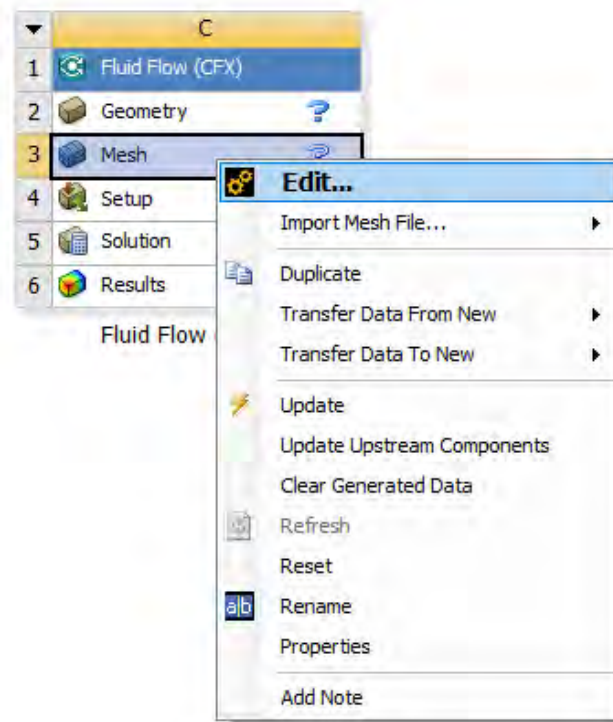


## b) Generar la malla

El mallado es la representación discreta de la geometría en celdas, caras o nodos en los que se determinan las variables de flujo mediante el método de volúmenes finitos.

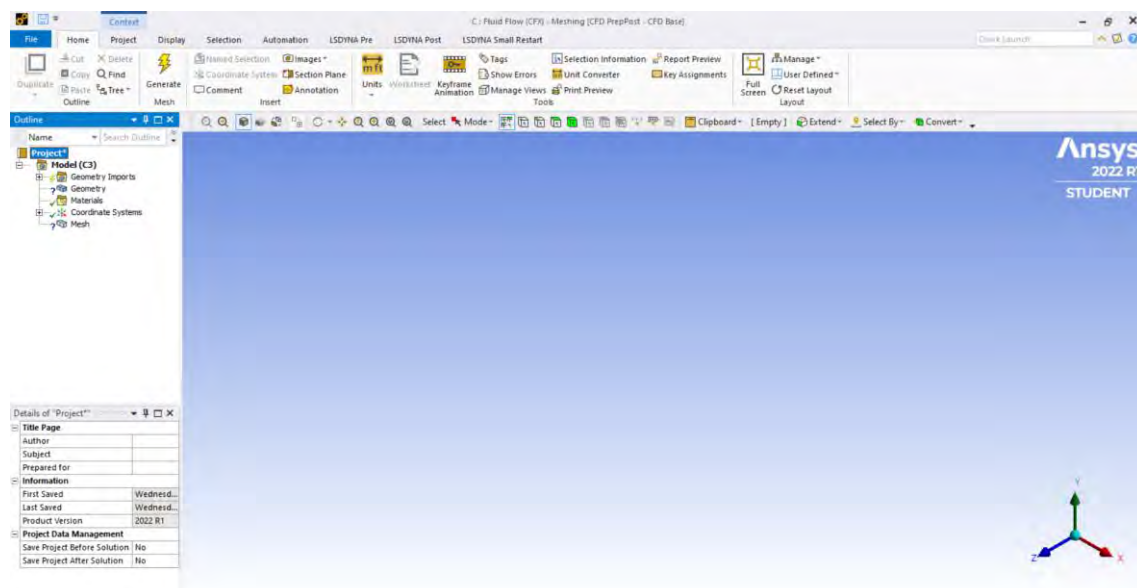
**Figura 36**

*Opciones de la herramienta Mesh.*



**Figura 37**

*Interfaz Meshing.*



### Clasificación:

- ✓ Malla estructurada:
  - Son mallas regulares.
  - Se usa en elementos cuadriláteros (2D) y hexaedros (3D).
  - Presenta una conexión regular
  - Presenta una convergencia más accesible y una resolución muy buena de los resultados.
  - No se adecúa a geometrías complejas
- ✓ Malla no estructurada:
  - Son mallas para elementos triángulos (2D) y tetraedros (3D).
  - Presenta una conexión irregular.
  - Presenta celdas organizadas de manera arbitraria.
  - Presenta curvaturas a detalle, se aprecia la forma del trazado.
  - Permite analizar los fluidos sin problemas y reduce el tiempo de mallado porque describe fácilmente las geometrías complejas.
- ✓ Malla híbrida:
  - Es la combinación eficiente de las dos mallas antes descritas. La estructurada para las partes simples y la no estructurada para las partes complejas.
  - Utilizado mayormente en geometrías complejas

### Tipos de celdas:

- ✓ Para geometrías en 2D: Triangular y cuadrilátera.
- ✓ Para geometrías en 3D: Tetraedros, hexaedros, pirámides y prismas.

### Factores de calidad del mallado:

- ✓ Precisión de la solución: Está en función de la calidad de la malla, por lo que es necesario refinar determinadas áreas de la geometría.
- ✓ Tiempo de cálculo: Si se tiene una malla muy refinada el tiempo de cálculo será alto, e indica que la solución será de buena precisión, pero si se tiene una precisión y tasa de convergencia dada, un mayor tiempo de cálculo indica una calidad de la malla inferior.
- ✓ Tasa de convergencia: Una mejor tasa de convergencia indica una mejor calidad de la malla, y que la solución se ha alcanzado más rápido.
- ✓ Parámetros de calidad:
  - Element Quatility: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 indica alta calidad.
  - Aspect Ratio: Debe ser menor a 5.
  - Orthogonal Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 alta calidad porque indica que los ángulos de las celdas tienden a 90°.
  - Skewness: Oscila entre 0 y 1, 0 indica alta calidad y 1 indica baja calidad.

**Tabla 6***Rangos de oblicuidad (Skewness).*

Valor	Calidad de celda
1	Degenerada
0.90 – 1	Mala
0.75 – 0.90	Pobre
0.50 – 0.75	Justa
0.25 – 0.50	Buena
> 0 – 0.25	Excelente
0	Equilátero (Perfecto)

Nota. Adaptado de (Reyes Salazar, 2019b)

**c) Configuración de la modelación:**

- Determinar el tipo de análisis (estacionario o transitorio).
- Ingresar las condiciones iniciales de la modelación.
- Definir las propiedades para la interacción de los fluidos a simular.
- Definir las condiciones de borde que se aplican al dominio físico.
- Definir el modelo de turbulencia.
- Definir la resolución numérica.
- Definir el tiempo de simulación.
- Configurar el control de *Solver*.

**3.3.3.2 Procesamiento**

- En esta etapa se ejecuta la simulación y se resuelven las ecuaciones que describen el fenómeno natural por medio de iteraciones, utilizando la configuración definida en la etapa del Pre – Procesamiento.
- Se puede visualizar el avance de la solución mediante gráficos y tablas que se muestran de manera automática, en los que se presentan los criterios de convergencia: Valores residuales promedio RMS o Valores residuales máximos MAX, resultados de las ecuaciones.
- La solución se lleva a cabo gracias al criterio de convergencia, la duración depende del modelo a resolver, del tamaño del mallado y de la capacidad de los ordenadores.
- La finalización revisa la evolución de 3 parámetros fundamentales: los residuales, los imbalances y los puntos de monitoreo (Noblecilla Palomino, 2019):
  - o Los residuales son propios de la simulación y siempre van a existir, se originan al restar los valores de las variables determinadas en el tiempo anterior con sus



valores en el tiempo presente. Como cada variable tiene un residuo distinto, se estudia el residuo máximo normalizado o el residuo promediado en toda la simulación. La finalización de la simulación puede ser de dos tipos, mediante los residuos que está basada en el residuo máximo (MAX) y la finalización basada en el residuo promedio de todos los volúmenes de control (RMS: Root Mean Square). Para una simulación estacionaria, el residuo MAX debe ser al menos 0.001 y el RMS de todas las variables debe ser al menos 0.0001.

- Los imbalances evalúan la conservación de masa, momentum y energía a lo largo de todo el dominio de simulación. En un paso temporal se considera que la simulación es estacionaria por lo que el imbalance resulta de restar el flujo de entrada con el flujo de salida de la variable y dividirla entre el flujo máximo. En una simulación con convergencia ideal, se tiene que el flujo de entrada es igual que el flujo de salida por lo que el imbalance ideal sería el 0%. Entonces, un criterio de finalización para los imbalances de las variables de flujo es que se encuentren por debajo del 1%.
- Para los puntos de monitoreo se evalúa una variable de interés para el usuario, puede ser la fuerza de arrastre sobre un cuerpo o la presión estática en un punto, con el objetivo de reconocer una variable de interés para la simulación y monitorear su evolución en el tiempo. Si la variable de interés ha alcanzado un valor estable en el tiempo, puede concluirse que la simulación ha finalizado. A este criterio de convergencia se le considera el más importante, ya que puede encontrarse casos donde los residuos RMS no disminuyen, pero las variables de interés ya alcanzaron una condición estable.

### **3.3.3.3 Post – procesamiento**

- En esta etapa se visualizan los resultados de la simulación, para su posterior discusión, análisis, calibración y validación del modelo.
- A medida que los imbalances tiendan a cero menores errores se presentarán en la solución de las ecuaciones.
- La visualización de los resultados incluye los contornos de la superficie, los vectores de velocidad, gráficos vectoriales de dirección y magnitud del flujo, e incluso animaciones.

## Capítulo 4

### Simulación numérica del modelo físico original a escala del desarenador de Majes

En este capítulo se va a desarrollar la simulación numérica del modelo físico original a escala del desarenador de Majes mediante ANSYS CFX, teniendo como objetivos:

- Comparar el comportamiento hidráulico del modelo original a escala del Desarenador de Majes del modelo físico realizado a escala en el campus de la Universidad de Piura y numérico realizado mediante ANSYS CFX.
- Verificar que el comportamiento hidráulico del modelo original a escala del desarenador de Majes del modelo físico realizado a escala en el campus de la Universidad de Piura es igual o parecido al comportamiento que se registrará en los resultados de la modelación numérica en ANSYS CFX.

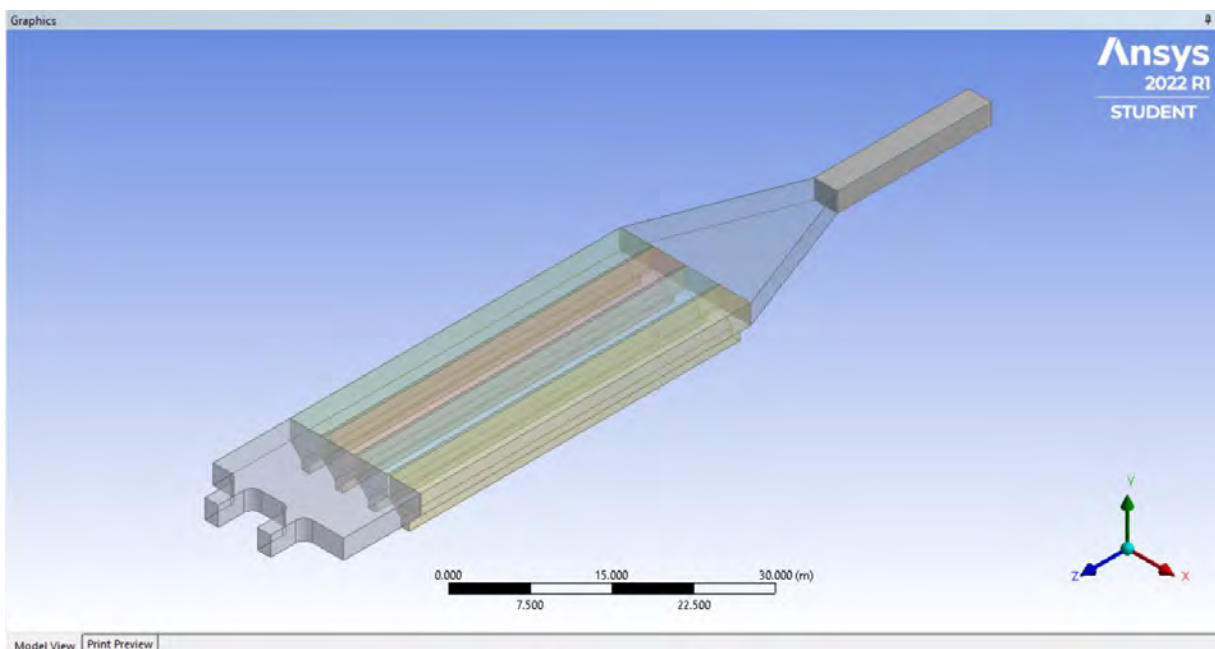
#### 4.1 Etapa 1: Pre-procesamiento

##### 4.1.1 Geometría

- Diseño de la geometría del modelo original a escala del desarenador de Majes.

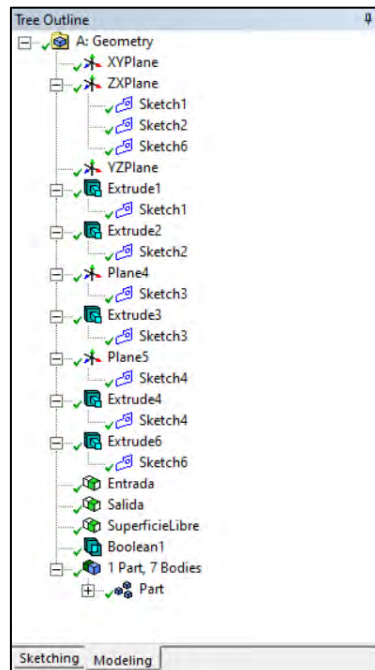
#### Figura 38

*Interfaz Desing Modeler. Geometría del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*



**Figura 39**

*Interfaz Desing Modeler. Detalle del diseño de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes.*

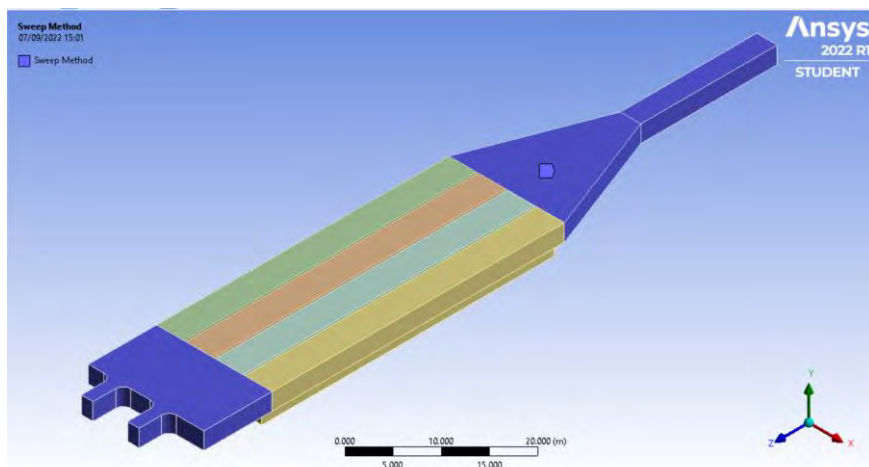


#### 4.1.2 Mallado

Se utilizó un tipo de mallado híbrido, aplicando *Sweep Method* en tres partes del desarenador, en la entrada, en la transición de entrada y en la salida del desarenador. Para las naves del desarenador se usó los métodos MultiZone, Hex Dominant, Automatic y Tetrahedrons (Patch Conforming) y se analizó los parámetros de calidad de cada uno para determinar cuál es el que mejor se adecuaba a la geometría. Para el modelo físico original se presenta el detalle de los dos primeros métodos.

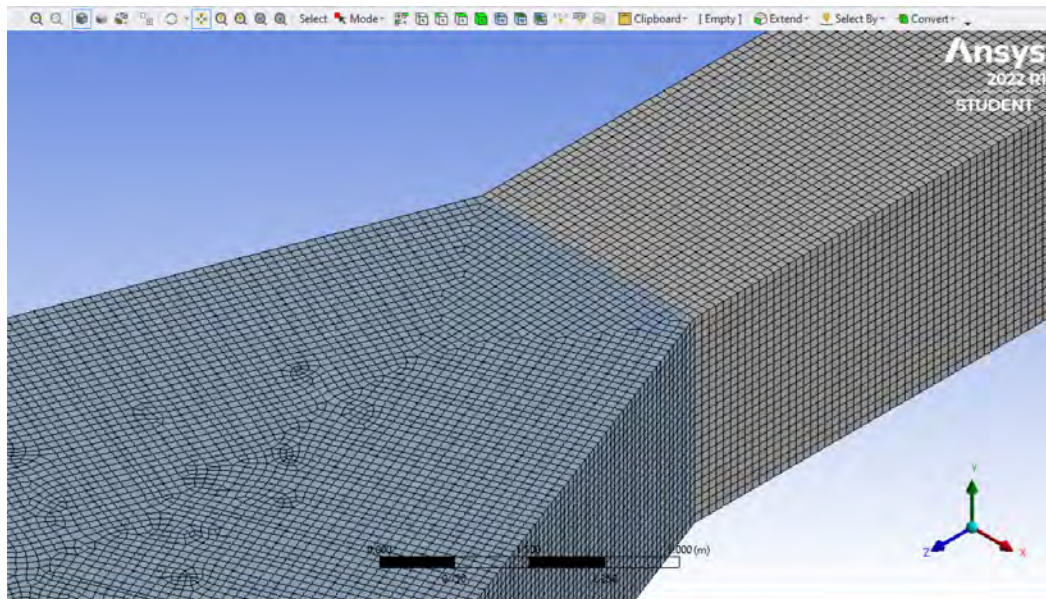
**Figura 40**

*Interfaz Mesh. Aplicación de Sweep Method en la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes.*



**Figura 41**

*Interfaz Mesh. Sweep Method de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes.*



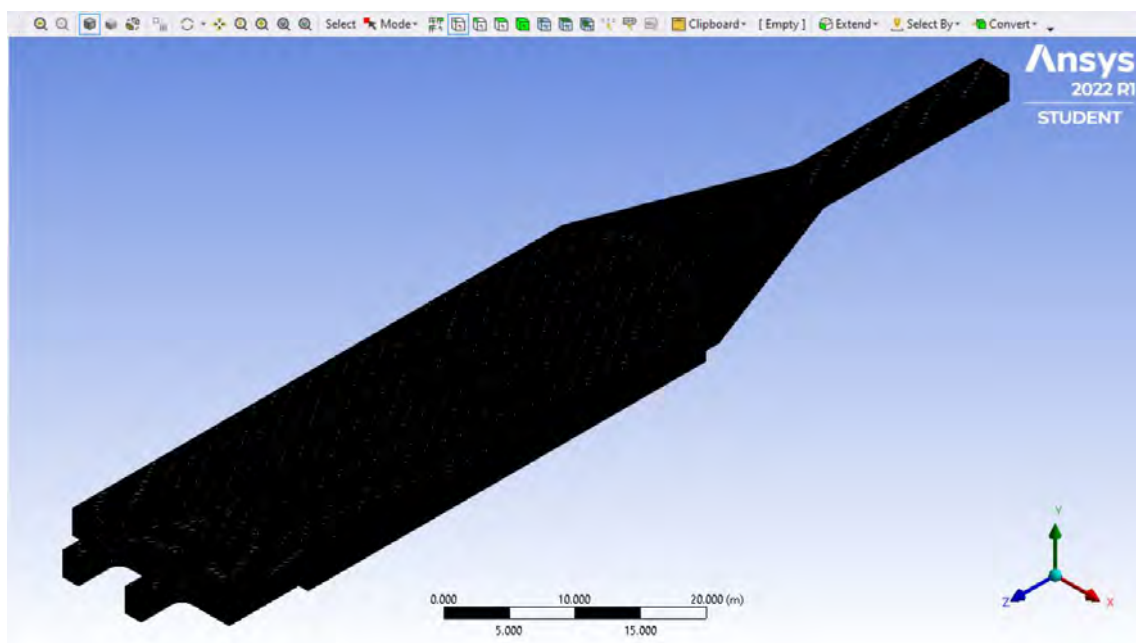
#### 4.1.2.1 Tipos de Mallado

##### a) MultiZone:

Primero se elige la malla MultiZone, debido al refinamiento del Sizing no se puede apreciar en la imagen, por lo que también se mostrará una parte de la geometría para su mejor visualización.

**Figura 42**

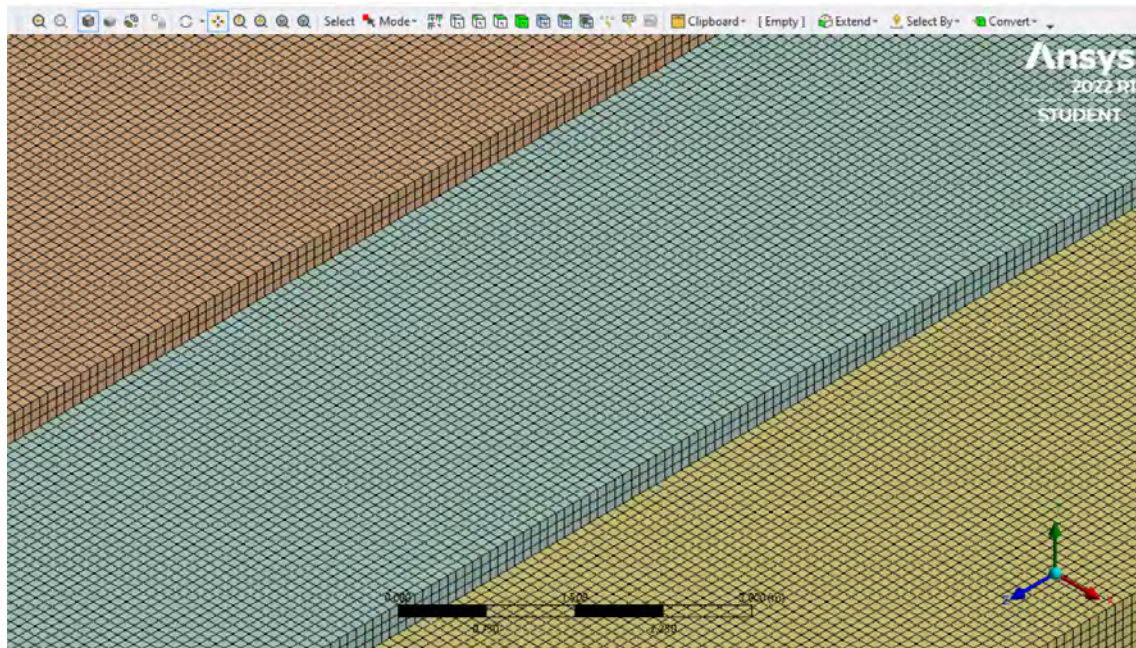
*Malla MultiZone de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes.*



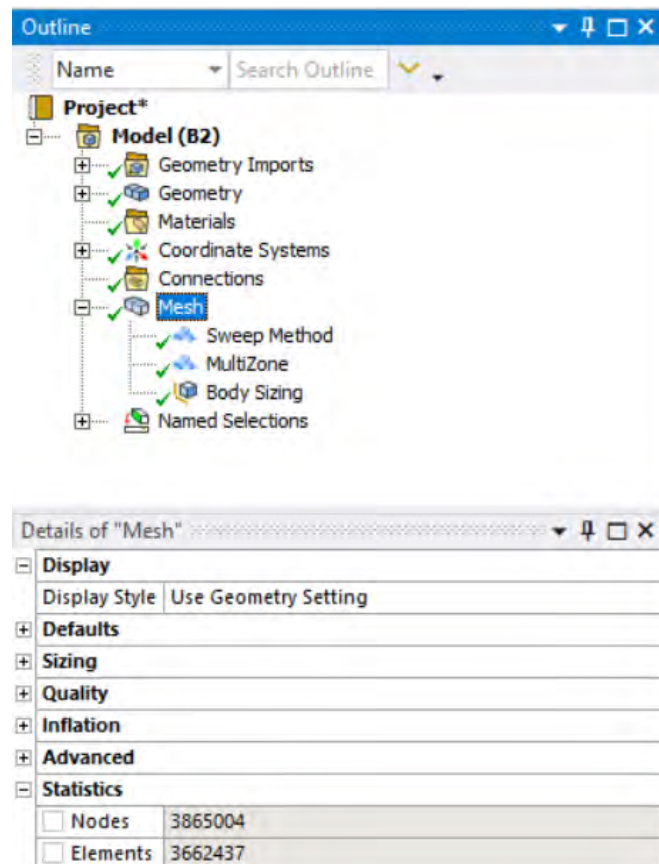


**Figura 43**

*Malla MultiZone de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. Detalle del mallado en las naves del desarenador.*

**Figura 44**

*Número de nodos y elementos de la malla MultiZone.*



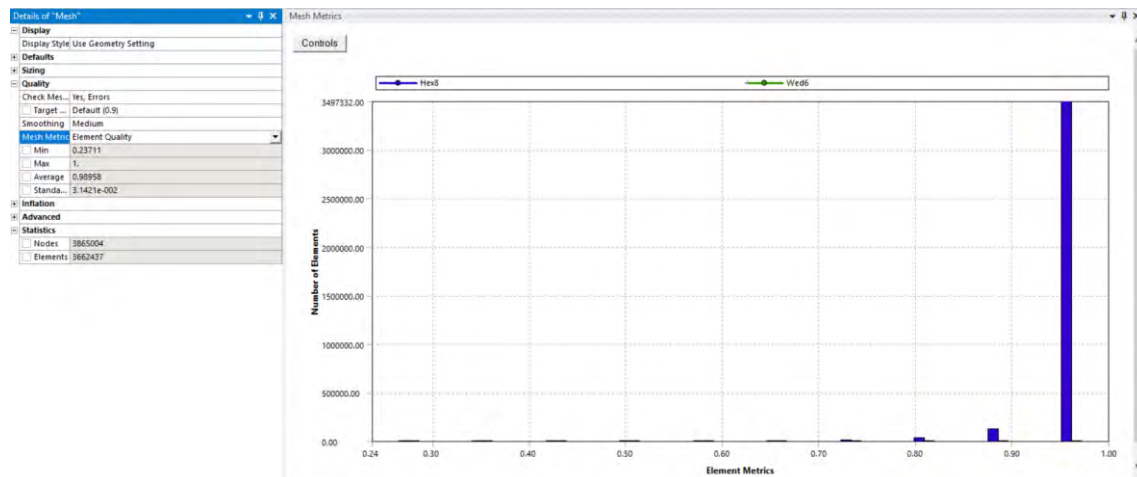


Parámetros de calidad:

- ✓ Element Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 indica alta calidad. Se tiene un valor promedio de 0.98958 (ver figura 45).

**Figura 45**

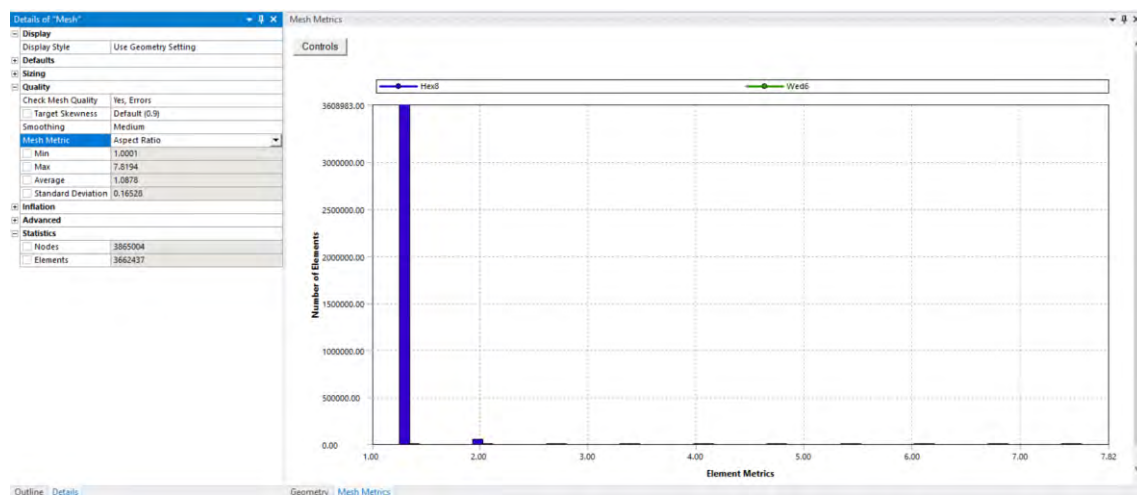
*Parámetro de calidad Element Quality de la malla MultiZone.*



- ✓ Aspect Ratio: Debe ser menor a 5. Se tiene un valor promedio de 1.0878 (ver figura 46).

**Figura 46**

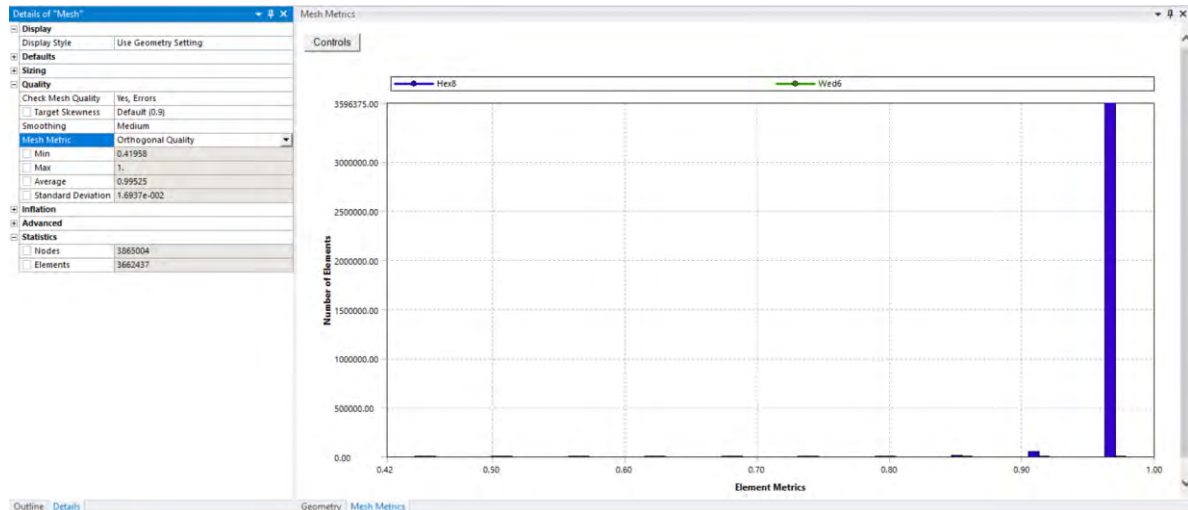
*Parámetro de calidad Aspect Ratio de la malla MultiZone.*



- ✓ Orthogonal Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 alta calidad porque indica que los ángulos de las celdas tienden a  $90^\circ$ . Se tiene un valor promedio de 0.99525 (ver figura 47).

**Figura 47**

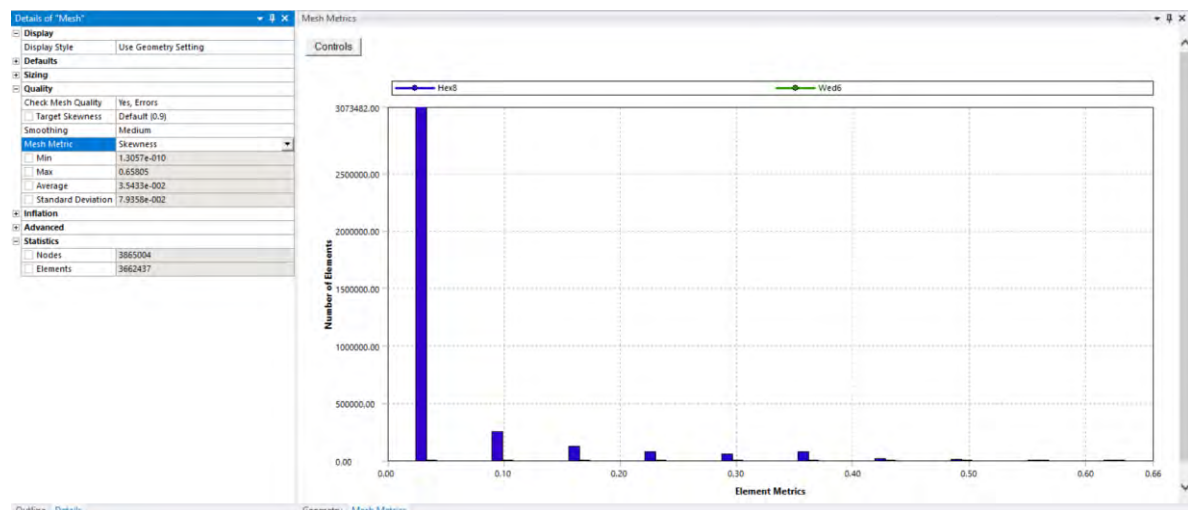
*Parámetro de calidad Orthogonal Quality de la malla MultiZone.*



- ✓ Skewness: Oscila entre 0 y 1, 0 indica alta calidad y 1 indica baja calidad. Se tiene un valor promedio de 3.5433e-002 (ver figura 48).

**Figura 48**

*Parámetro de calidad Skewness de la malla MultiZone.*

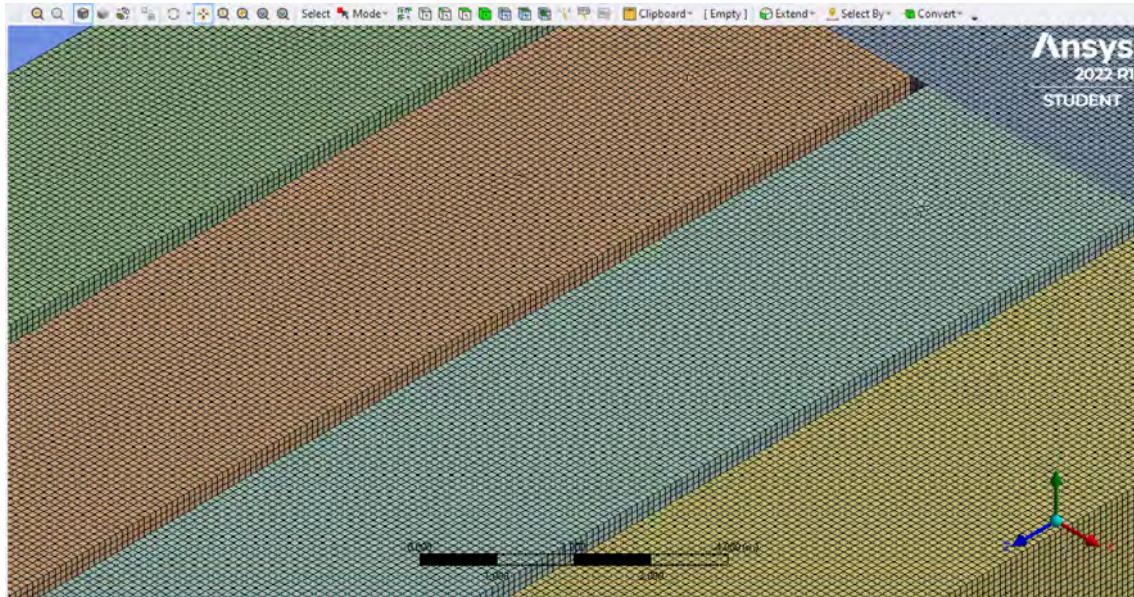


### b) Hex Dominant:

Como segunda opción se tiene el mallado Hex Dominant.

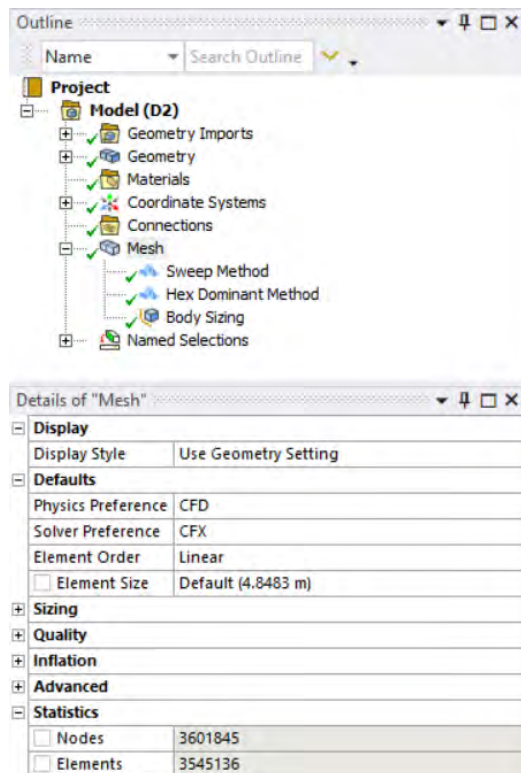
**Figura 49**

*Malla Hex Dominant de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes. Detalle del mallado en las naves del desarenador.*



**Figura 50**

*Número de nodos y elementos de la malla Hex Dominant.*

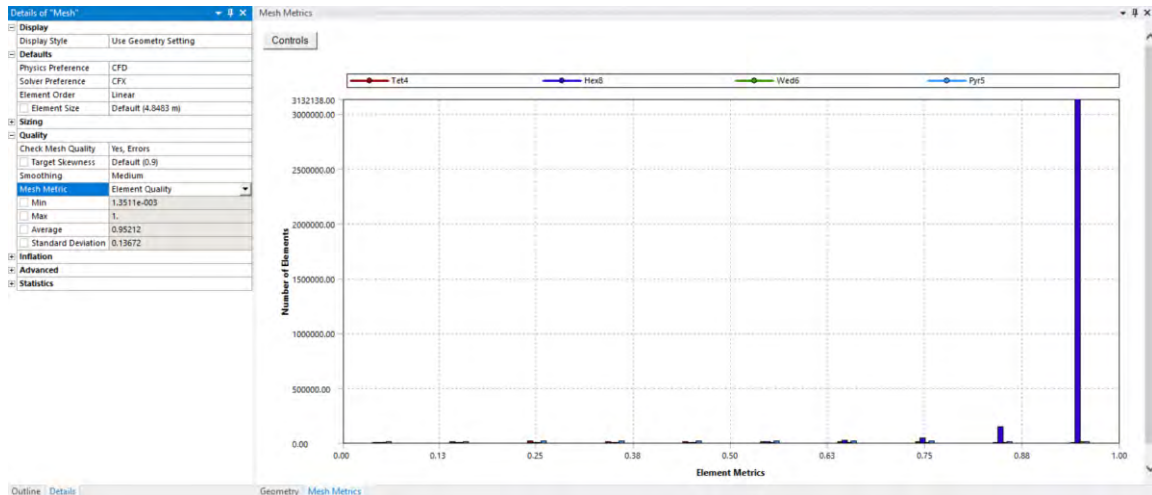


Parámetros de calidad:

- ✓ Element Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 indica alta calidad. Se tiene un valor promedio de 0.95212 (ver figura 51).

**Figura 51**

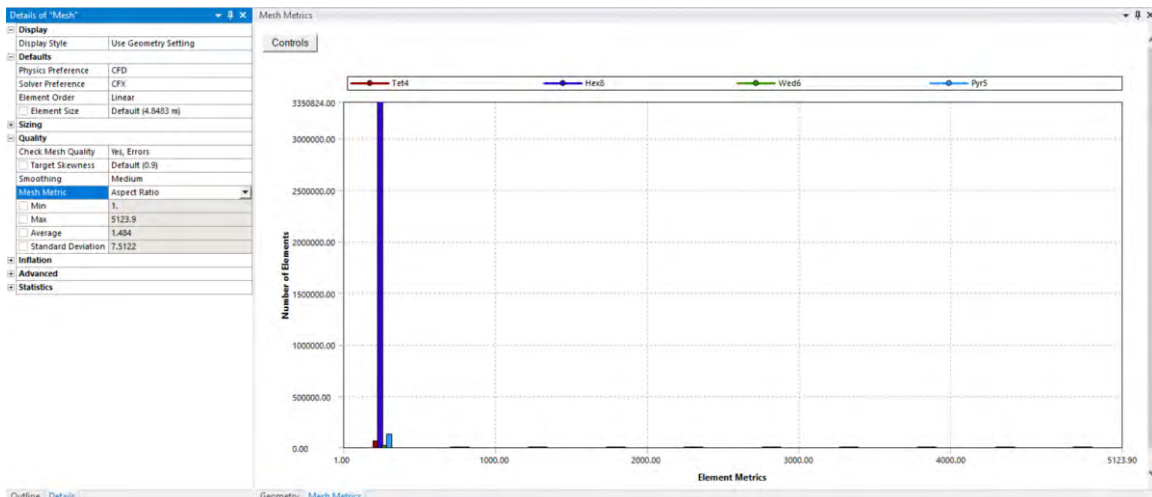
*Parámetro de calidad Element Quality de la malla Hex Dominant.*



- ✓ Aspect Ratio: Debe ser menor a 5. Se tiene un valor promedio de 1.484 (ver figura 52).

**Figura 52**

*Parámetro de calidad Aspect Ratio de la malla Hex Dominant.*

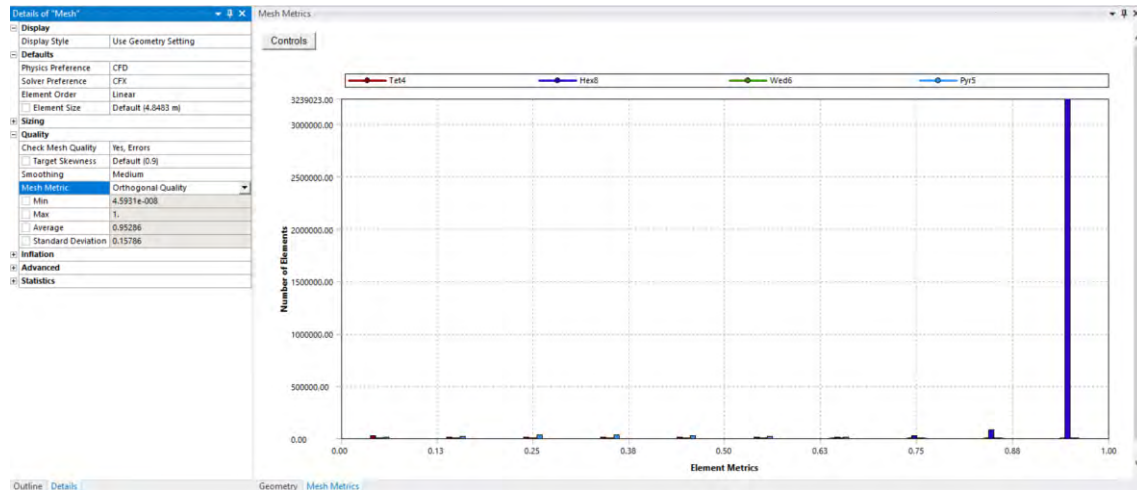




- ✓ Orthogonal Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 alta calidad porque indica que los ángulos de las celdas tienden a  $90^\circ$ . Se tiene un valor promedio de 0.95286 (ver figura 53).

**Figura 53**

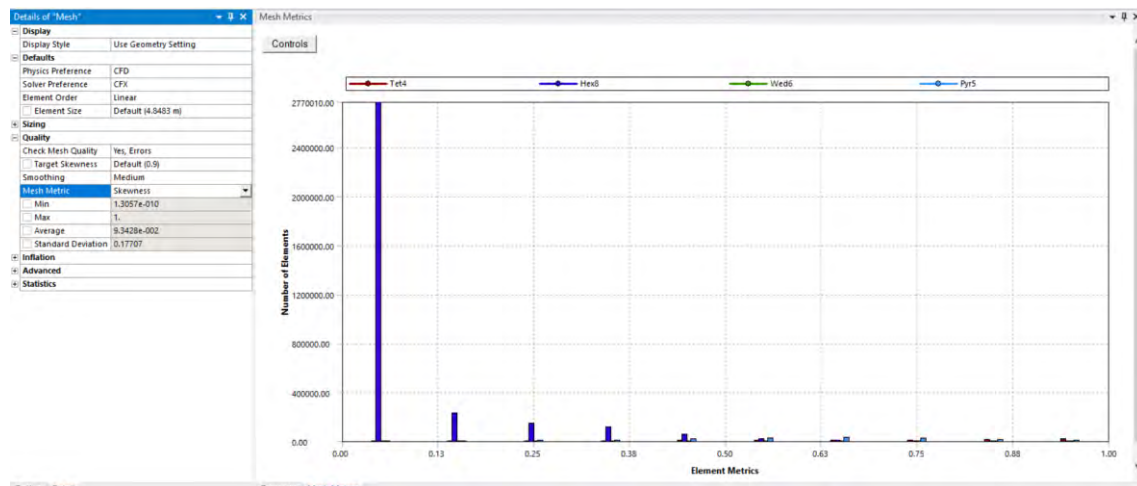
*Parámetro de calidad Orthogonal Quality de la malla Hex Dominant.*



- ✓ Skewness: Oscila entre 0 y 1, 0 indica alta calidad y 1 indica baja calidad. Se tiene un valor promedio de  $9.3428\text{e-}002$  (ver figura 54).

**Figura 54**

*Parámetro de calidad Skewness de la malla Hex Dominant.*





**4.1.2.2 Análisis del tipo de mallado.** En esta sección se analizará el número de nodos y elementos que presentan los dos tipos de mallado usados, MultiZone y Hex Dominant. Como se observa en la tabla 7 el tipo de mallado MultiZone presenta un mejor refinamiento al tener un mayor número de nodos y elementos en la geometría a analizar.

**Tabla 7**

*Número de nodos y elementos para los dos tipos de mallado.*

	<b>Nodos</b>	<b>Elementos</b>
<b>MultiZone</b>	3865004	3662437
<b>Hex Dominant</b>	3601845	3545136

Además, se realizó el análisis de los parámetros de calidad para cada tipo de mallado, se obtuvo los siguientes valores.

**Tabla 8**

*Valores de los parámetros de calidad para los diferentes tipos de mallado.*

<b>Modelo original</b>				
<b>Parámetros de calidad</b>	<b>MultiZone</b>	<b>Hex Dominant</b>	<b>Automatic</b>	<b>Tetrahedrons</b>
<b>Element quality</b> <b>0 – 1</b>	0.98958	0.95212	0.85525	0.85527
<b>Aspect ratio</b> <b>1, &lt; 5</b>	1.0878	1.484	1.7682	1.7682
<b>Ortogonalidad</b> <b>0 – 1</b>	0.99525	0.95286	0.79857	0.79867
<b>Skewness</b> <b>0 – 1</b>	3.5433e-002	9.3428e-002	0.20184	0.20174
<b>Imbalances</b>	3.0767	4.5749	4.2599	3.7617

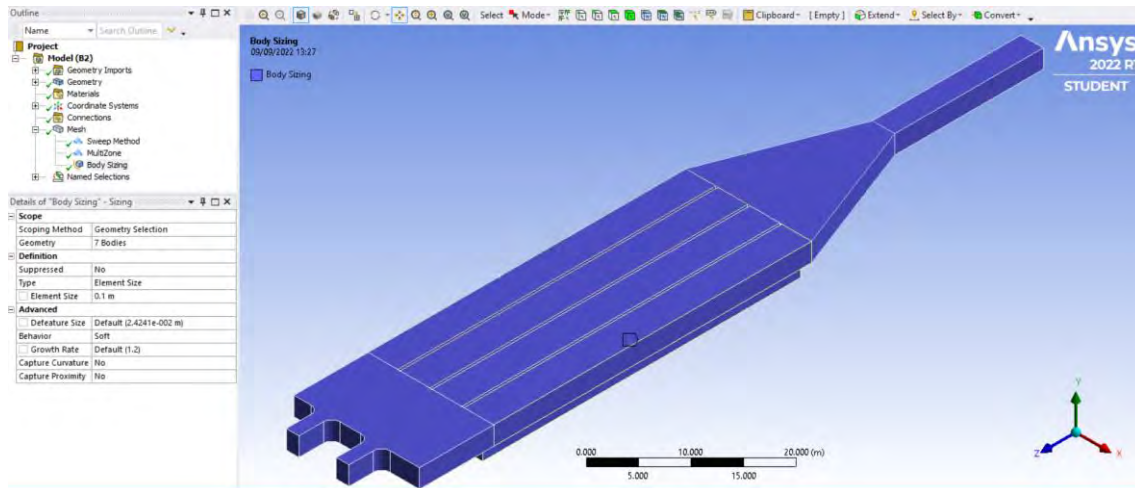
Se observa que el mallado MultiZone presenta mejores parámetros de calidad y los valores de los imbalances son bajos. El análisis de resultados se realizará en base a este modelo.

### 4.1.3 Configuración de la modelación

- Se aplicó un Body Sizing de 0.1 m a toda la geometría.

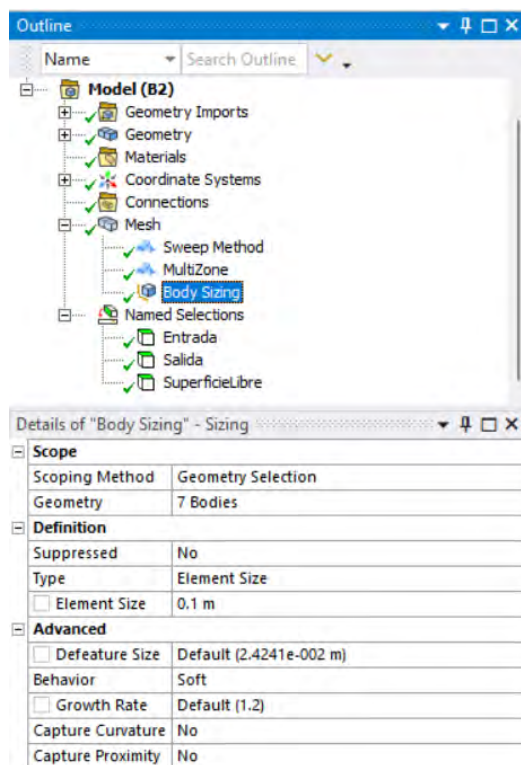
**Figura 55**

*Interfaz Mesh. Body Sizing del mallado de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes.*



**Figura 56**

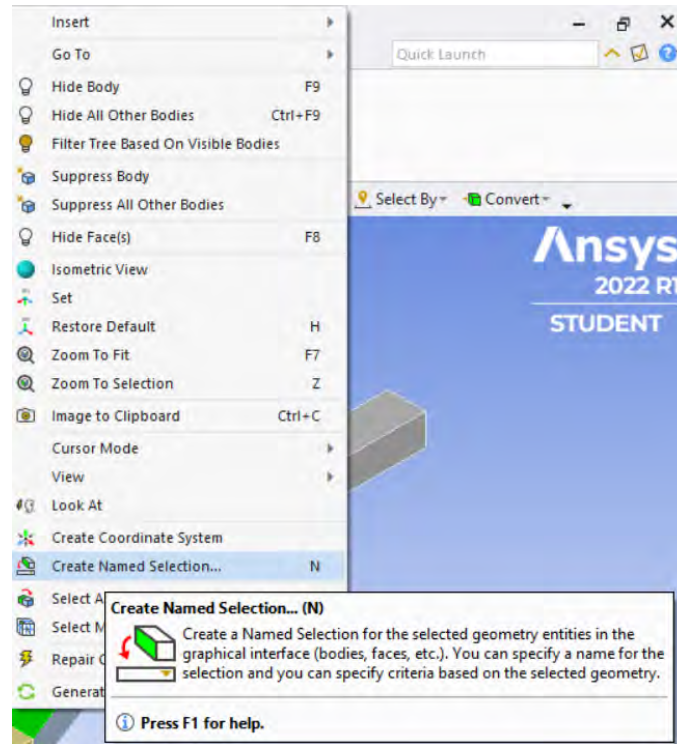
*Interfaz Mesh. Sizing del mallado de la geometría del modelo físico original del desarenador de Majes.*



- Se nombra las partes del desarenador entrada, salida y superficie libre. Se selecciona el plano que se quiere nombrar, anticlic, y se selecciona la opción Created Named Selection.

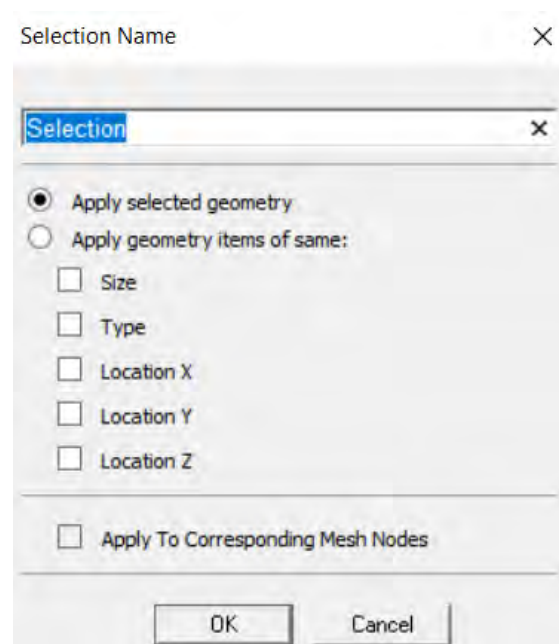
**Figura 57**

*Interfaz Mesh. Pasos para nombrar las partes del desarenador.*



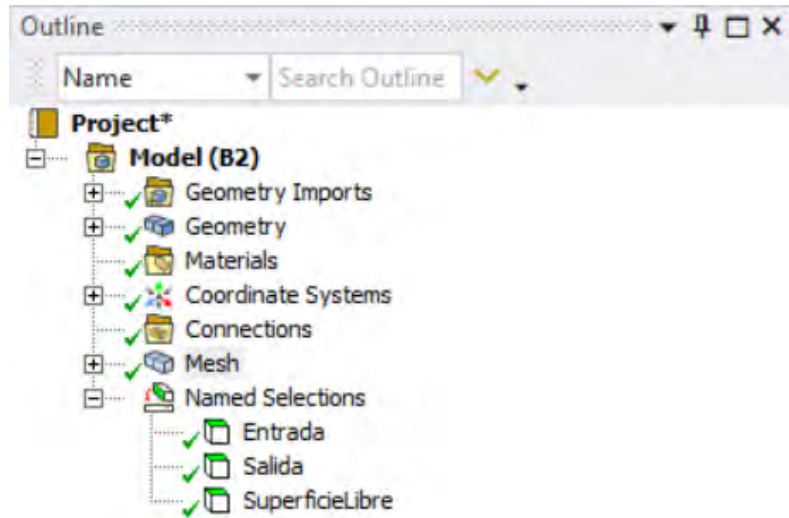
**Figura 58**

*Interfaz Mesh. Pasos para nombrar las partes del desarenador.*

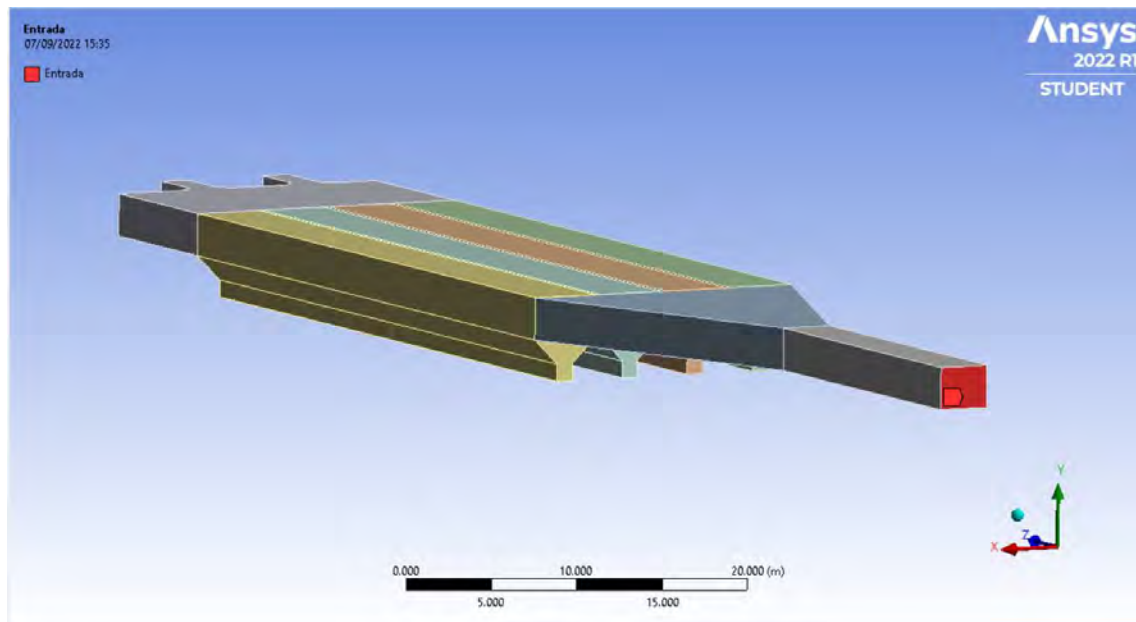


**Figura 59**

*Interfaz Mesh. Detalle de los nombres de las partes del desarenador.*

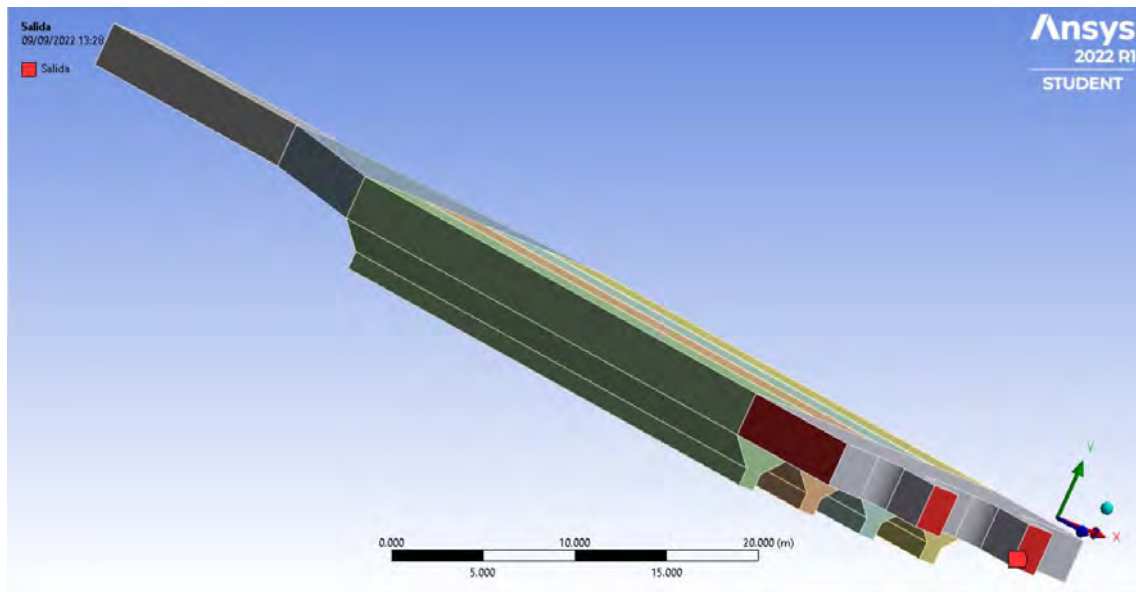
**Figura 60**

*Interfaz Mesh. Entrada del canal aguas arriba del desarenador.*

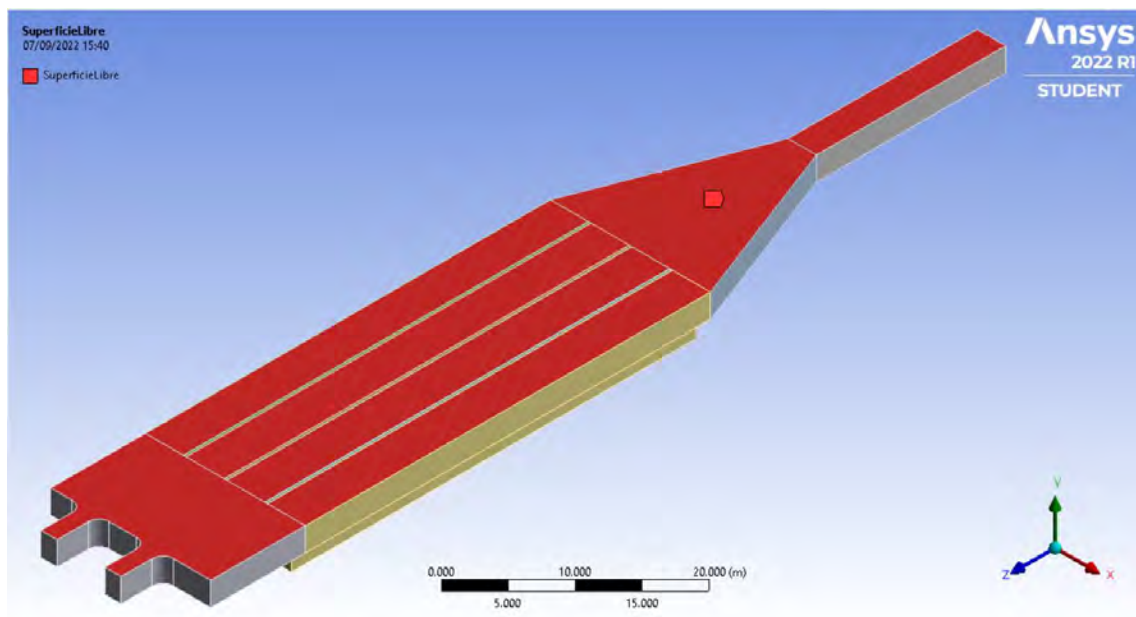


**Figura 61**

*Interfaz Mesh. Salida del desarenador.*

**Figura 62**

*Interfaz Mesh. Superficie libre del desarenador.*



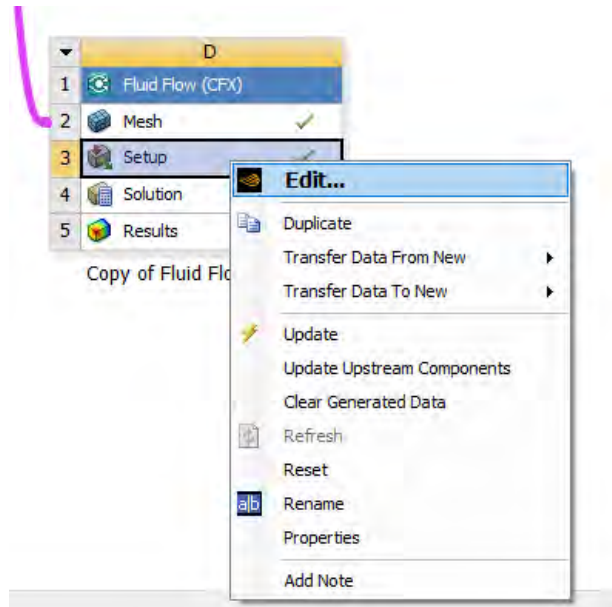


#### 4.1.4 Propiedades del fluido

- Las propiedades del fluido se ingresan en la configuración del *Setup*, haciendo clic en este y luego seleccionando Edit.

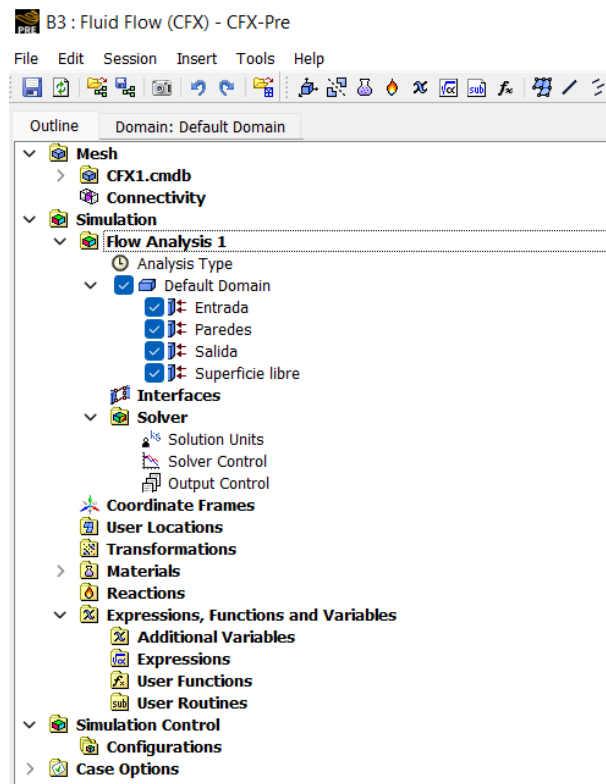
**Figura 63**

*Interfaz Workbench. Pasos para abrir la configuración del Stup.*



**Figura 64**

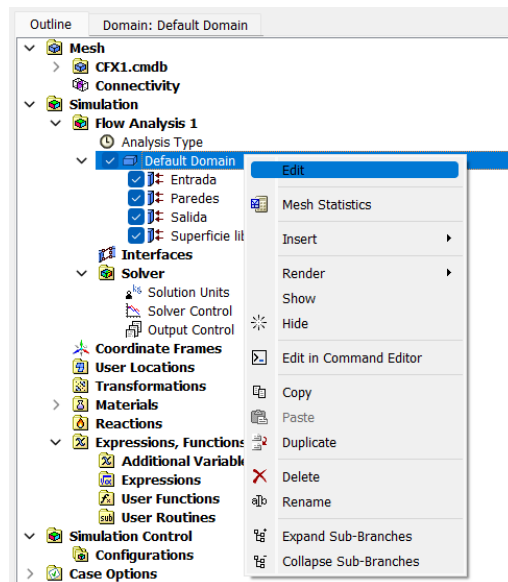
*Interfaz Fluid Flow (CFX).*



- Se configura el dominio: Anticlic en *Default Domain*, se selecciona *Edit*.

**Figura 65**

*Interfaz Fluid Flow (CFX). Pasos para abrir la configuración del Default Domain.*

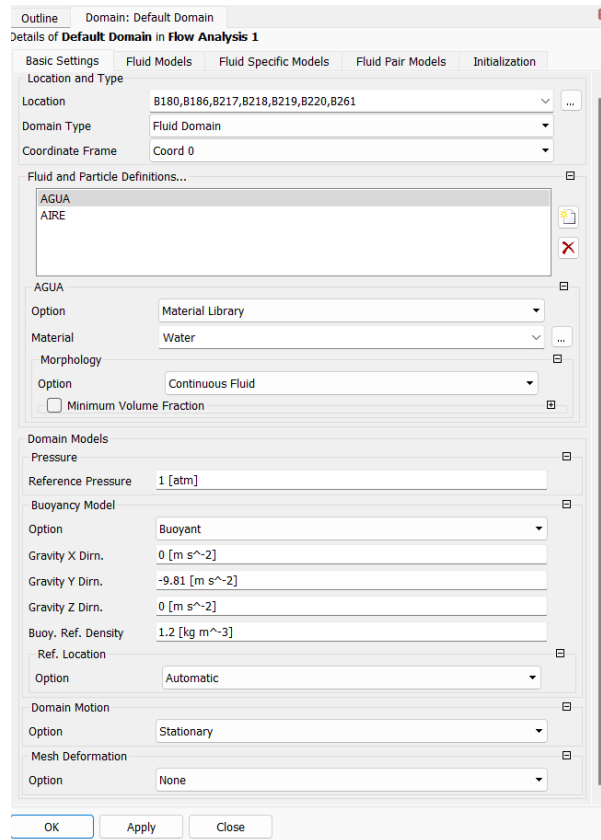


- *Basic Settings*: Es la configuración básica de las propiedades del fluido de la geometría a analizar (ver tabla 9).

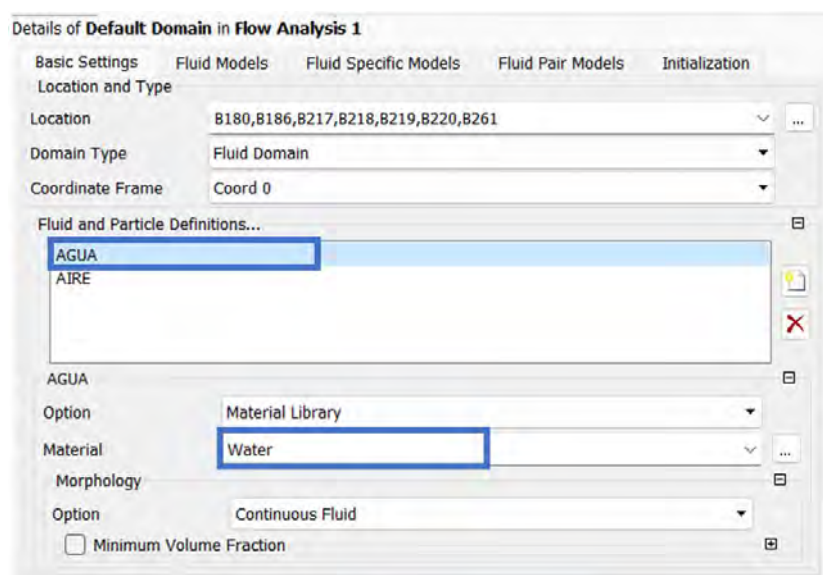
**Tabla 9**

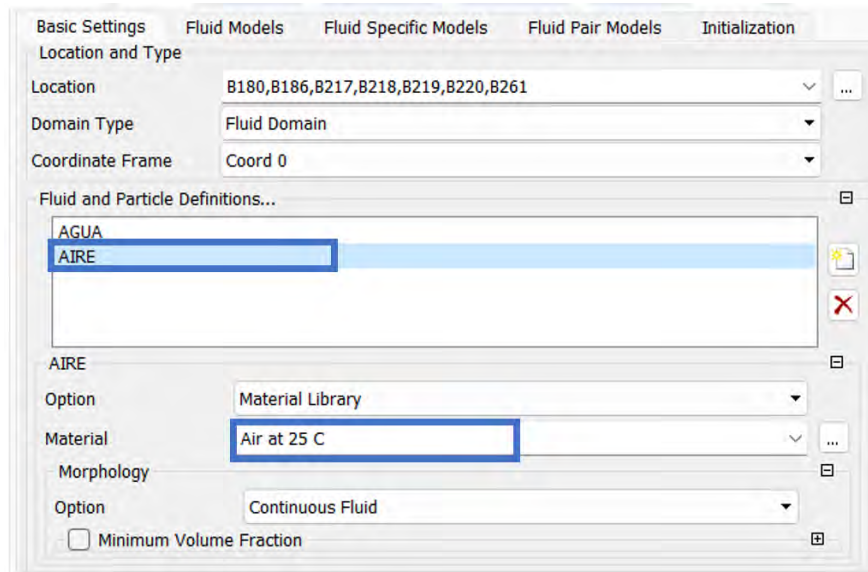
*Basic Settings de las propiedades del fluido.*

Basic Settings	Concepto
<b>Morphology</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fluido multifásico agua – aire, para ello se asume al fluido como un medio continuo (Continuous Fluid).</li> </ul>
<b>Domain Models</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La presión (Pressure) que gobierna el dominio es la presión atmosférica, con un valor de 1 [atm] en la opción de Reference Pressure.</li> </ul>
<b>Buoyancy Model</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se selecciona Bouyant como modelo de flotabilidad en la opción de Buoyancy Model.</li> <li>- La fuerza gravitatoria es de -9.81 [m/s<sup>2</sup>] en la dirección Y, según los ejes de coordenados establecidos en la geometría del proyecto. Se completa con valor de 0 [m/s<sup>2</sup>] en las direcciones donde no afecta la gravedad.</li> <li>- La densidad de flotabilidad de referencia (Bouy. Ref. Density) entre agua – aire tiene un valor de 1.2 [kg/m<sup>3</sup>].</li> </ul>

**Figura 66***Configuración de las propiedades del fluido.*

- En *Fluid and particle Definitions* se definen los fluidos y sus propiedades: Agua y Aire a 25°C. Se utiliza la herramienta Add para agregar los fluidos que no están por defecto.

**Figura 67***Propiedades del agua.*

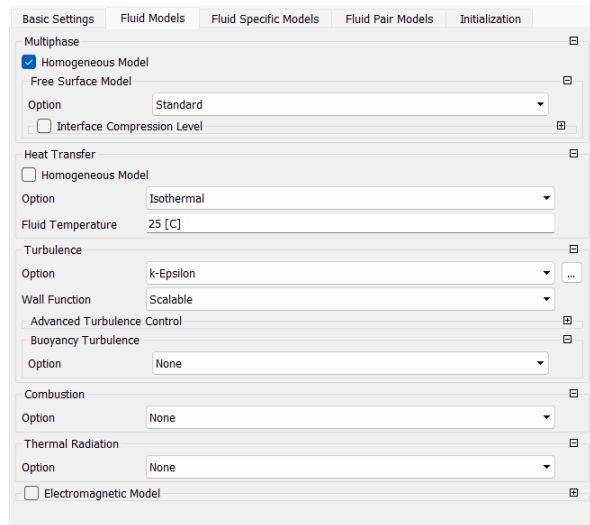
**Figura 68***Propiedades del aire.*

- En *Fluid Models* se elige el modelo de turbulencia.

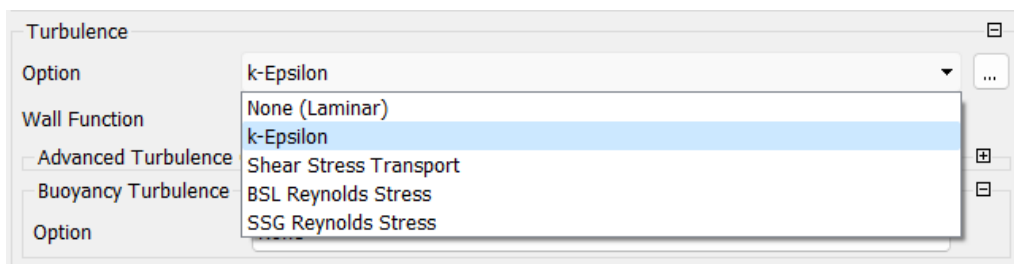
**Tabla 10***Configuración de Fluid Models.*

Fluid Models	Configuración
<b>Multiphase</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se activa la opción para <i>Homogeus Model</i>.</li> <li>- El agua es el fluido primario.</li> </ul>
<b>Heat Transfer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- None. No se toma en cuenta.</li> </ul>
<b>Turbulence</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se elige el modelo K-epsilon</li> </ul>
<b>Combustion</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- None. No se toma en cuenta.</li> </ul>
<b>Thermal Radiation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- None. No se toma en cuenta.</li> </ul>

**Figura 69**  
*Configuración de Fluid Models.*



**Figura 70**  
*Selección del modelo de turbulencia.*



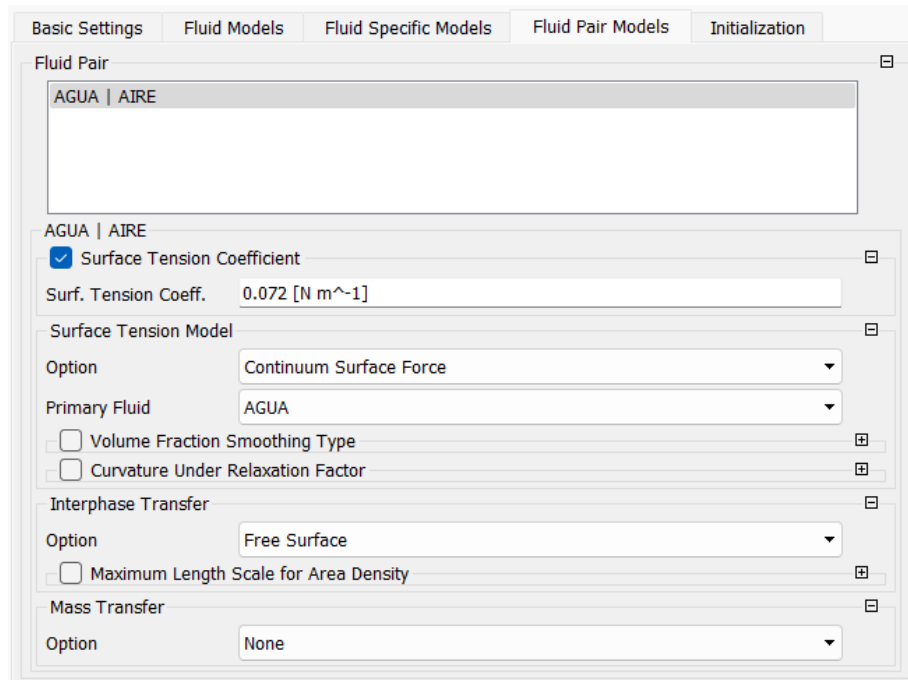
- La configuración de *Fluid Pair Models* es la siguiente:

**Tabla 11**  
*Configuración de Fluid Pair Models.*

Fluid Pair Models	Configuración
Agua/Aire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El Coeficiente de tensión superficial (<i>Surf. Tension Coeff.</i>) es 0.072 [N/m].</li> <li>- Permite situar el aire por encima del agua dentro del dominio.</li> </ul>
Surface Tension Model	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Option: Continuum Surface Force.</li> <li>- Primary Fluid: AGUA</li> </ul>
Interphase Transfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Option: Free Surface</li> </ul>
Mass Transfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>- None. No se tiene en cuenta.</li> </ul>



**Figura 71**  
*Configuración de Fluid Pair Models.*



#### 4.1.5 Condiciones de borde

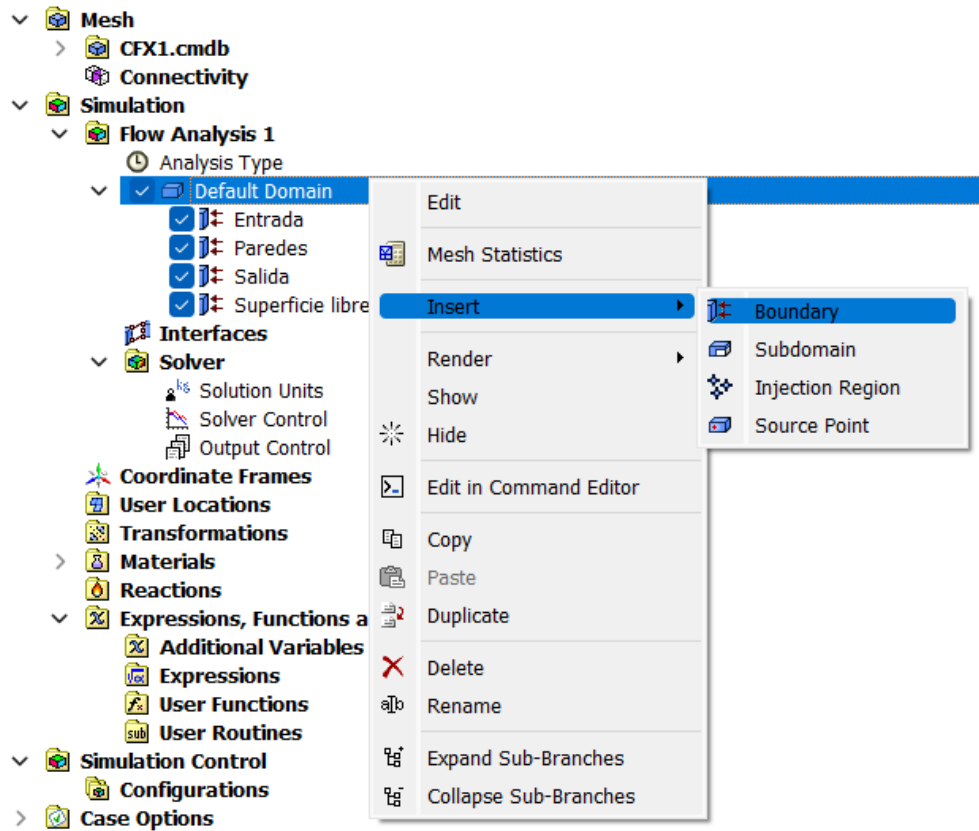
Las condiciones de borde son necesarias para describir el fenómeno físico, en este caso el comportamiento del fluido dentro del desarenador.

Los pasos para ingresar las condiciones de borde son los siguientes:

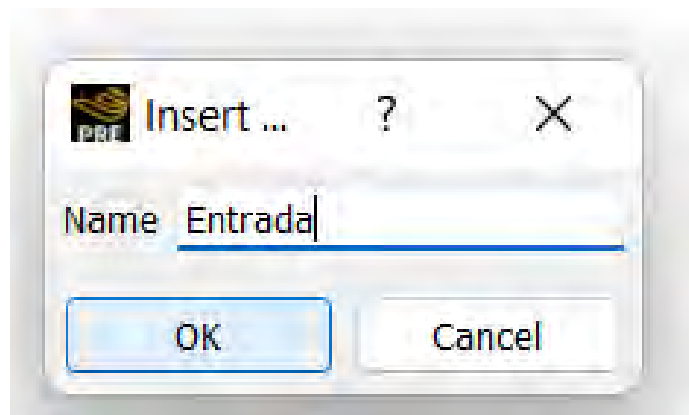
- Anticlic en la opción *Default Domain*, luego se selecciona la opción *Insert*, se muestran tres opciones *Boundary*, *Subdomain*, *Injection Region* y *Source Point*, se elige *Boundary* para establecer las condiciones de frontera. En la siguiente ventana se nombra la frontera a configurar.

**Figura 72**

*Pasos para insertar las fronteras de la geometría.*

**Figura 73**

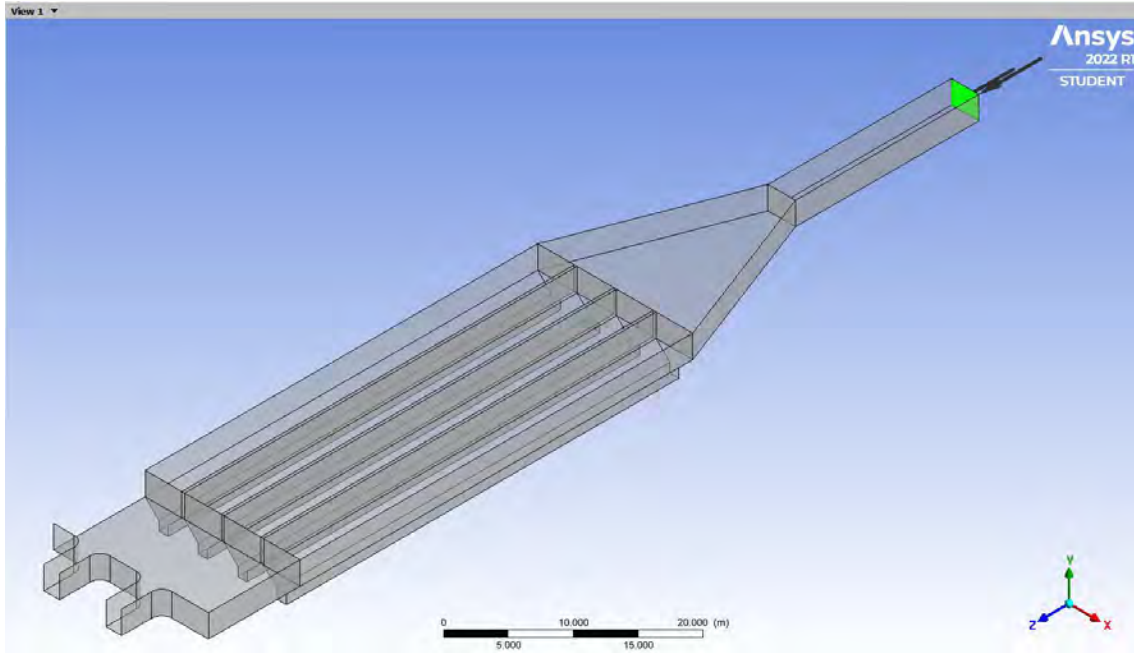
*Creación de los nombres de las fronteras.*



#### 4.1.5.1 Entrada

**Figura 74**

*Configuración de la frontera Entrada.*

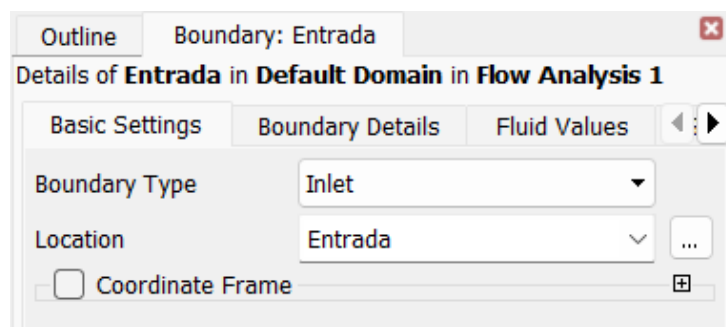


La configuración de *Basic Settings* es la siguiente:

- Boundary Type: Inlet.
- Location: Se selecciona las partes del desarenador que corresponden a la Entrada.

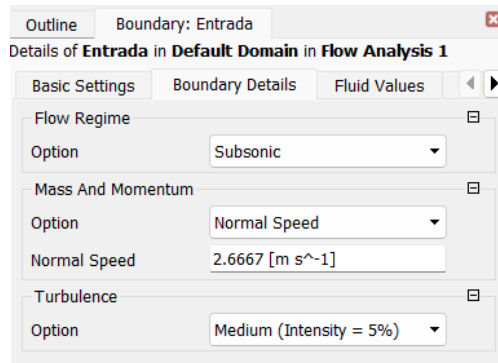
**Figura 75**

*Configuración de Basic Settings.*



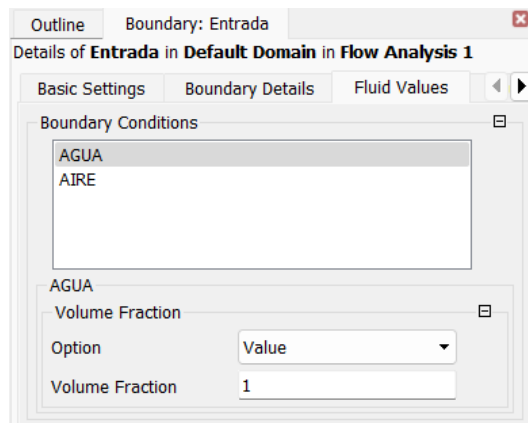
La configuración de *Boundary Details* es la siguiente:

- Flow Regime: Subsonic.
- Mass And Momentum: Normal Speed, con un valor de 2.6667 [m/s], se calculó en el capítulo 2, apartado 2.5.
- Turbulence: Medium, Intensity = 5%.

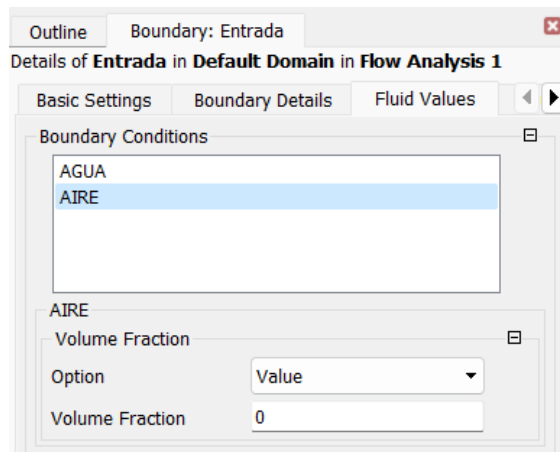
**Figura 76***Configuración de Boundary Details.*

La configuración de *Fluid Values* es la siguiente:

- AGUA: Volumen Fraction = 1.

**Figura 77***Configuración de Fluid Values – AGUA.*

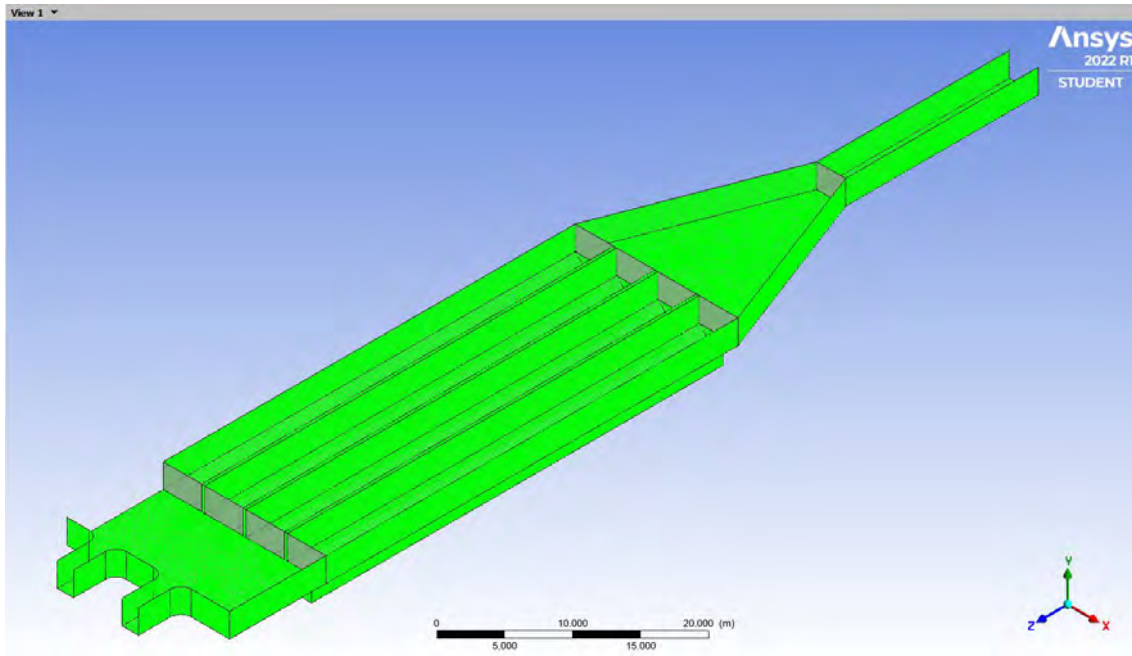
- AIRE: Volumen Fraction = 0.

**Figura 78***Configuración de Fluid Values – AIRE.*

#### 4.1.5.2 Paredes

**Figura 79**

*Configuración de la frontera Paredes.*

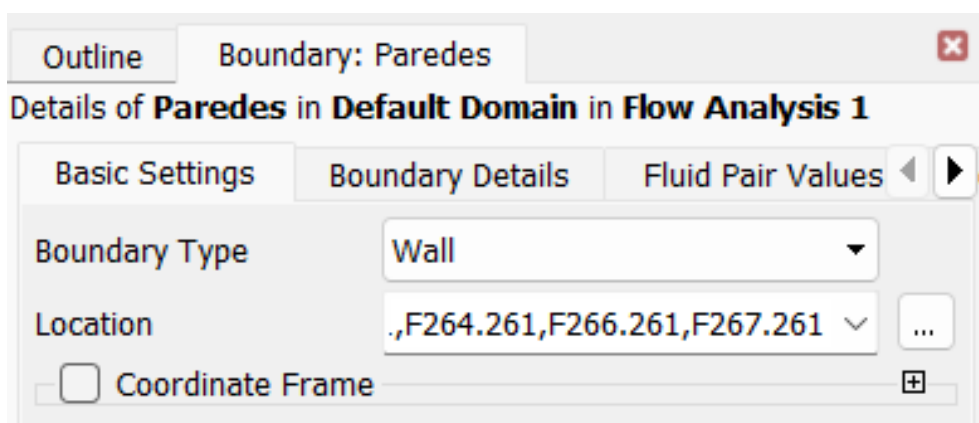


La configuración de *Basic Settings* es la siguiente:

- Boundary Type: Wall.
- Location: Se selecciona las partes del desarenador que corresponden a las Paredes.

**Figura 80**

*Configuración de Basic Settings.*



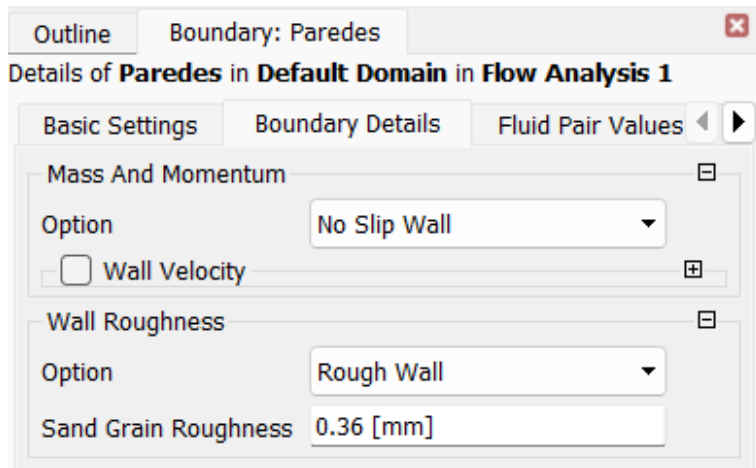


La configuración de *Boundary Details* es la siguiente:

- Mass And Momentum: No Slip Wall.
- Wall Roughness: Rough Wall, Sand Grain Roughness = 0.36 [mm], rugosidad del concreto.

**Figura 81**

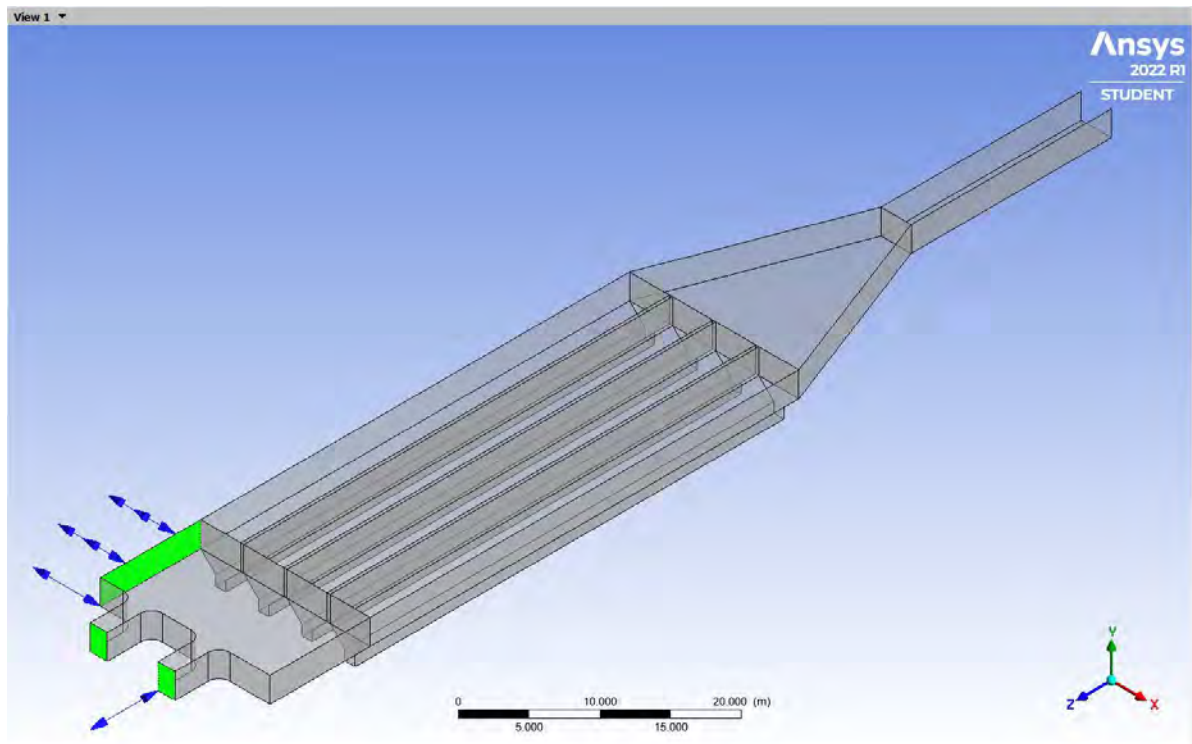
*Configuración de Boundary Details.*



#### 4.1.5.3 Salida

**Figura 82**

*Configuración de la frontera Salida.*

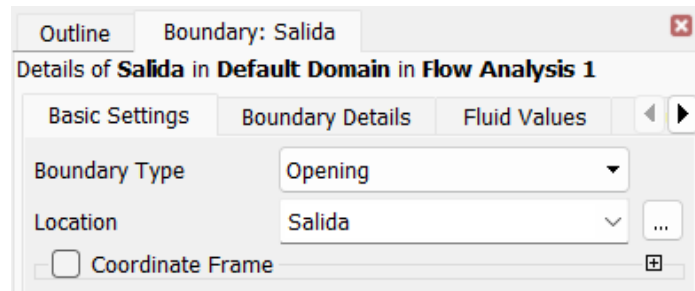


La configuración de *Basic Settings* es la siguiente:

- Boundary Type: Opening.
- Location: Se selecciona las partes del desarenador que corresponden a la Salida.

**Figura 83**

*Configuración de la frontera Salida.*

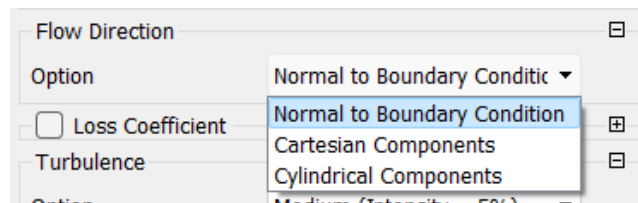


La configuración de *Boundary Details* es la siguiente:

- Flow Regime: Subsonic.
- Mass And Momentum: Opening Pres. and Dirn, Relative Pressure 0 [Pa], está en contacto con el medio ambiente.
- Flow Direction: Normal to Boundary Condition.

**Figura 84**

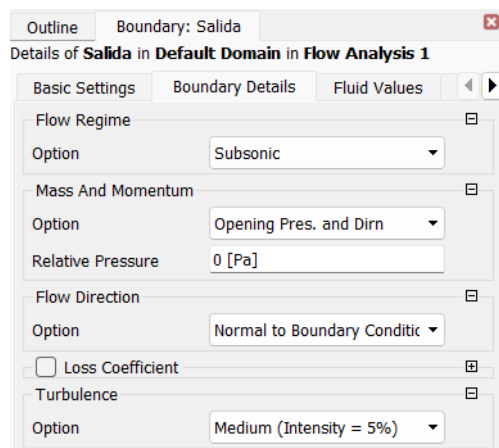
*Configuración de Flow Direction.*



- Turbulence: Medium, Intensity = 5%.

**Figura 85**

*Configuración de Boundary Details.*

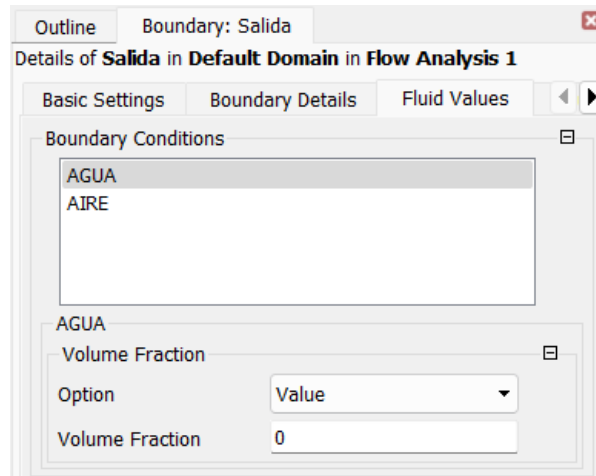


La configuración de *Fluid Values* es la siguiente:

- AGUA: Volumen Fraction = 0.

**Figura 86**

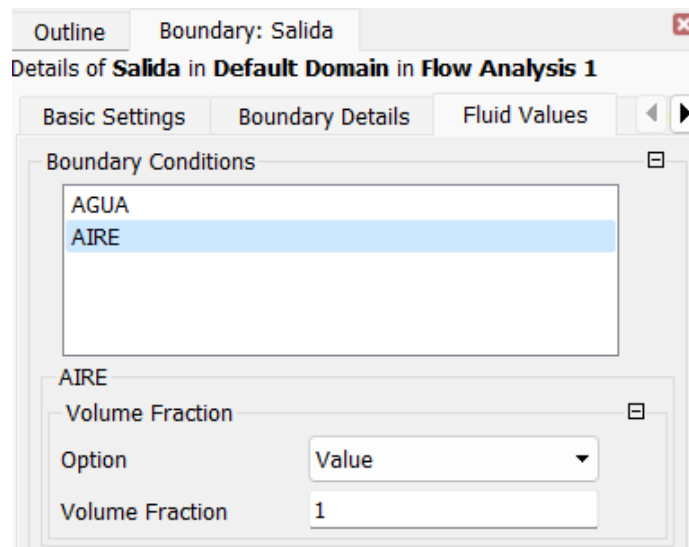
*Configuración de Fluid Values – AGUA.*



- AIRE: Volumen Fraction = 1.

**Figura 87**

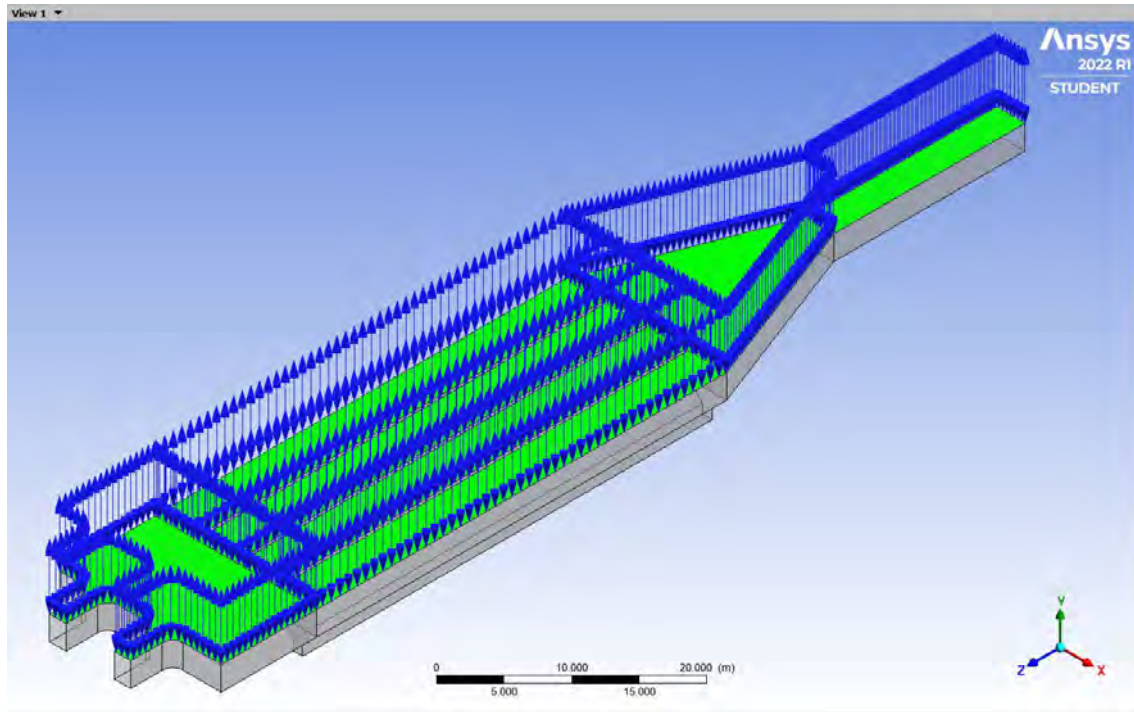
*Configuración de Fluid Values – AIRE.*



#### 4.1.5.4 Superficie libre

**Figura 88**

*Configuración de la frontera Superficie libre.*

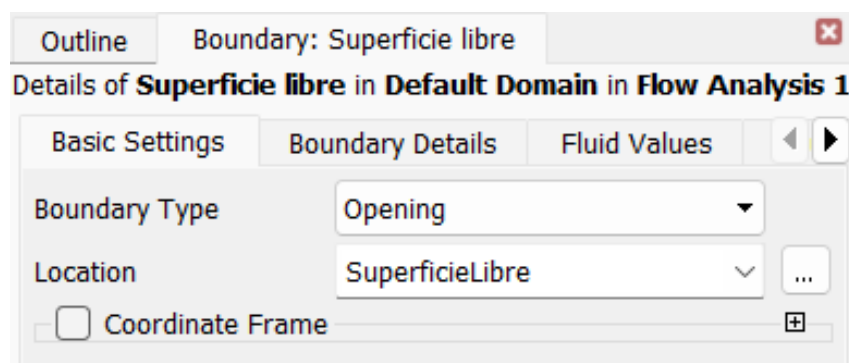


La configuración de *Basic Settings* es la siguiente:

- Boundary Type: Opening.
- Location: Se selecciona las partes del desarenador que corresponden a la Superficie libre.

**Figura 89**

*Configuración de Basic Settings.*

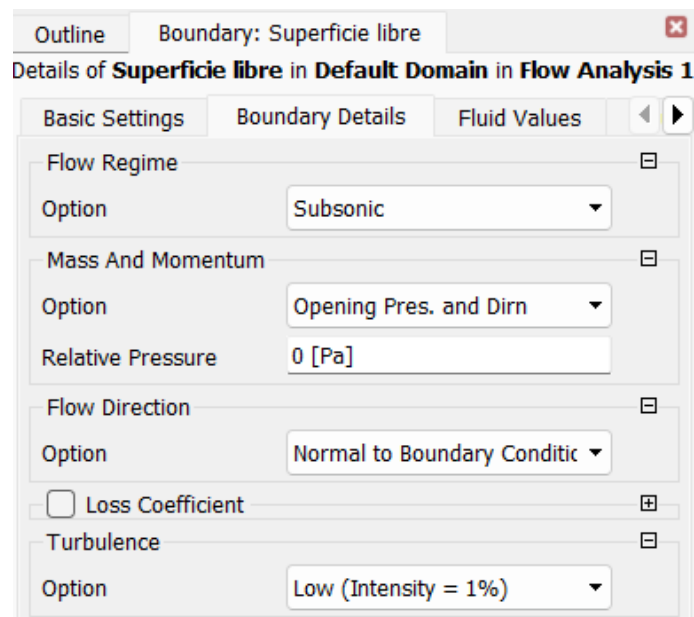


La configuración de *Boundary Details* es la siguiente:

- Flow Regime: Subsonic.
- Mass And Momentum: Opening Pres. and Dirn, Relative Pressure 0 [Pa], está en contacto con el medio ambiente.
- Flow Direction: Normal to Boundary Condition.
- Turbulence: Low Intensity = 1%.

**Figura 90**

*Configuración de Boundary Details.*

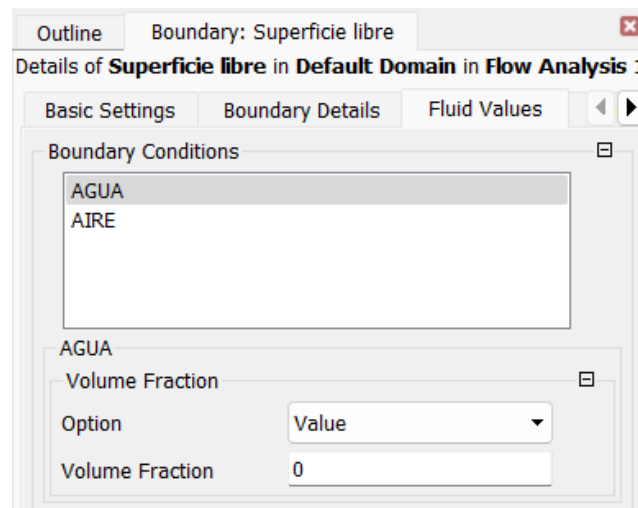


La configuración de *Fluid Values* es la siguiente:

- AGUA: Volumen Fraction = 0.

**Figura 91**

*Configuración de Fluid Values – AGUA.*

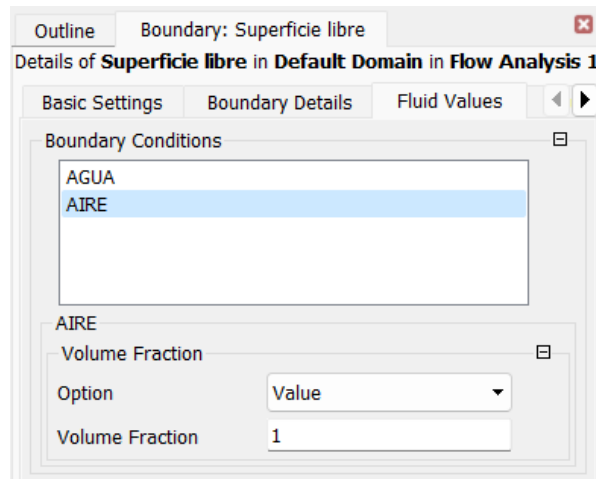




- AIRE: Volumen Fraction = 1.

**Figura 92**

*Configuración de Fluid Values – AIRE*

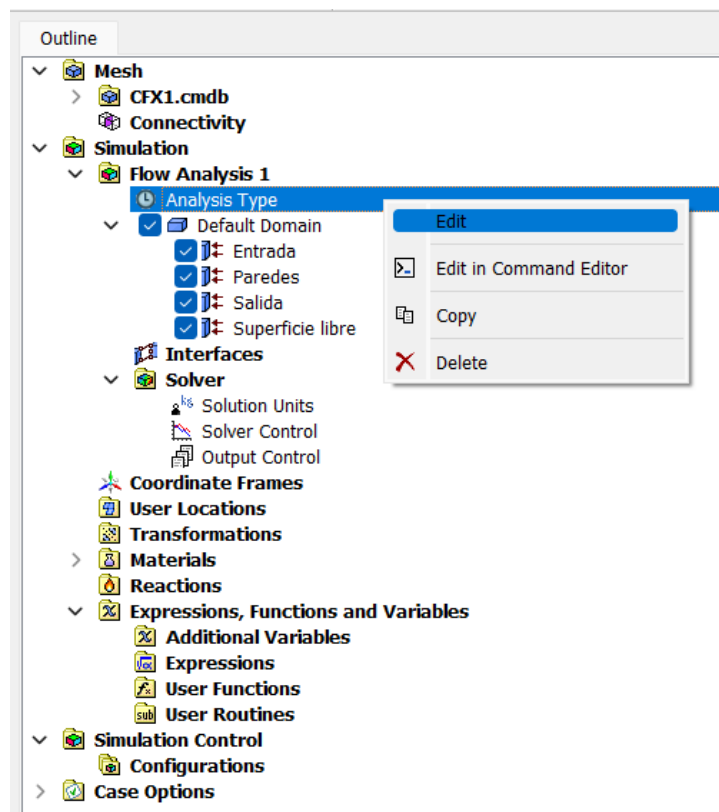


#### 4.1.6 Configuración del tipo de análisis

- Se define el tipo de análisis para flujo estacionario.
- Los pasos para la configuración son los siguientes: Se hace anticlic en *Analysis Type*, luego se selecciona *Edit*.

**Figura 93**

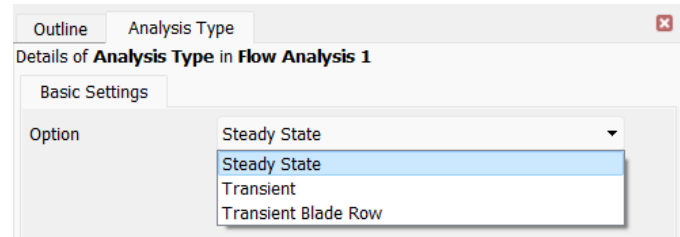
*Pasos para la configuración del tipo de análisis.*



- La configuración de *Basic Settings* es la siguiente:

**Figura 94**

*Selección del tipo de análisis.*

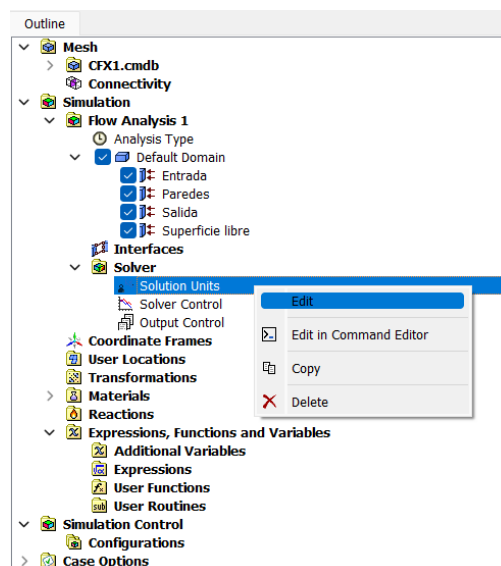


#### 4.1.7 Control del solucionador

- Se verifica las unidades: Anticlik en *Solution Units*, luego se selecciona *Edit*.

**Figura 95**

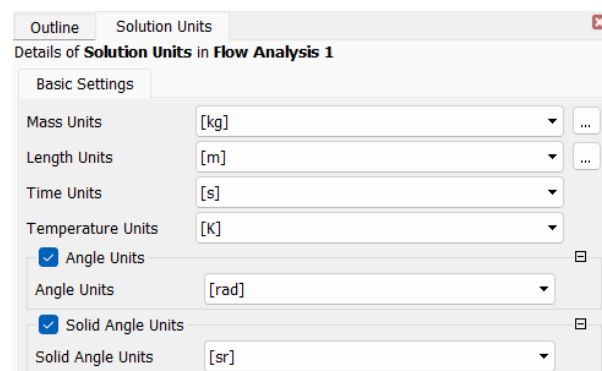
*Pasos para la configuración de las unidades.*



- La configuración de *Basic Settings* es la siguiente:

**Figura 96**

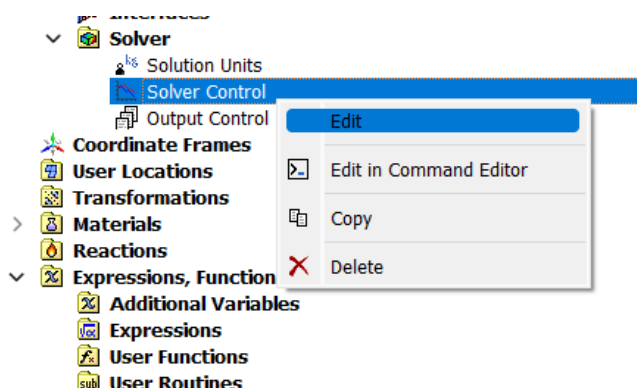
*Configuración y selección de las unidades.*



- Se configura *Solver Control*: Anticlic en *Solver Control*, luego se selecciona *Edit*.

**Figura 97**

*Pasos para configurar Solver Control.*



- La configuración de *Basic Settings* es la siguiente:

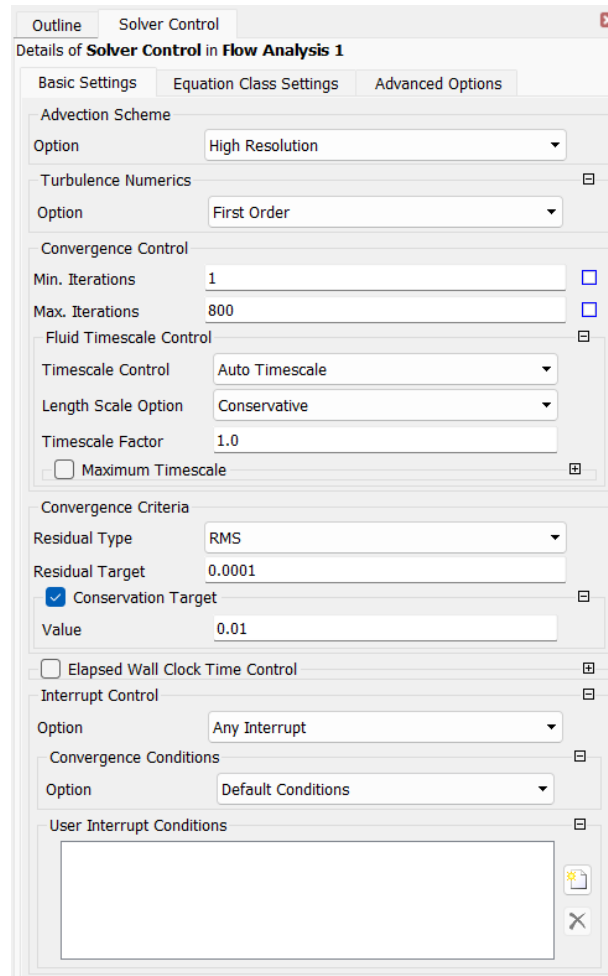
**Tabla 12**

*Configuración de Basic Settings del Solver Control.*

Basic Settings	Configuración
<b>Advection Scheme</b>	- High Resolution
<b>Turbulence Numerics</b>	- First Order
<b>Convergence Control</b>	- Min. Iterations: 1. - Max. Iterations: 800.
<b>Fluid Timescale Control</b>	- Timescale Control: Auto Timescales - Legth Scale Option: Conservative - Timescale Factor: 1.0
<b>Convergence Criteria</b>	- Residual Type: RMS - Residual Target: 0.0001 - Activar la opción: Conservation Target - Value: 0.01

**Figura 98**

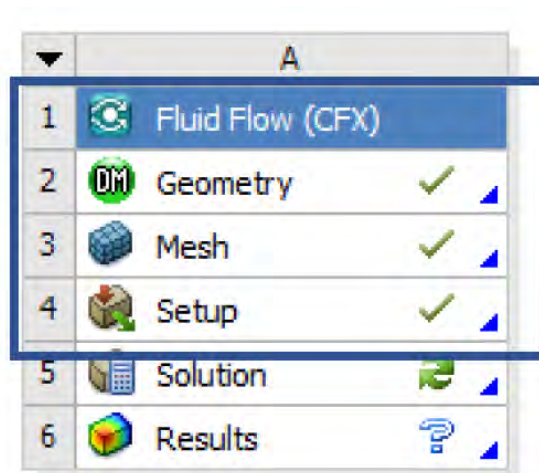
*Configuración de Basic Settings del Solver Control.*



- Se finaliza la configuración del Setup y se verifica la configuración con el check verde en la ventana de Fluid Flow (CFX).

**Figura 99**

*Comprobación del proceso realizado en Setup.*



## 4.2 Etapa 2: Procesamiento

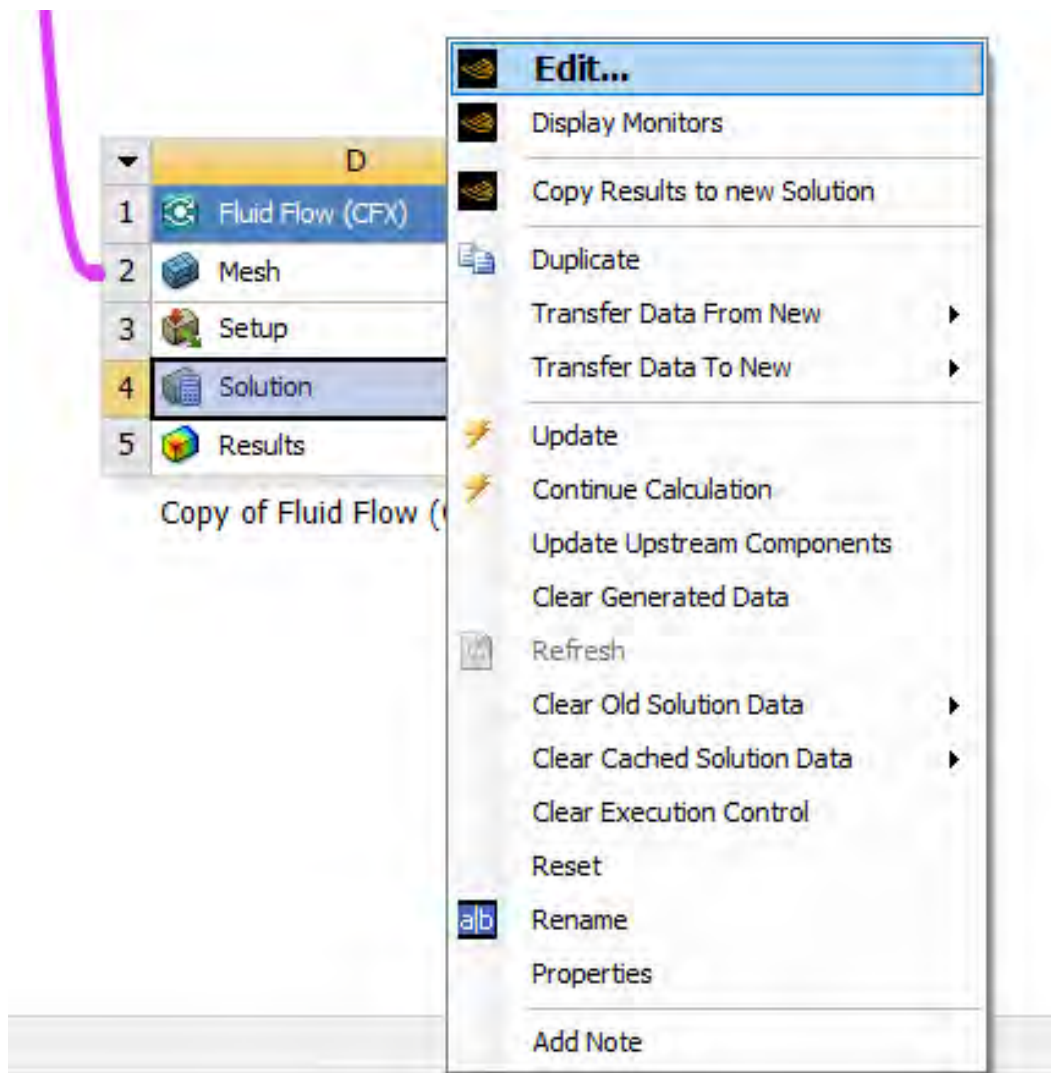
En esta etapa se presenta la solución numérica, la cual se verifica en el módulo *Solution*, componente presente en la ventana *Fluid Flow (CFX)* de la interfaz *Workbench*.

La solución numérica presenta gráficos, tablas y los valores residuales RMS o MAX de los resultados de las variables, según el criterio de convergencia elegido en el Setup. Estos se obtienen debido al error de cierre de turbulencia, ya que las ecuaciones no tienen solución analítica única, motivo por el cual se usa matemática estadística mediante las iteraciones. (Noblecilla Palomino, 2019)

Para abrir el solucionador, se debe seleccionar la opción *Solution*, hacer clic en este, y luego seleccionar la opción *Edit*.

**Figura 100**

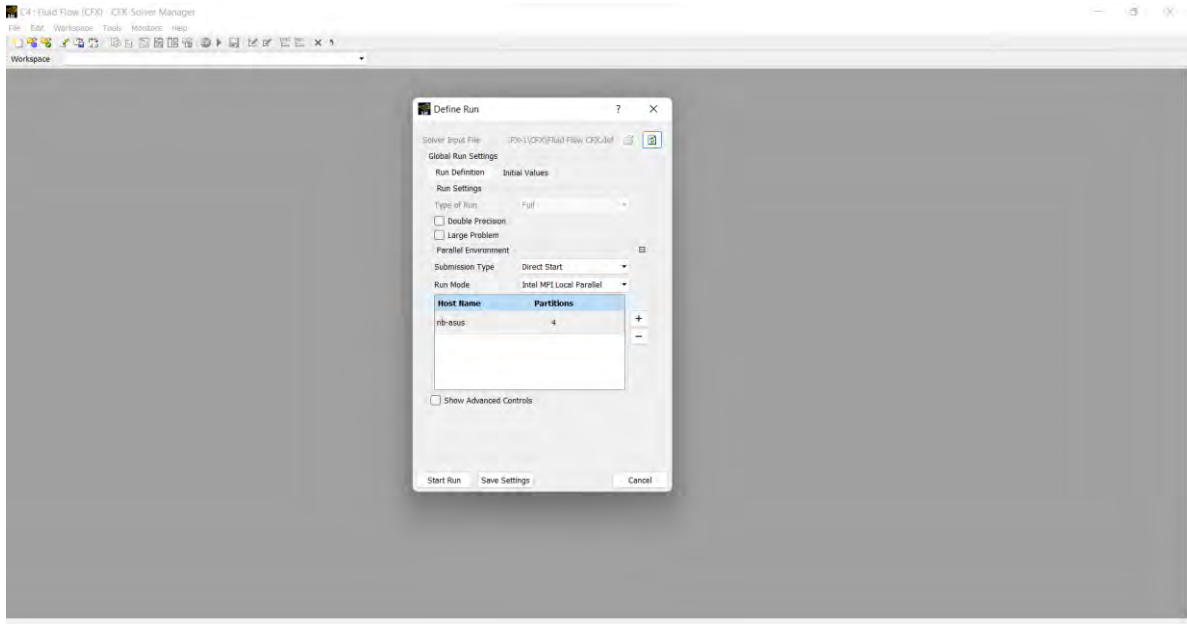
*Pasos para abrir el Solucionador.*





**Figura 101**

*Vista preliminar del Solver Manager – Configuración de Define Run.*

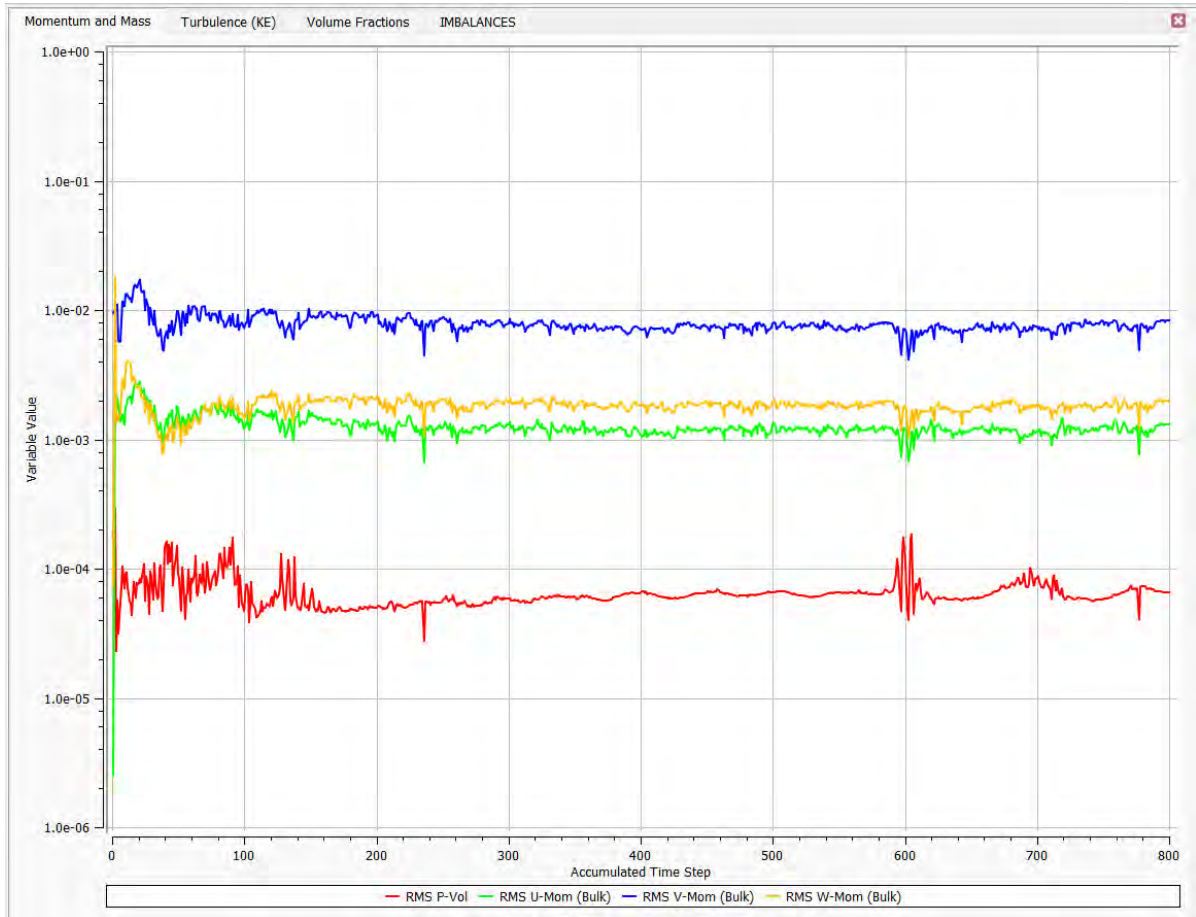


Los gráficos mostrados por el solucionador corresponden a los valores residuales RMS de las ecuaciones de Momentum and Mass (Momento y Masa), de Turbulence (KE) (Turbulencia), y Volume Fractions (Fracción de Volumen).

a) Gráficas de residuos promedio de los volúmenes de control RMS del mallado MultiZone:

**Figura 102**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Momentum and Mass.*



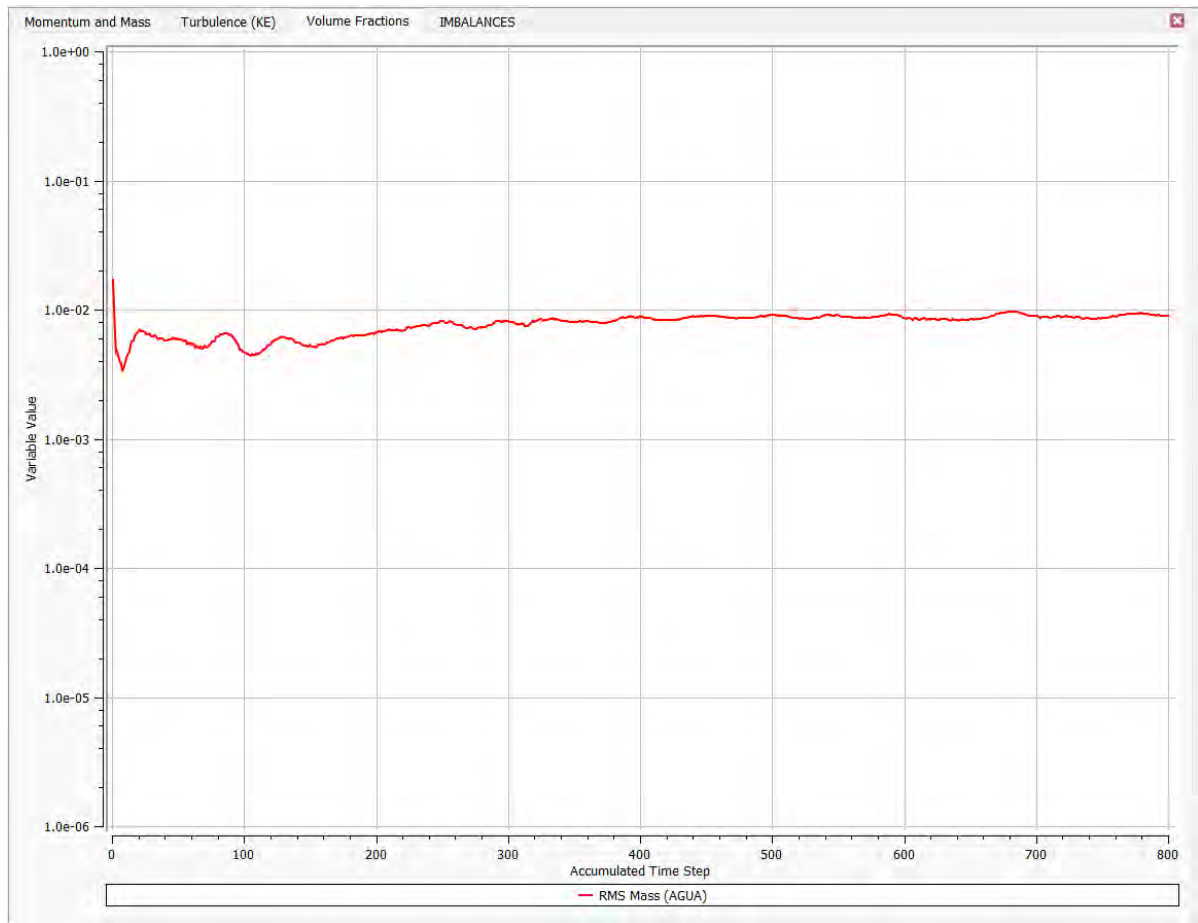
**Figura 103**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Turbulence (KE).*



**Figura 104**

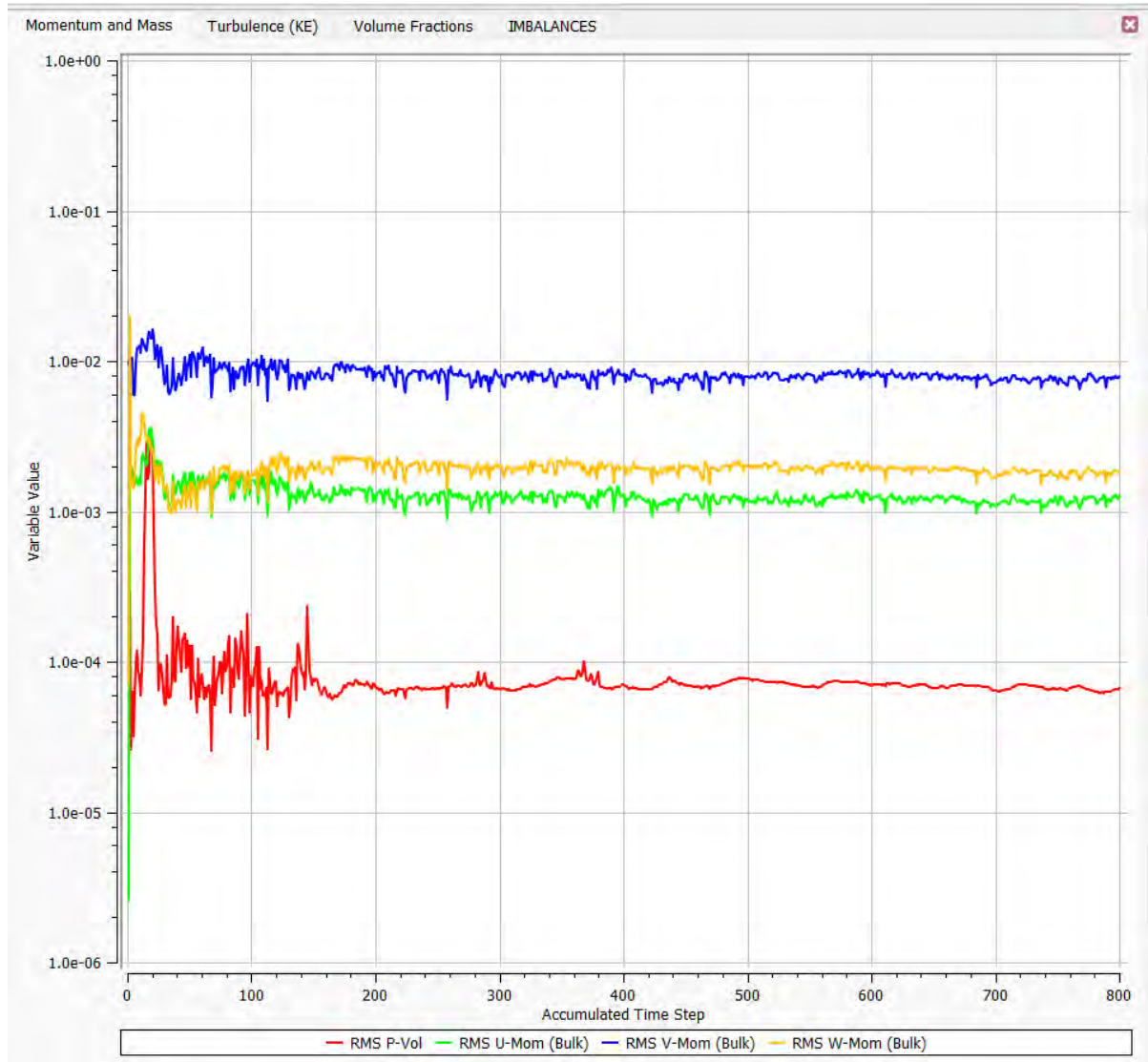
*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Volumen Fractions.*



b) Gráficas de residuos promedio de los volúmenes de control RMS del mallado Hex Dominant:

**Figura 105**

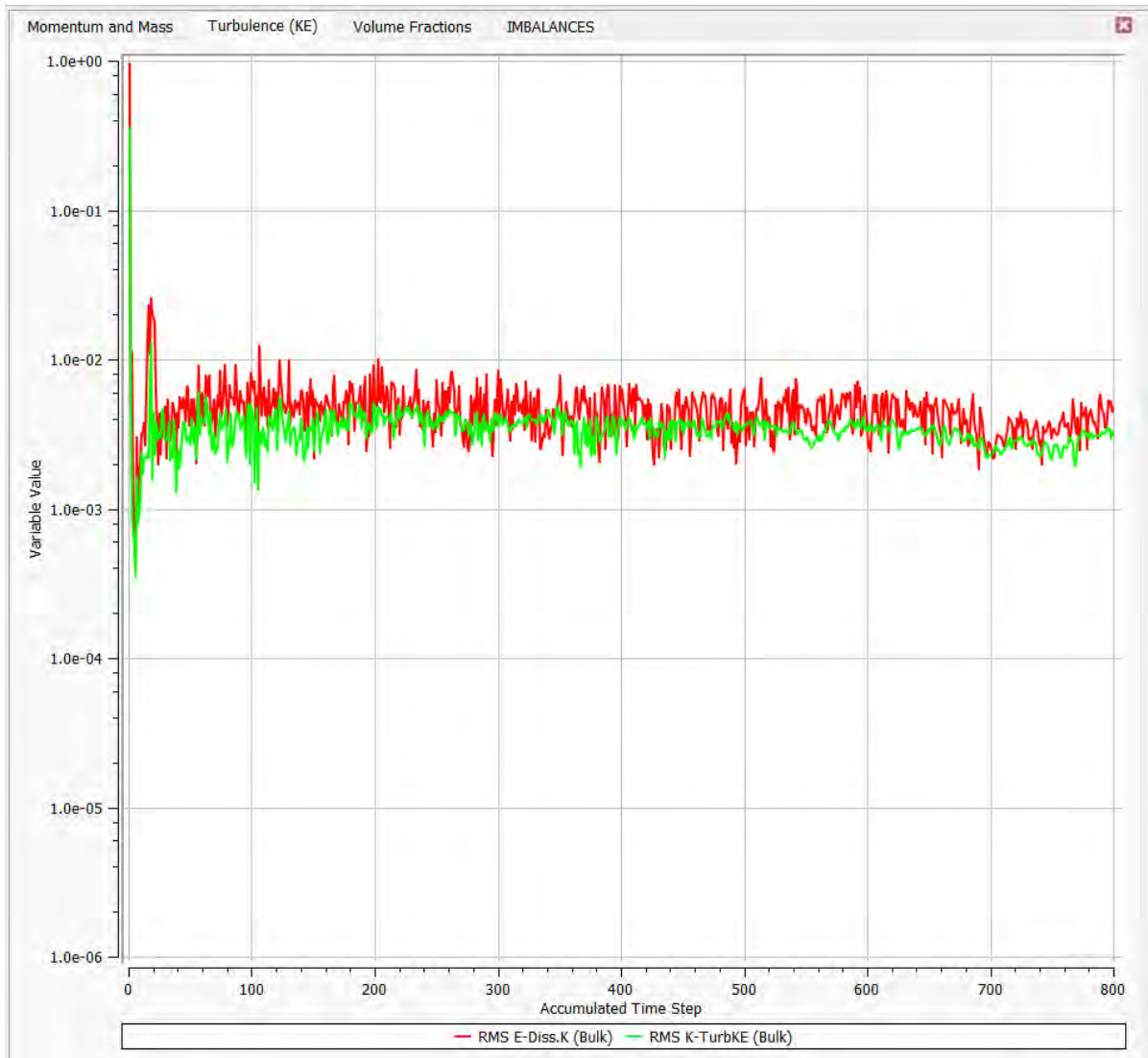
*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Momentum and Mass.*





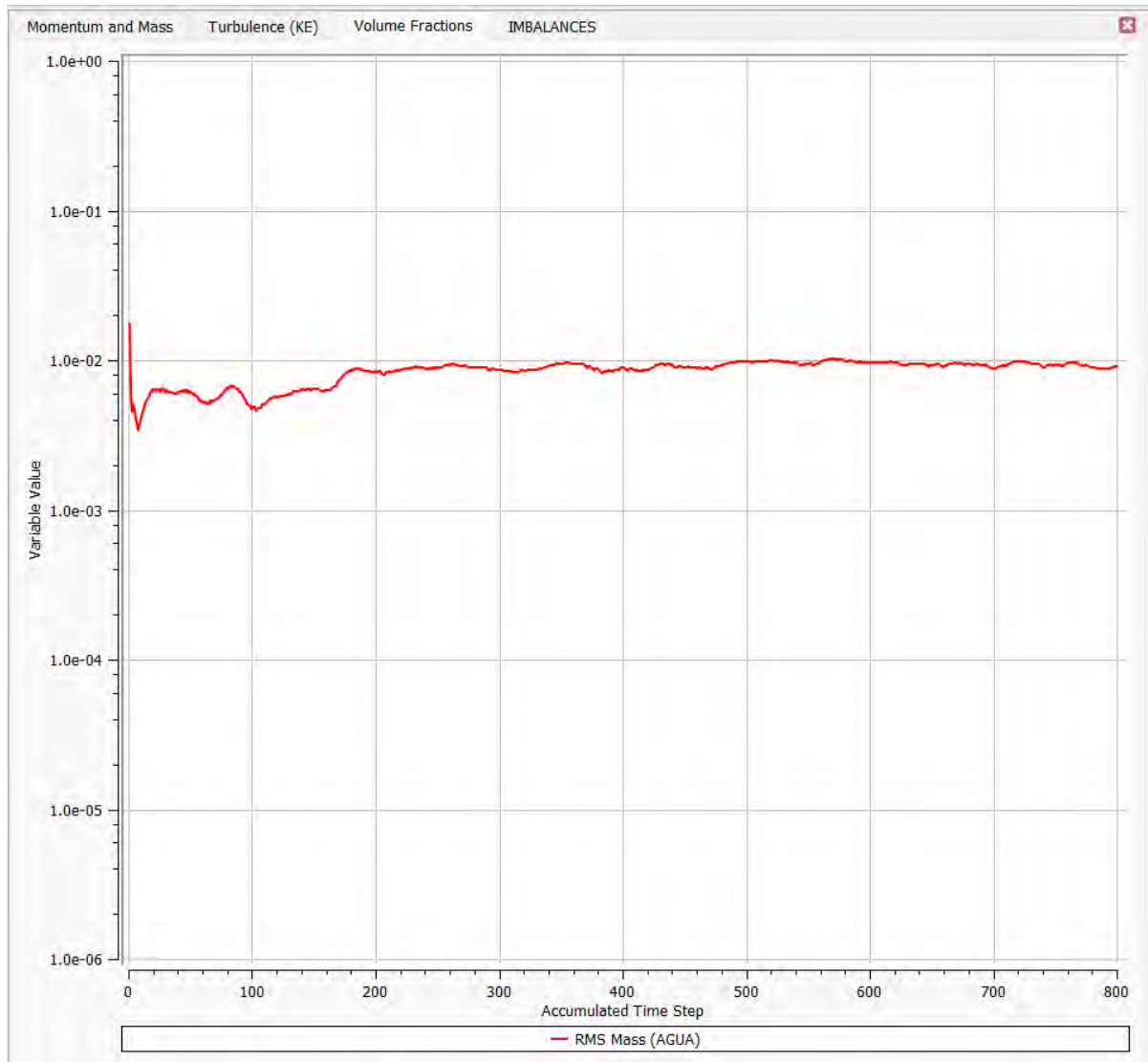
**Figura 106**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Turbulence (KE).*



**Figura 107**

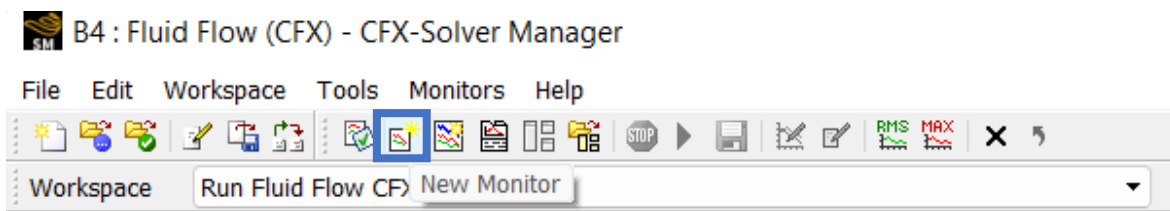
*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Volumen Fractions.*



Para obtener la gráfica de Imbalances, en la ventana del Solution Manager se debe hacer clic en la opción de New Monitor de la barra de herramientas, luego se debe nombrar el monitor como IMBALANCES, y finalmente dar clic en OK.

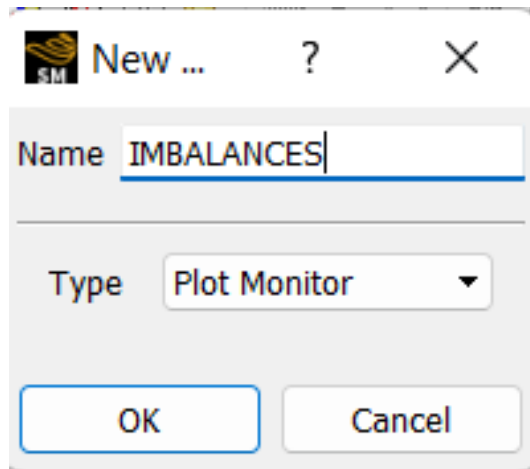
**Figura 108**

*Barra de herramientas de la ventana Solution Manager. Creación de un nuevo monitor.*



**Figura 109**

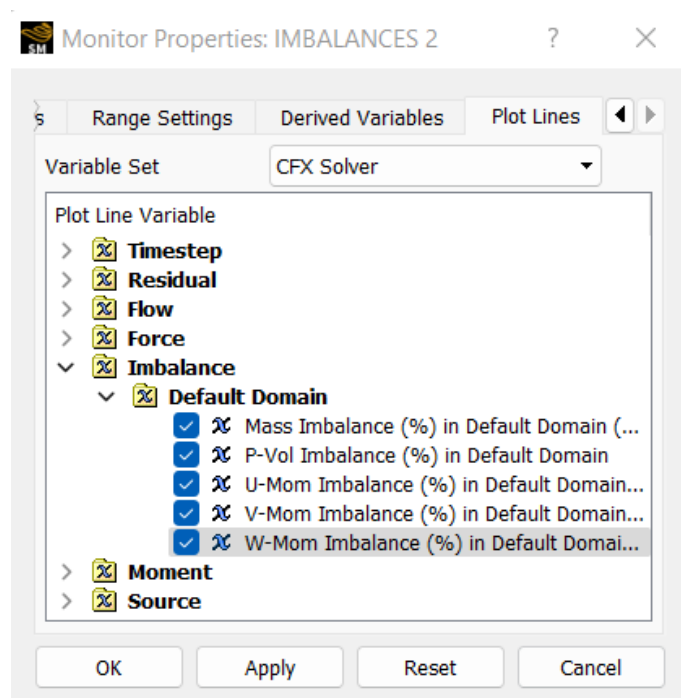
*Nombre del nuevo monitor: IMBALANCES.*



En la ventana *Monitor Properties: IMBALANCES*, se debe seleccionar las ecuaciones objeto de estudio, las cuales se encuentran en la ventana *Plot Line Variable*, en la región *IMBALANCE*, se despliega la opción *Default Domain*, y se selecciona todas las ecuaciones.

**Figura 110**

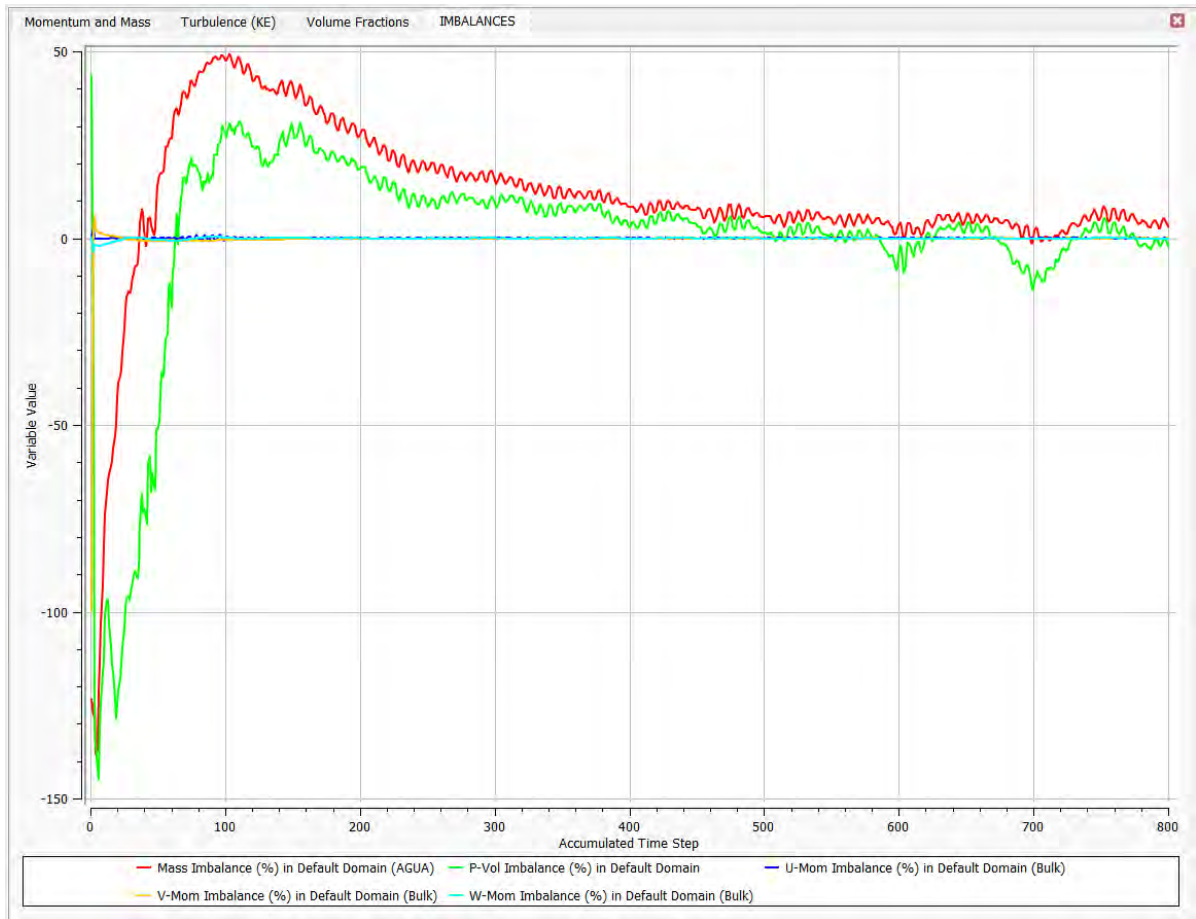
*Configuración del nuevo monitor: IMBALANCES.*



### c) Imbalances del mallado MultiZone:

**Figura 111**

*Gráfica de Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido del mallado MultiZone.*



**Figura 112**

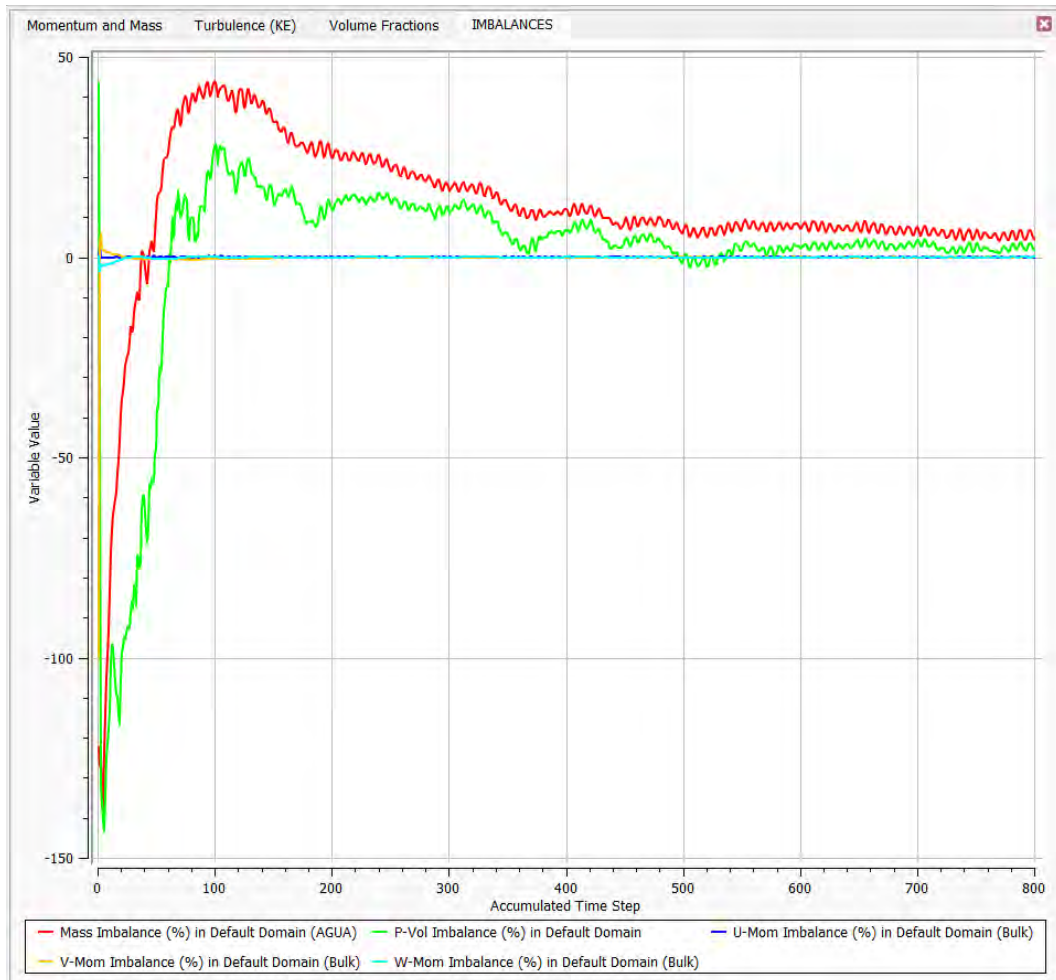
*Cuadro de Imbalances del mallado MultiZone.*

Normalised Imbalance Summary			
Equation	Maximum Flow	Imbalance (%)	
U-Mom-Bulk	1.7127E+07	-0.0368	
V-Mom-Bulk	1.7127E+07	0.0090	
W-Mom-Bulk	1.7127E+07	-0.0182	
P-Vol	1.9940E+04	-1.9803	
Mass-AGUA	1.9940E+04	3.0767	
Wall Force and Moment Summary			

**d) Imbalances del mallado Hex Dominant:**

**Figura 113**

*Gráfica de Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido del mallado Hex Dominat.*



**Figura 114**

*Cuadro de Imbalances del mallado Hex Dominat.*

Normalised Imbalance Summary		
Equation	Maximum Flow	Imbalance (%)
U-Mom-Bulk	1.7150E+07	-0.0066
V-Mom-Bulk	1.7150E+07	0.0121
W-Mom-Bulk	1.7150E+07	0.0140
P-Vol	1.9940E+04	1.7917
Mass-AGUA	1.9940E+04	4.5749

Wall Force and Moment Summary		
-------------------------------	--	--

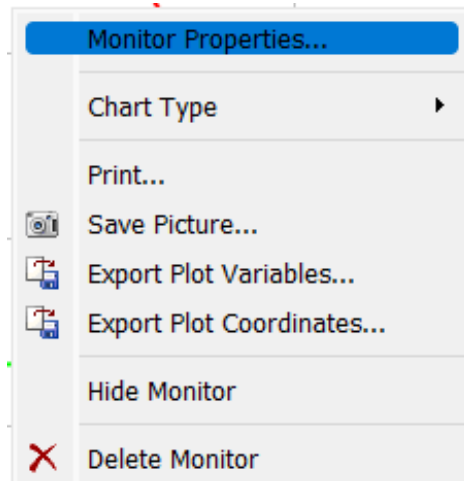


**e) Imbalances en un rango reciente:**

Para visualizar los imbalances en un rango más reciente, se hace clic en la ventana donde se muestran las curvas, y se selecciona la opción *Monitor Properties*.

**Figura 115**

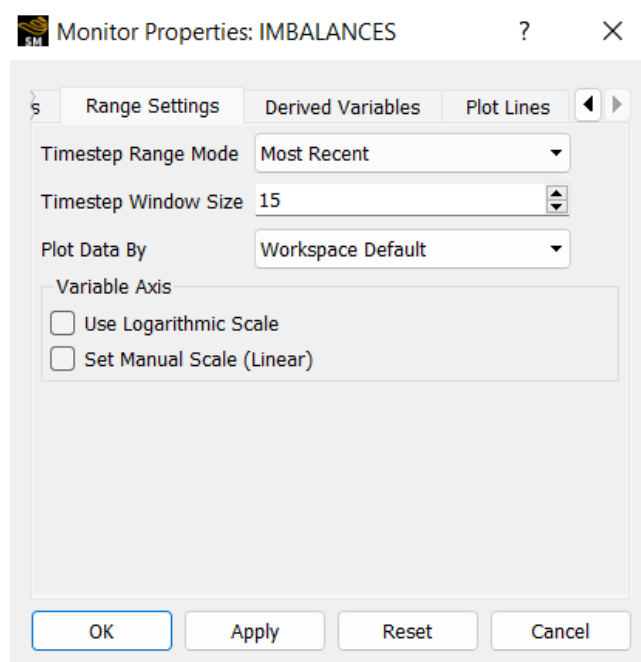
*Configuración del monitor de IMBALANCES.*



En la nueva ventana *Monitor Properties: IMBALANCES*, se selecciona la opción *Range Settings*, dentro de esta se tiene la opción *Timestep Range Mode*, en la que se selecciona la opción *Most Recente*, y en *Timestep Window Size* se escribe el valor del rango, en este caso 15 y se hace clic en *Apply*.

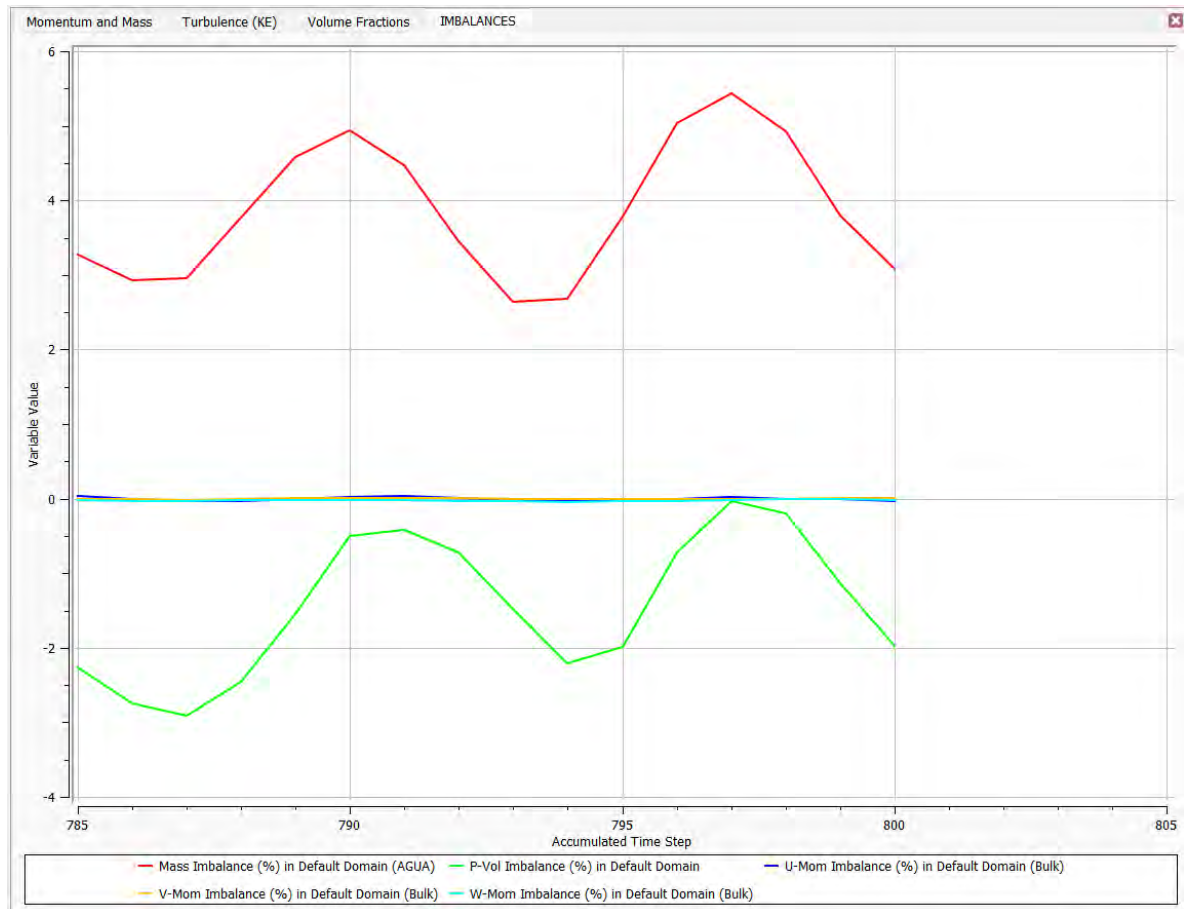
**Figura 116**

*Configuración del monitor de IMBALANCES para reducir el rango de visualización.*



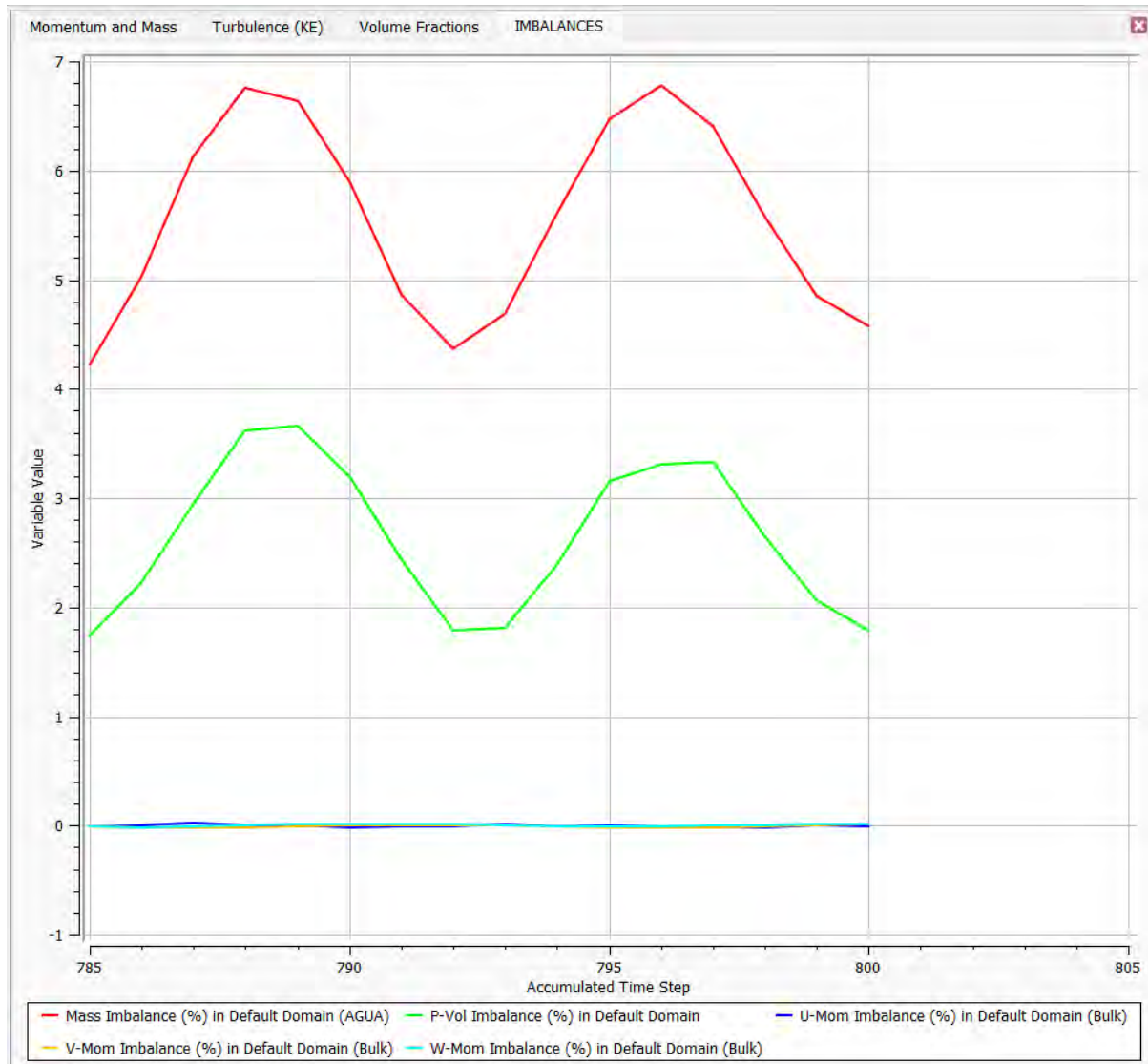
**Figura 117**

*Gráfica de Imbalances del mallado MultiZone en un rango de estudio más reciente.*



**Figura 118**

*Gráfica de Imbalances del mallado Hex Dominant en un rango de estudio más reciente.*



En la ventana de la izquierda se muestran los resultados obtenidos de las propiedades y características del fluido cuando el modelo ha convergido.

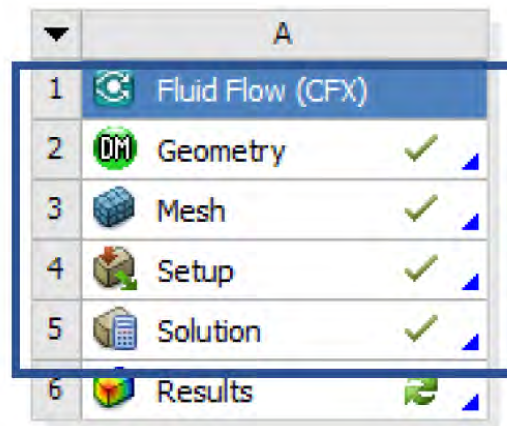
**Figura 119**

*Propiedades y características del fluido al final de la convergencia.*

Average Scale Information			
Domain Name : Default Domain			
Global Length		=	1.5311E+01
Minimum Extent		=	5.0000E+00
Maximum Extent		=	9.5350E+01
AIRE.Density		=	1.1850E+00
AIRE.Dynamic Viscosity		=	1.8310E-05
AIRE.Velocity		=	1.6196E+00
AIRE.Advection Time		=	9.4534E+00
AIRE.Reynolds Number		=	1.6049E+06
AIRE.Mass (Conservative)		=	2.1758E+03
AIRE.Mass (Normalised)		=	2.1758E+03
AIRE.Volume		=	1.8361E+03
AIRE.Volume Fraction		=	5.1156E-01
AGUA.Density		=	9.9700E+02
AGUA.Dynamic Viscosity		=	8.8990E-04
AGUA.Velocity		=	1.6196E+00
AGUA.Advection Time		=	9.4534E+00
AGUA.Reynolds Number		=	2.7782E+07
AGUA.Mass (Conservative)		=	1.7478E+06
AGUA.Mass (Normalised)		=	1.7478E+06
AGUA.Volume		=	1.7531E+03
AGUA.Volume Fraction		=	4.8844E-01
Wave Speed		=	1.2256E+01
Froude Number		=	1.3215E-01
Variable Range Information			
Domain Name : Default Domain			
Variable Name	min	max	
AIRE.Density	1.19E+00	1.19E+00	
AIRE.Specific Heat Capacity at Constant Pre	1.00E+03	1.00E+03	
AIRE.Dynamic Viscosity	1.83E-05	1.83E-05	
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	-4.14E+00	2.41E+00	
AGUA.Velocity v	-3.64E+00	5.02E+00	
AGUA.Velocity w	-3.18E+00	6.80E+00	
Pressure	-3.45E+03	3.47E+04	

Todos los gráficos y tablas del solucionador se obtienen al finalizar la convergencia, es decir, cuando los valores de RMS llegan a 0.0001, o cuando se llega al número máximo de iteraciones establecidas en el *Setup*, 800 para este caso.

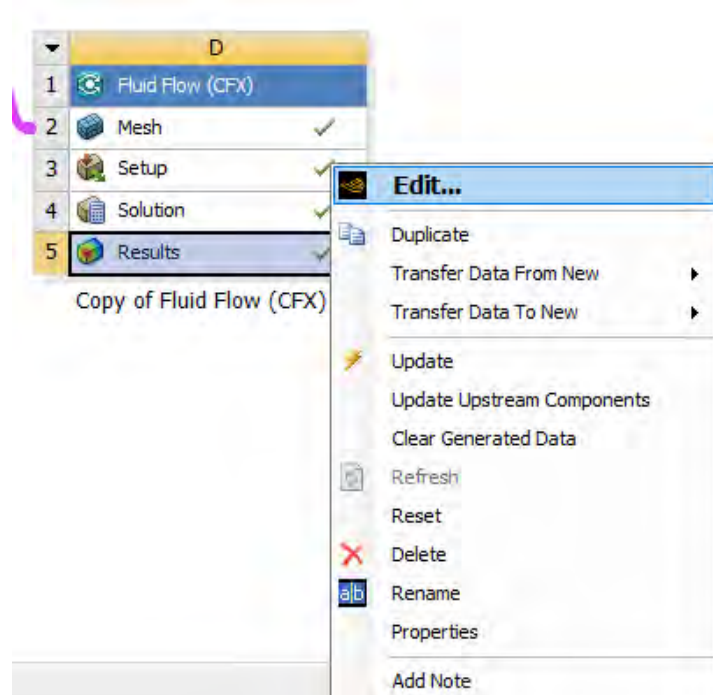
Cuando se finaliza la solución, se verifica que la opción *Solution* en la ventana Workbench tiene un check verde.

**Figura 120***Comprobación del proceso en Solution.*

### 4.3 Etapa 3: Post-Procesamiento

En esta etapa se evaluará los resultados obtenidos de la modelación, vectores de velocidad, perfiles de velocidad, fracción de volumen en un plano longitudinal, presiones, líneas de corriente, volumen de velocidad, volumen de velocidad en una fracción de volumen, los cuales serán analizados y comparados con el modelo físico original.

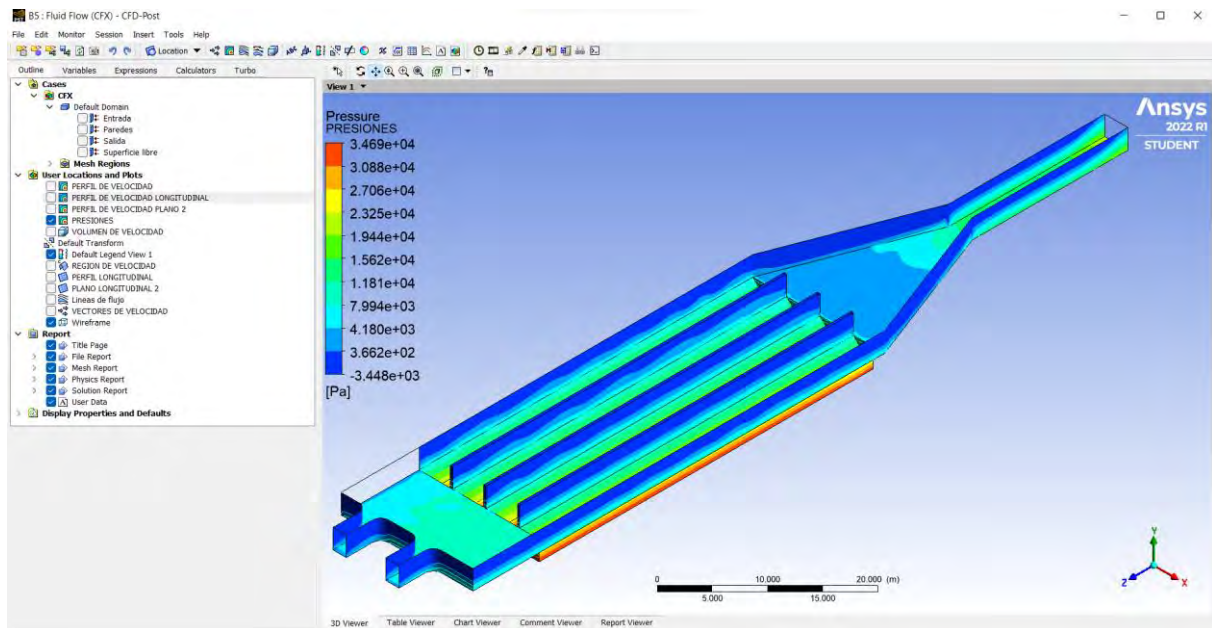
Para ingresar a la ventana de resultados, en la ventana de *Workbench* se hace clic en la opción *Results*, y se selecciona la opción *Edit*.

**Figura 121***Pasos para abrir la ventana de Result.*



**Figura 122**

*Vista preliminar del modelo físico original a escala en la ventana Results – CFD-Post.*



#### 4.3.1 Vectores de velocidad

Pasos para visualizar los gráficos de vectores de velocidad de la modelación:

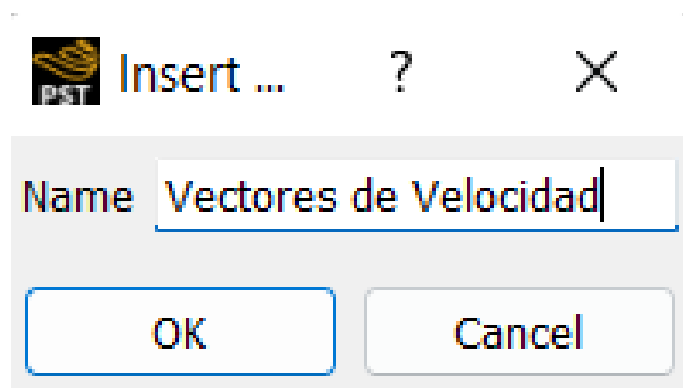
- En la barra de herramientas se selecciona la opción Vector, en la nueva ventana se nombra el gráfico como Vectores de Velocidad, luego se hace clic en Ok, y se procede con la configuración de los detalles del gráfico.

**Figura 123**

*Barra de Herramientas de la interfaz CFD-Post.*

**Figura 124**

*Creación del gráfico de vectores de velocidad en la interfaz CFD-Post.*

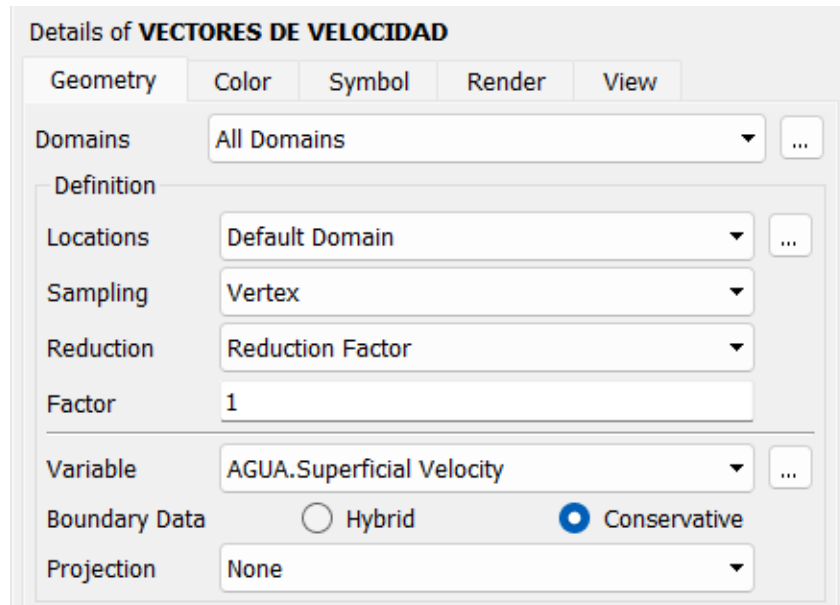


La configuración de los detalles del gráfico son los siguientes:

- Variable: AGUA.Superficial Velocity

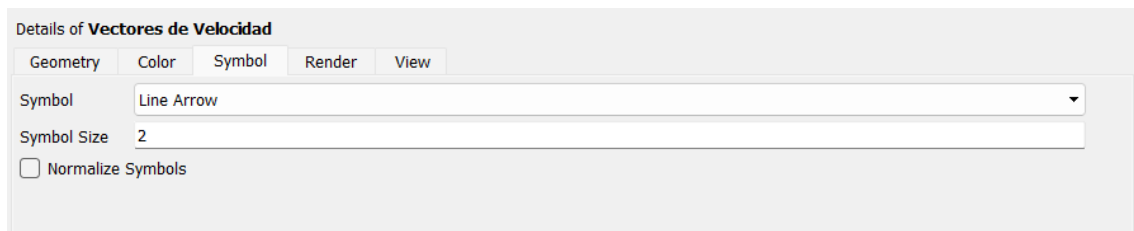
**Figura 125**

*Configuración de geometry para los gráficos de vectores de velocidad.  
(Variable: AGUA.Superficial Velocity).*



**Figura 126**

*Configuración de Symbol para los gráficos de vectores de velocidad.*

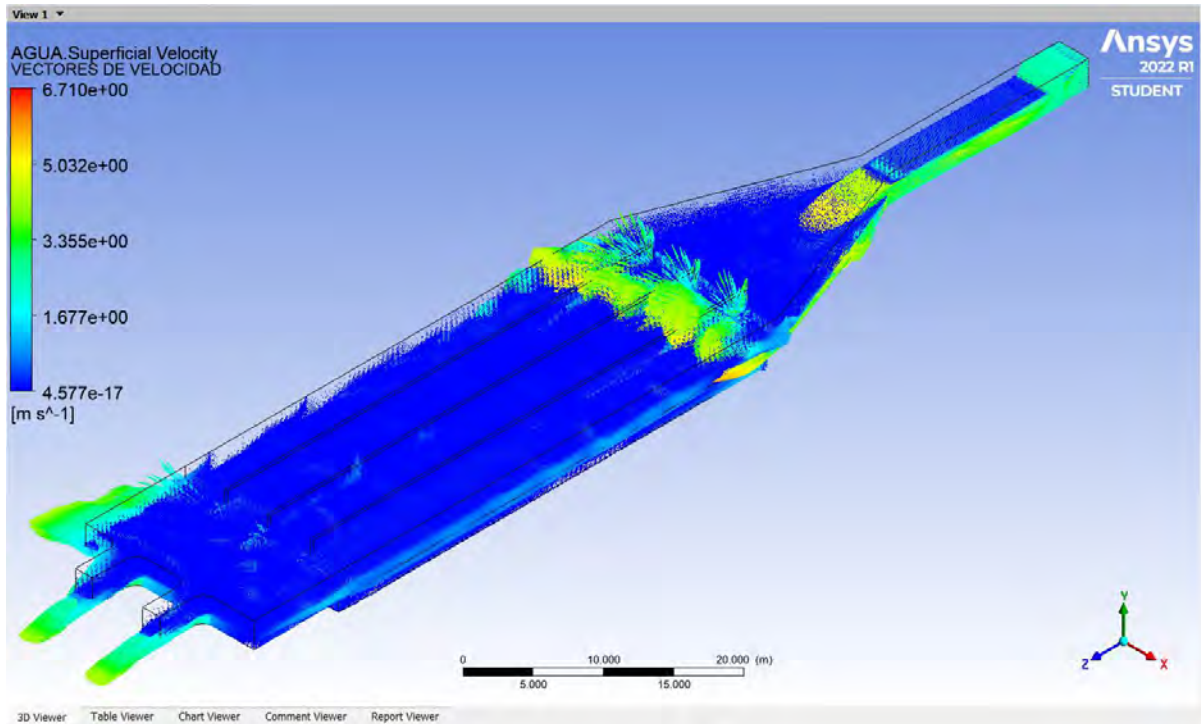


Una vez terminada la configuración se hace clic en *Apply* y se podrán visualizar los gráficos.

Los gráficos de Vectores de Velocidad son los siguiente:

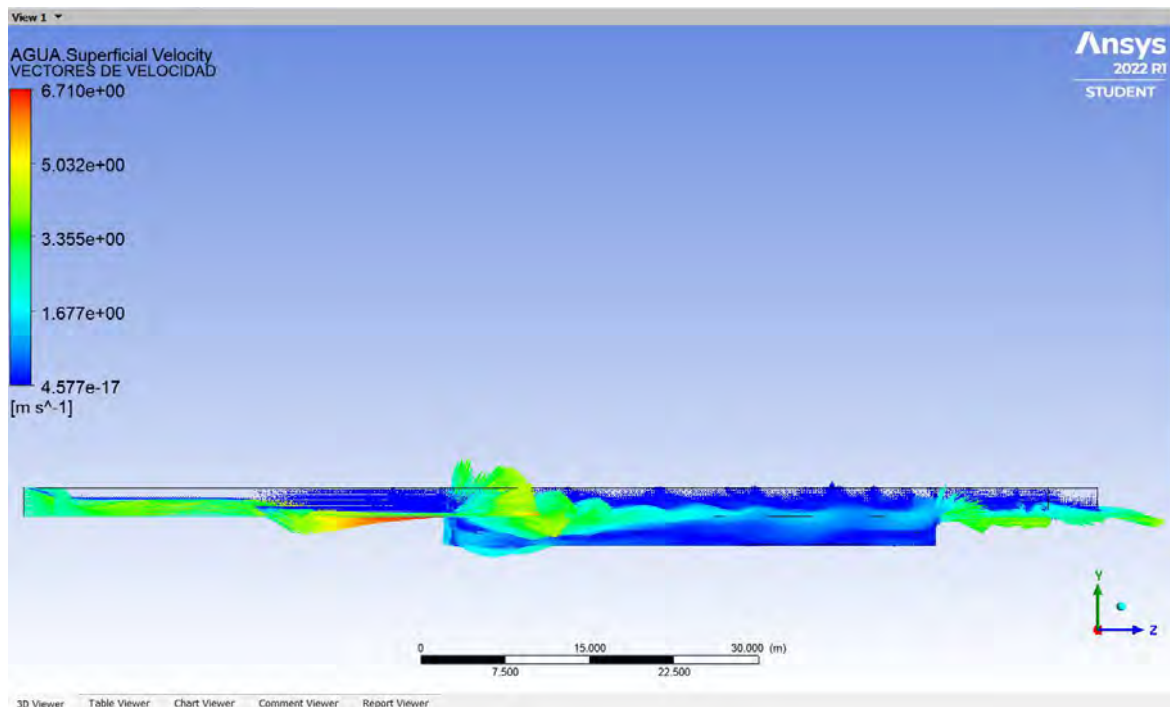
**Figura 127**

*Vectores de velocidad en el modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*



**Figura 128**

*Vectores de velocidad en un perfil longitudinal en el modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*

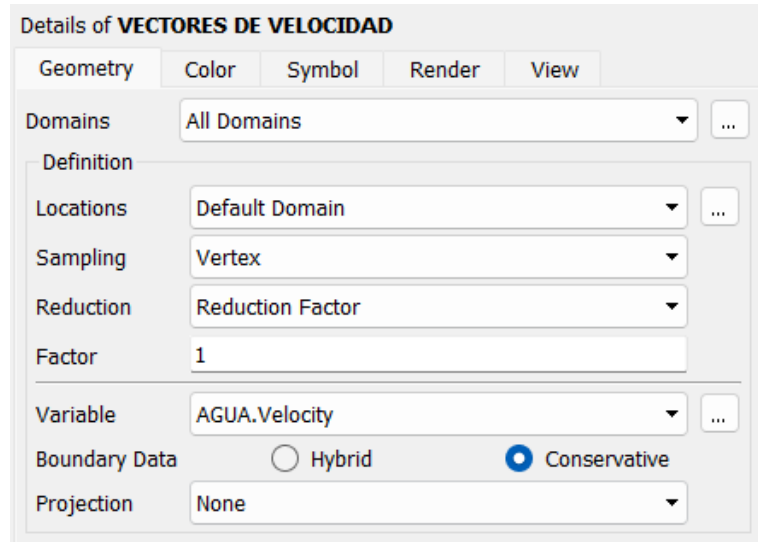


Se observa una velocidad máxima de 6.7097 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $4.5768 \times 10^{-17}$  m/s en las naves.

- Variable: AGUA.Velocity.

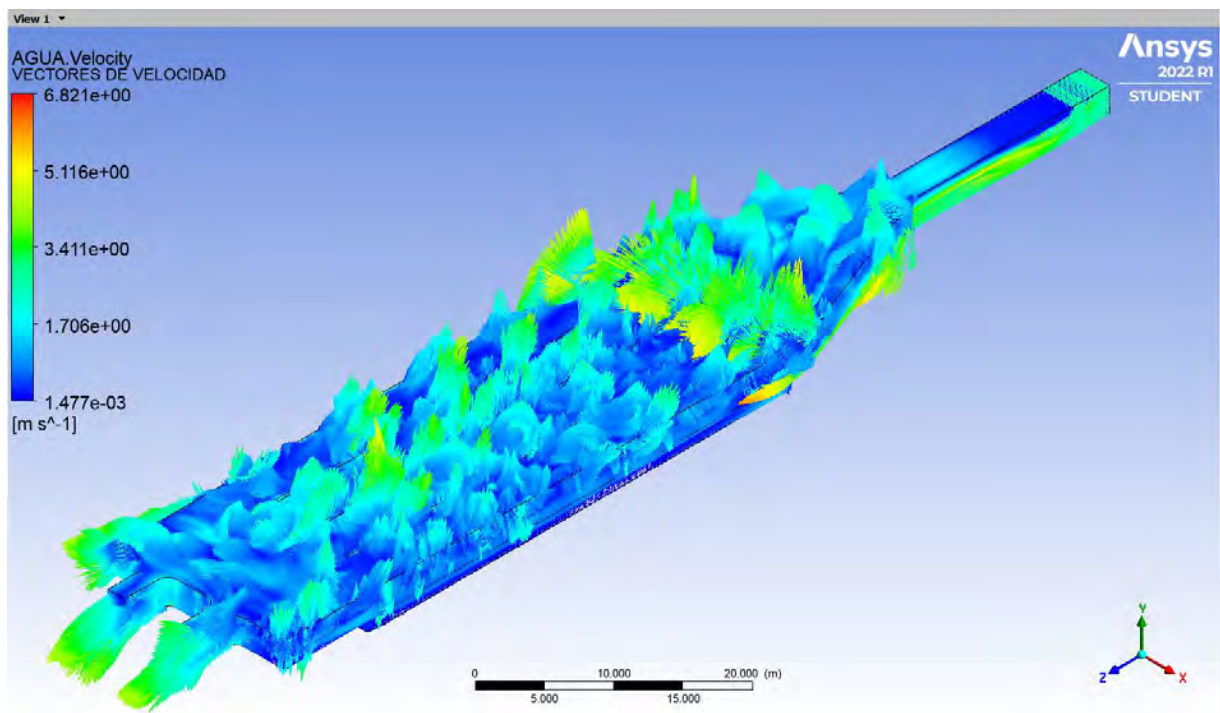
**Figura 129**

*Configuración de geometry para los gráficos de vectores de velocidad.  
(Variable: AGUA.Velocity).*



**Figura 130**

*Vectores de velocidad en el modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*



Se observa una velocidad máxima de 6.8207 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $1.477 \times 10^{-3}$  m/s en las naves.

#### 4.3.2 Perfiles de velocidad

Pasos para visualizar los gráficos de perfiles de velocidad de la modelación:

- En la barra de herramientas se selecciona la opción *Contour*, en la nueva ventana se nombra el gráfico como Perfil de velocidad en la entrada, en la salida, en un plano transversal, y en un plano longitudinal, luego se hace clic en Ok, y se procede con la configuración de los detalles para cada gráfico.

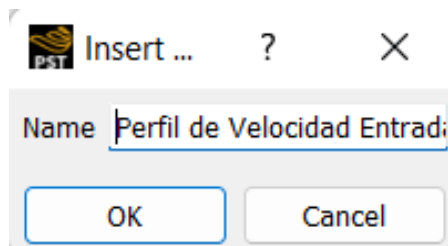
**Figura 131**

*Barra de Herramientas de la interfaz CFD-Post.*



**Figura 132**

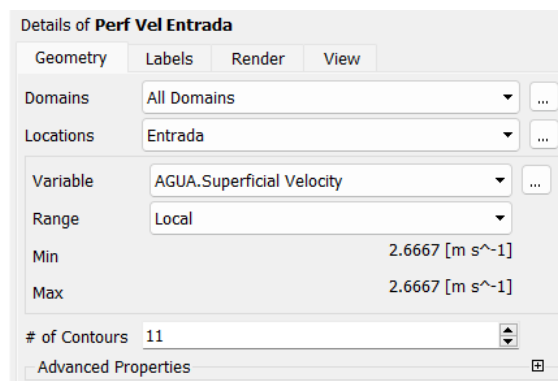
*Creación del gráfico de perfiles de velocidad en la interfaz CFD-Post.*



##### 4.3.2.1 Entrada

**Figura 133**

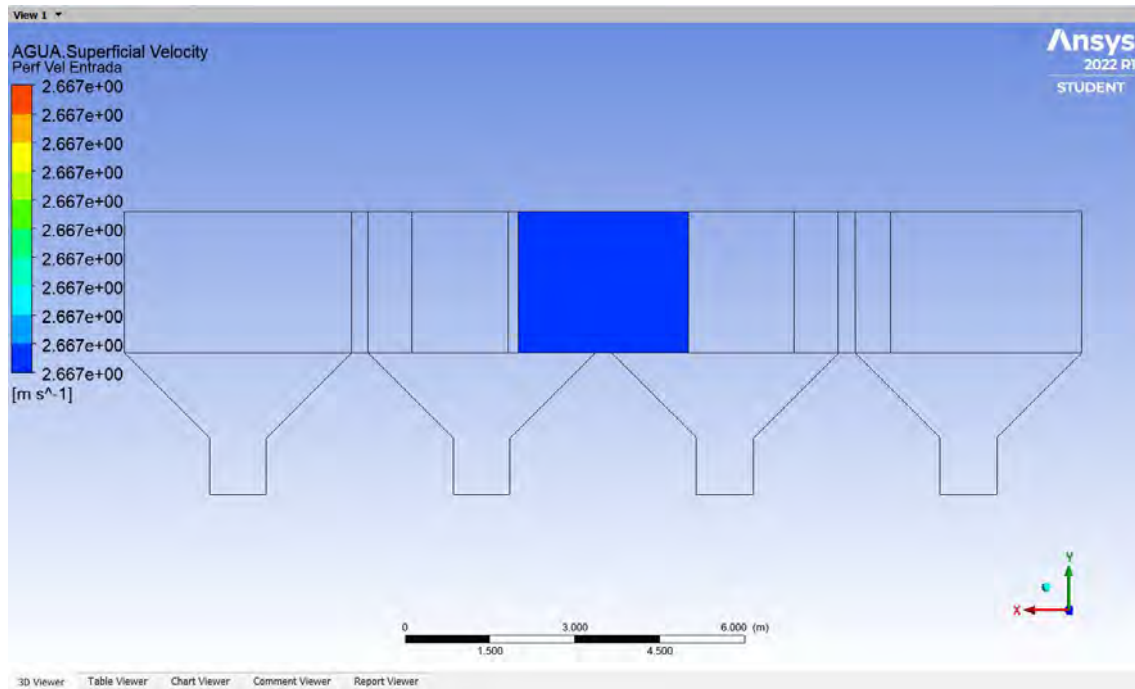
*Configuración de Geometry para los gráficos de perfiles de velocidad en la entrada del canal aguas arriba del desarenador. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).*





**Figura 134**

*Perfil de velocidad en la entrada del canal aguas arriba del desarenador.*

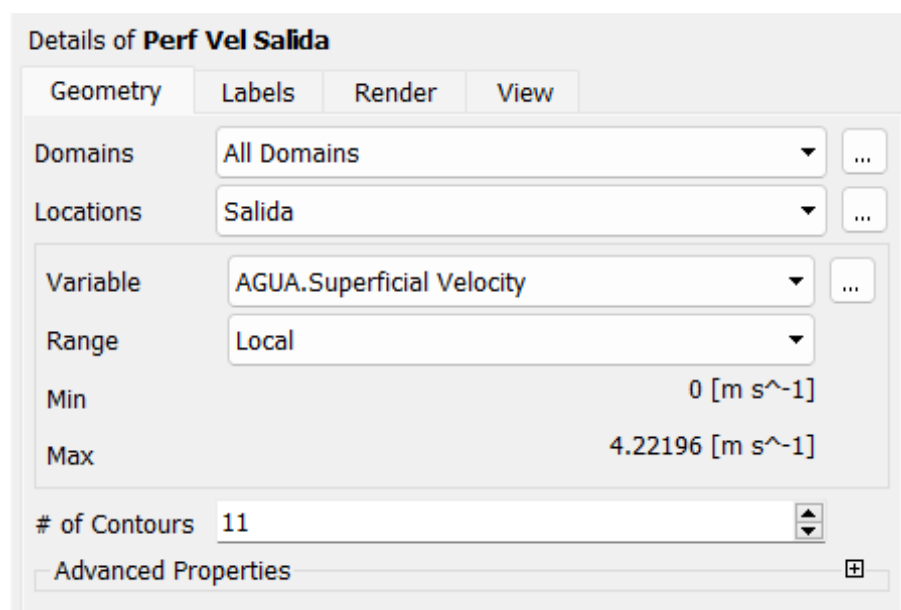


Se observa que la velocidad es de 2.6667 m/s, la misma que se definió como condición de borde en la configuración del *Stup*.

#### 4.3.2.2 Salida

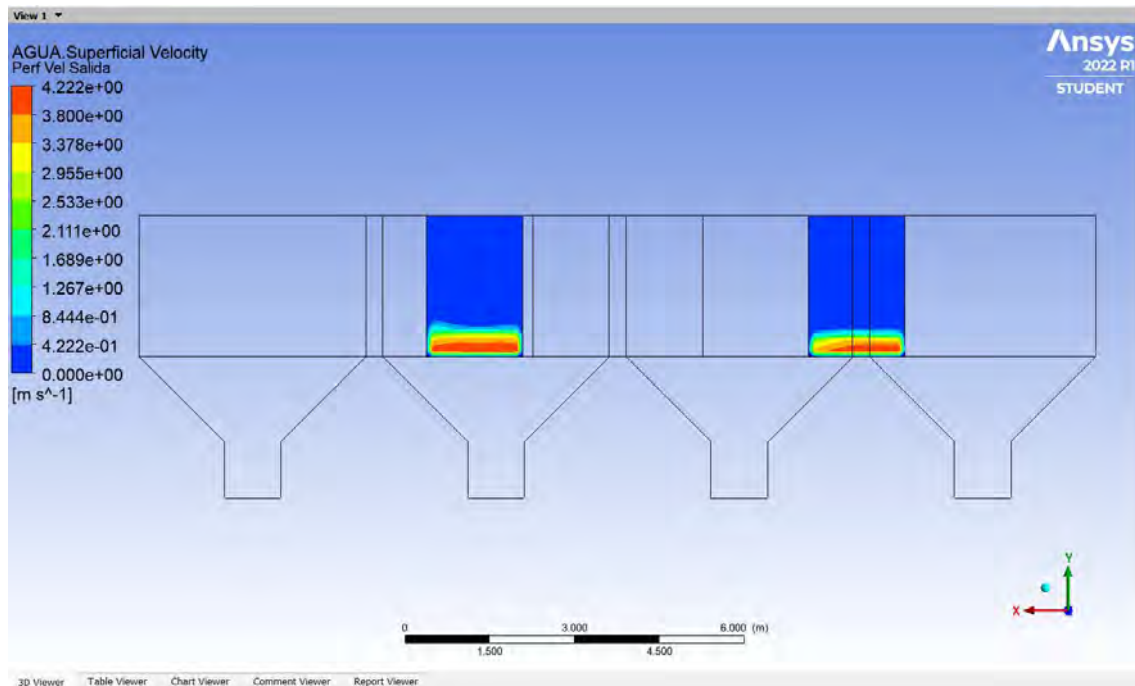
**Figura 135**

*Configuración de Geometry para los gráficos de perfiles de velocidad en la salida del desarenador. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).*

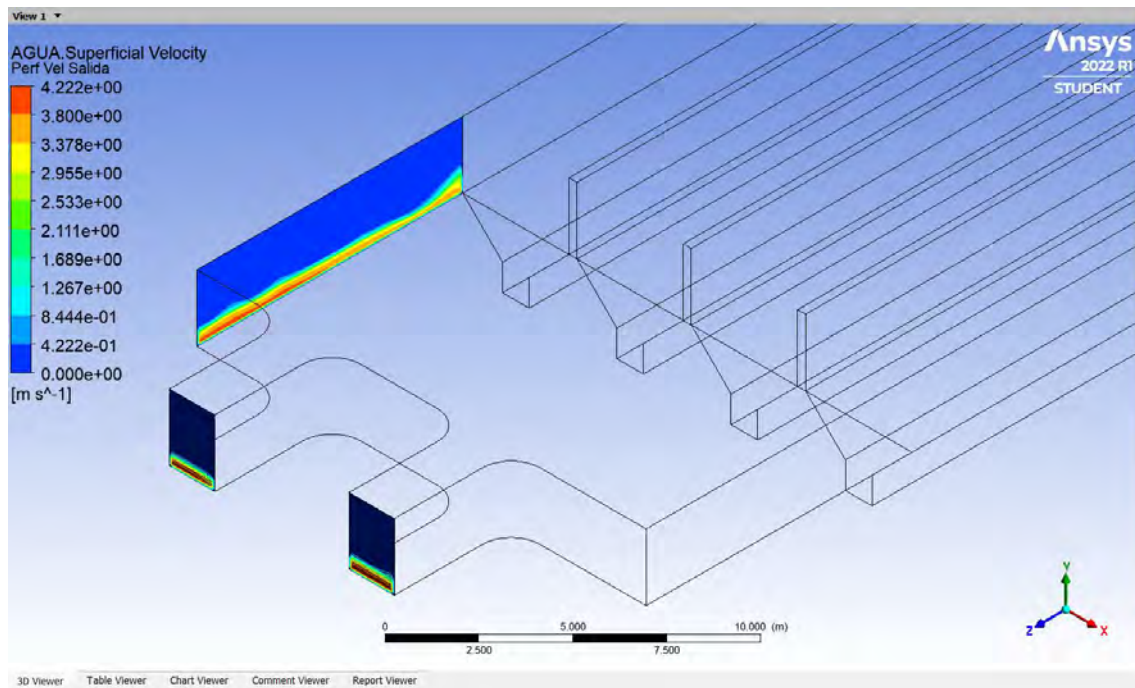


**Figura 136**

*Perfil de velocidad en la salida del desarenador.*

**Figura 137**

*Perfil de velocidad en la salida del desarenador.*



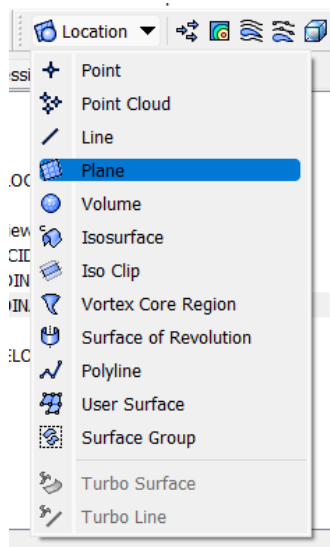
Se observa que la máxima velocidad es de 4.222 m/s.

### 4.3.2.3 En un plano transversal

Para crear un plano, en la barra de herramientas se selecciona la opción *Location*, luego se selecciona la opción *Plane*, en la nueva ventana se nombra el gráfico como Plano Transversal o Plano Longitudinal, según corresponda, y finalmente se hace clic en Ok para proceder con la configuración de los detalles para cada gráfico.

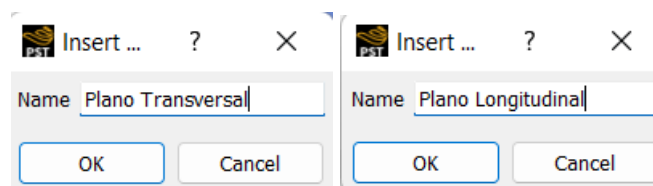
**Figura 138**

*Barra de herramientas de la interfaz CFD-Post. Creación de un plano.*



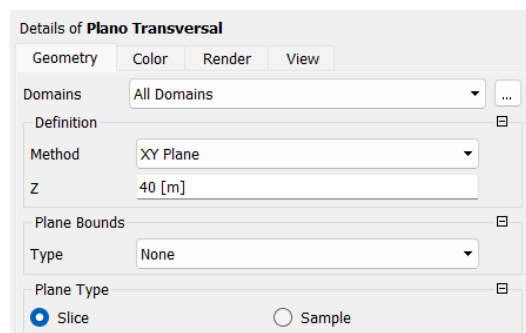
**Figura 139**

*Creación de los planos transversal y longitudinal en la interfaz CFD-Post.*



**Figura 140**

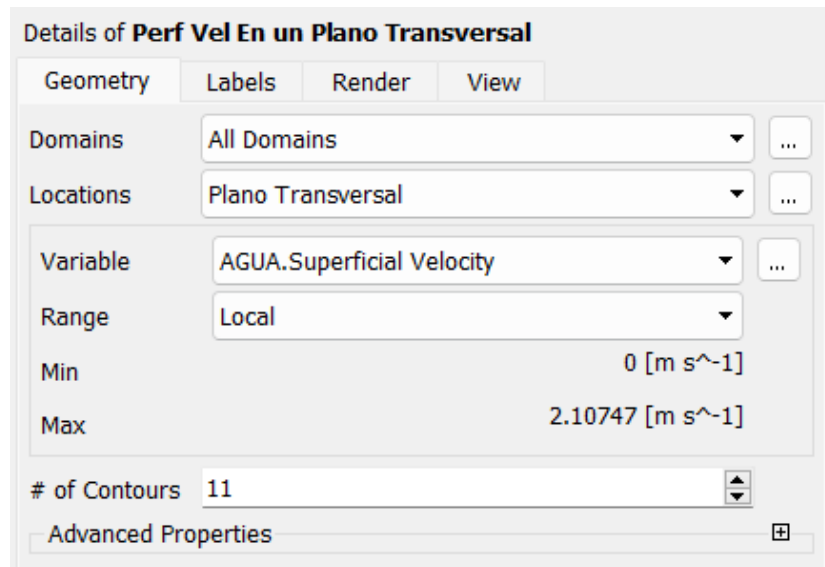
*Configuración de Geometry para el plano transversal.*



El perfil de velocidad en estos nuevos planos se crea como antes ya se había descrito, solo cambiaría la ubicación (*locations*), la configuración es como se indica a continuación (ver figuras 141 y 142):

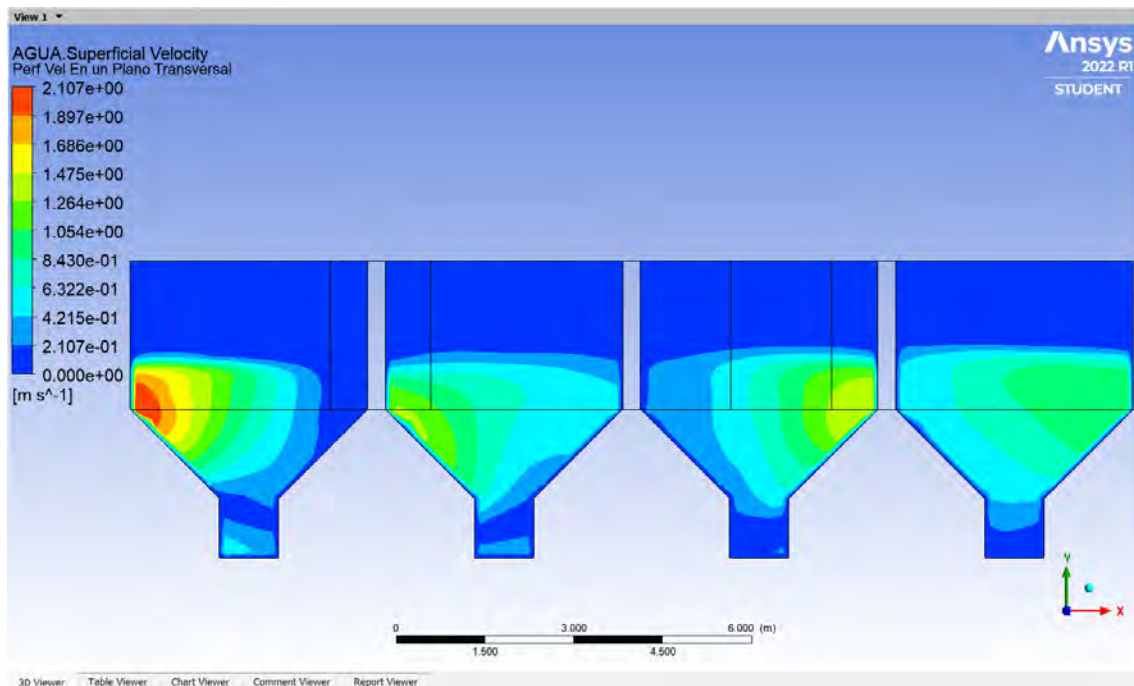
**Figura 141**

*Configuración de Geometry del perfil de velocidad en un plano transversal.  
(Variable: AGUA.Superficial Velocity).*



**Figura 142**

*Perfiles de velocidad en un plano transversal.*



Se observa que la máxima velocidad en un plano transversal es de 2.107 m/s, este plano está a 40 m en la dirección Z, y se ubica en las naves del desarenador.

#### 4.3.2.4 En un plano longitudinal

**Figura 143**

*Configuración de Geometry para el plano longitudinal.*

Details of **Plano Longitudinal**

Geometry Color Render View

Domains All Domains ...

Definition

Method YZ Plane

X 8 [m]

Plane Bounds

Type None

Plane Type

☒ Slice ☐ Sample

**Figura 144**

*Configuración de Geometry del perfil de velocidad en un plano longitudinal. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).*

Details of **Perf Vel En un Plano Longitudinal**

Geometry Labels Render View

Domains All Domains ...

Locations Plano Longitudinal ...

Variable AGUA.Superficial Velocity ...

Range Local

Min 0 [m s<sup>-1</sup>]

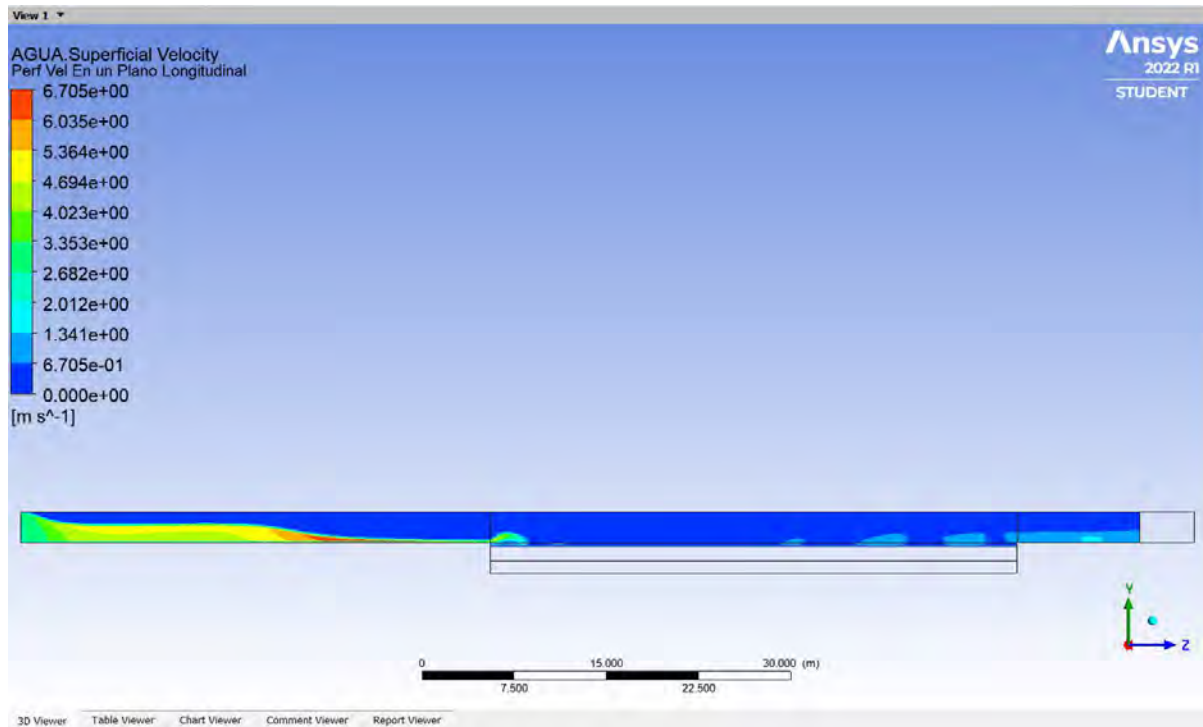
Max 6.70548 [m s<sup>-1</sup>]

# of Contours 11

Advanced Properties

**Figura 145**

*Perfiles de velocidad en un plano longitudinal.*



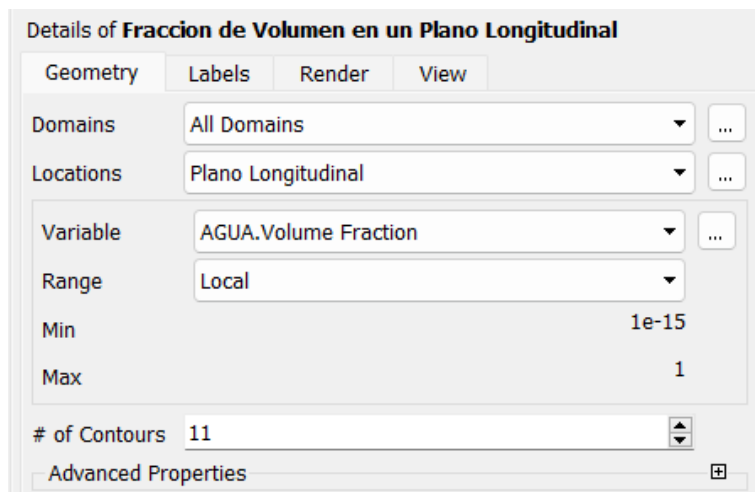
Se observa que la máxima velocidad es de 6.7055 m/s en la transición de entrada y el desarenador y en el ingreso de las naves.

#### 4.3.3 Fracción de volumen en un plano longitudinal

Es un perfil de velocidad en un plano longitudinal, pero la variable es *AGUA.Volume Fraction*. A continuación, se muestra el detalle de la configuración (ver figura 146):

**Figura 146**

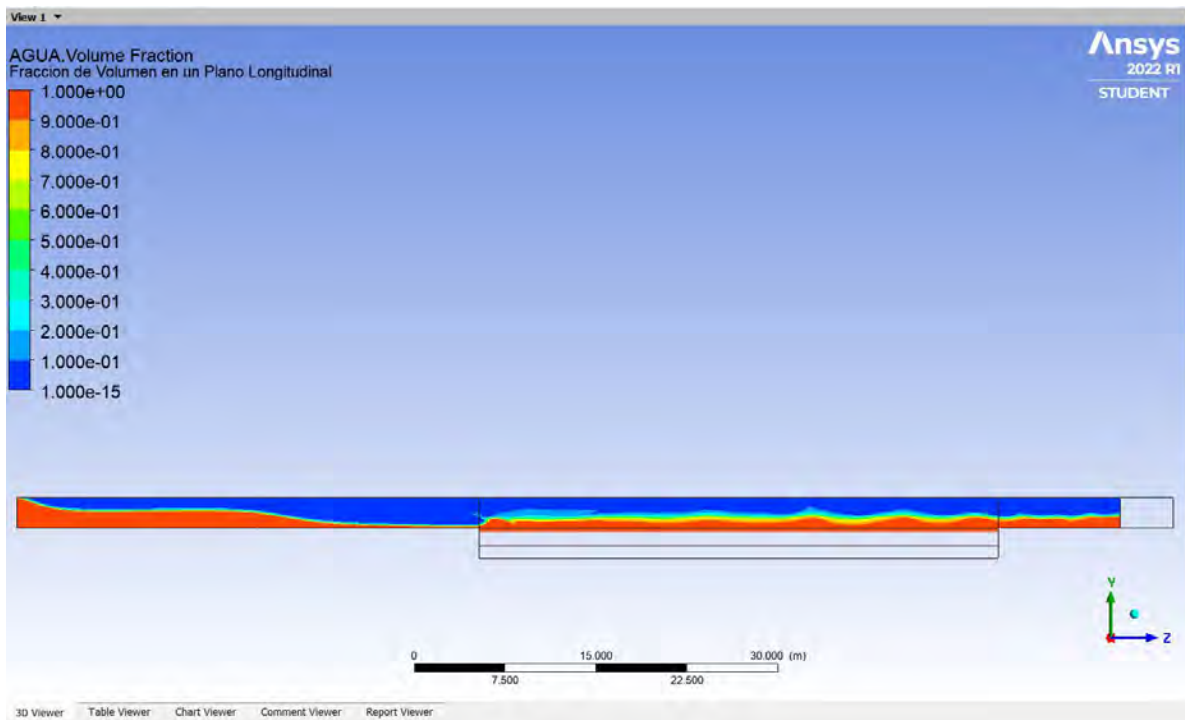
*Configuración de Geometry del perfil de velocidad: Fracción de volumen en un plano longitudinal. (Variable: AGUA.Volumen Fraction).*





**Figura 147**

*Perfiles de velocidad: Fracción de volumen en un plano longitudinal, para una velocidad de flujo en la entrada del canal aguas arriba del desarenador de 2.6667 m/s.*

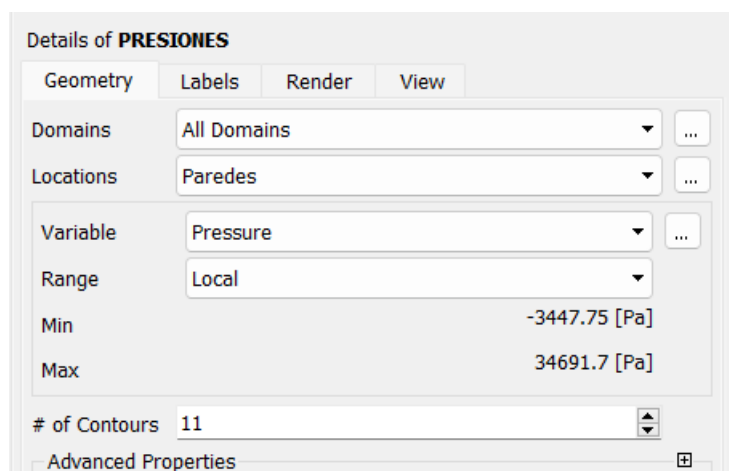


#### 4.3.4 Presiones

Para visualizar la gráfica de presiones en las paredes del desarenador, se inserta un perfil de velocidad como antes se había descrito, con el nombre de Presiones, la variable en este caso sería *Pressure* y su configuración es la siguiente (ver figura 148):

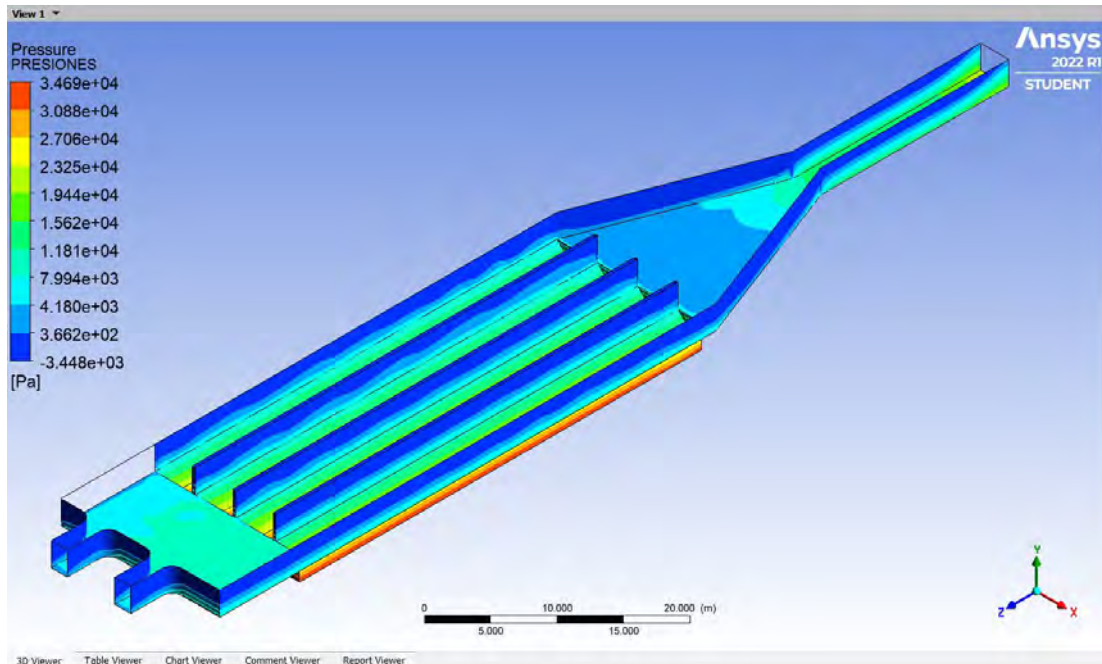
**Figura 148**

*Configuración de Geometry del perfil de velocidad de presiones en las paredes del desarenador. (Variable: Pressure).*



**Figura 149**

*Perfiles de velocidad de presiones en las paredes del desarenador.*



Se observa una presión mínima de - 3447.75 [Pa] y una presión máxima de 34691.7 [Pa] en las paredes de las naves del desarenador.

#### 4.3.5 Líneas de corriente

Pasos para visualizar las gráficas de Líneas de corriente:

- En la barra de herramientas se selecciona la opción *Streamline*, en la nueva ventana se nombra el gráfico como Líneas de Corriente, luego se hace clic en Ok, y se procede con la configuración de los detalles del gráfico.

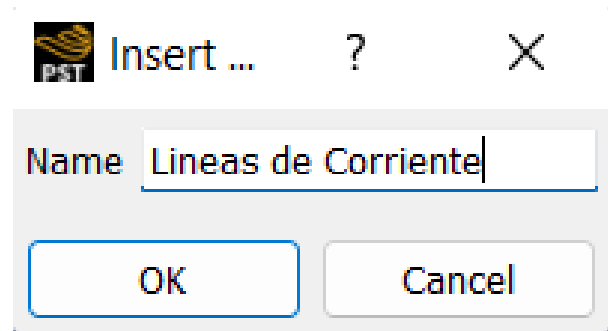
**Figura 150**

*Barra de Herramientas de la interfaz CFD-Post.*



**Figura 151**

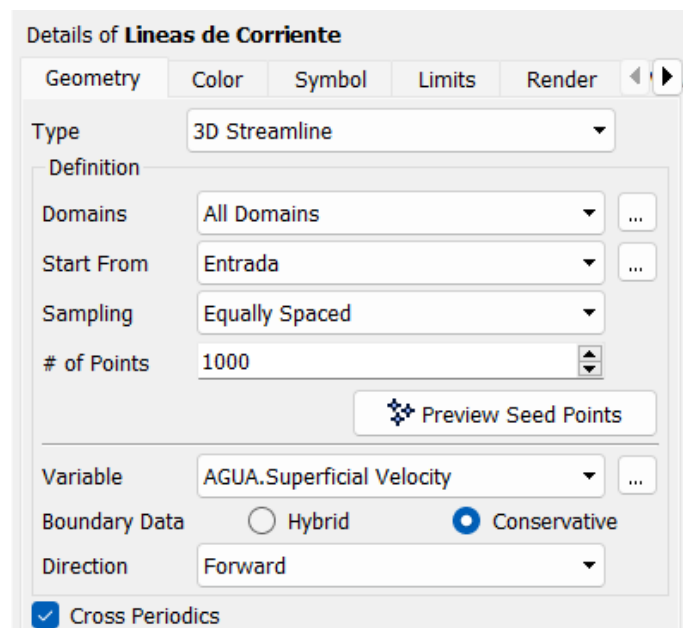
*Creación del gráfico de líneas de corriente en la interfaz CFD-Post.*



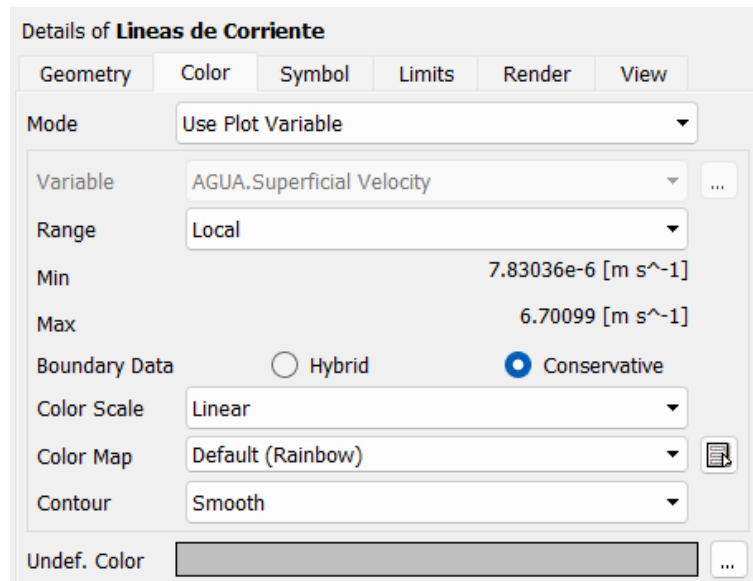
- Variable: AGUA.Superficial Velocity

**Figura 152**

*Configuración de Geometry para los gráficos de líneas de corriente.  
(Variable: AGUA.Superficial Velocity).*

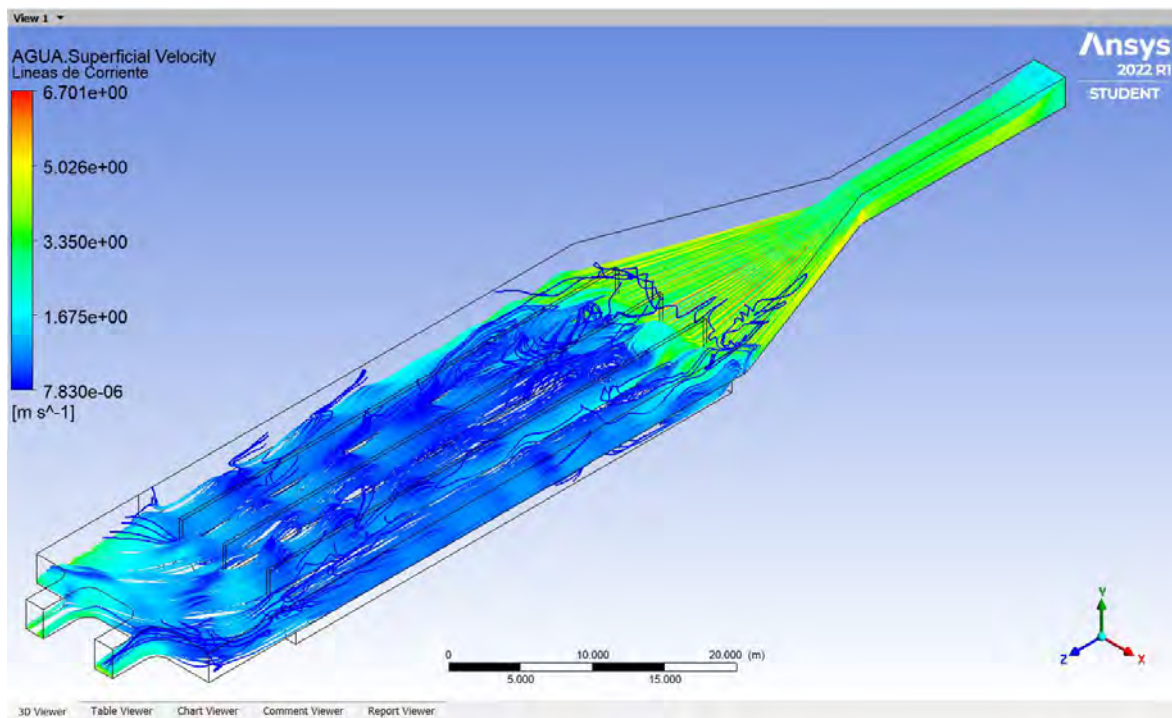


**Figura 153:** Configuración de Color para los gráficos de líneas de corriente.  
(Variable: AGUA.Superficial Velocity).



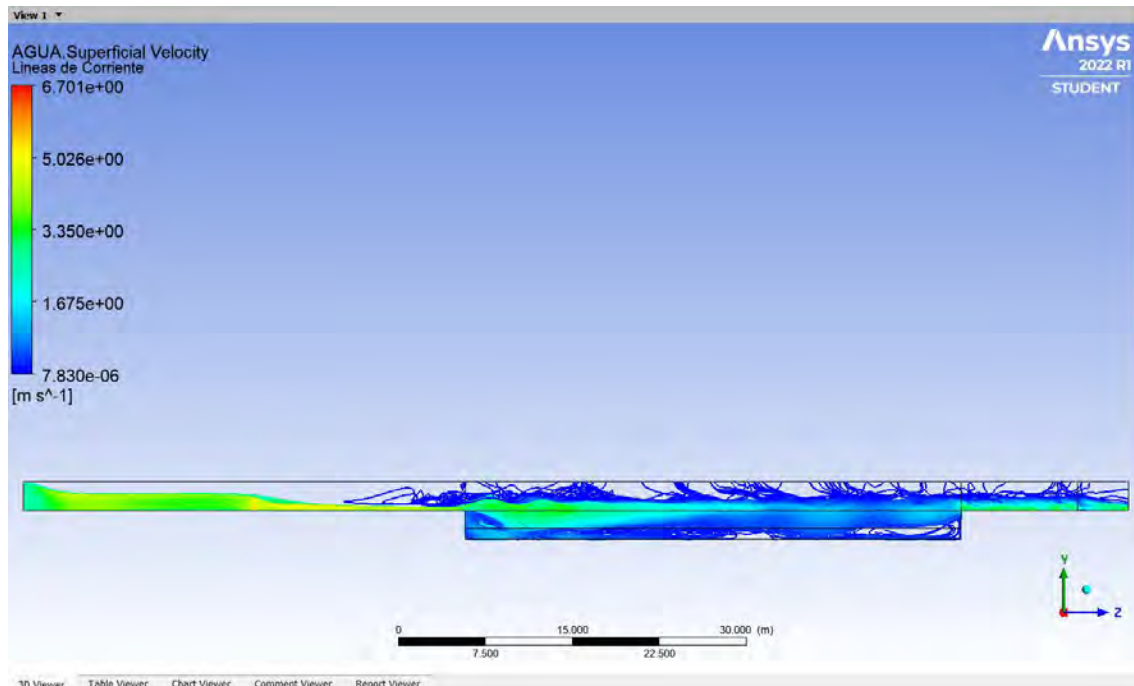
**Figura 154**

*Líneas de corriente del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*



**Figura 155**

*Líneas de corriente en un perfil longitudinal del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*

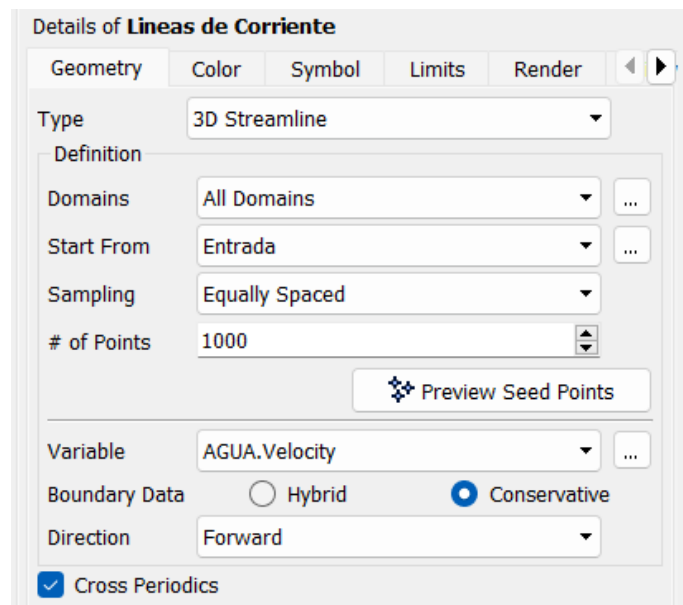


Se observa una velocidad máxima de 6.701 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $7.8304 \times 10^{-6}$  m/s en las naves.

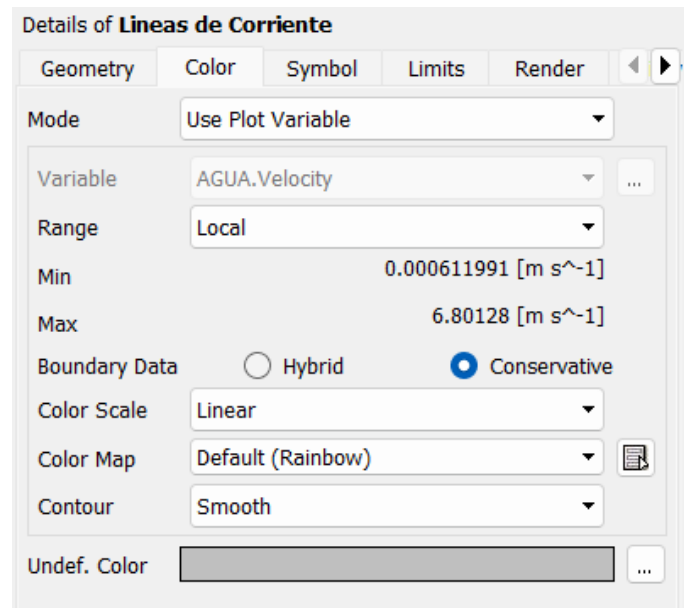
- Variable: AGUA. Velocity

**Figura 156**

*Configuración de Geometry para los gráficos de líneas de corriente. (Variable: AGUA. Velocity).*

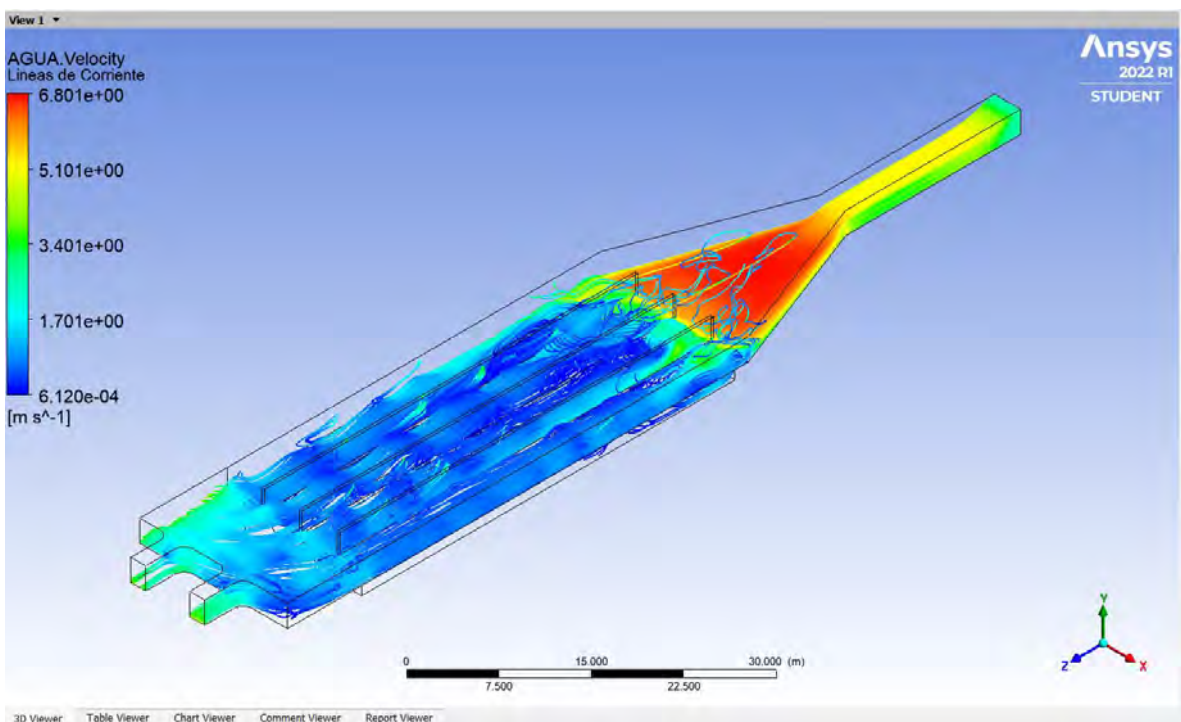


**Figura 157:** Configuración de Color para los gráficos de líneas de corriente. (Variable: AGUA.Velocity).



**Figura 158**

Líneas de corriente de los vectores de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.



Se observa una velocidad máxima de 6.8013 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida, y una velocidad mínima de  $6.12 \times 10^{-4}$  m/s en las naves.



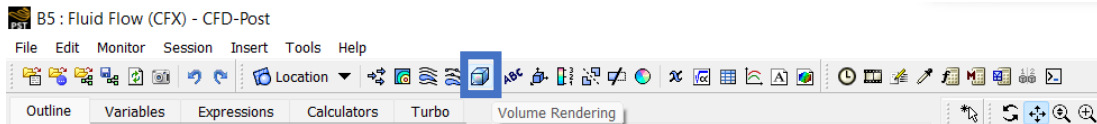
### 4.3.6 Volumen de velocidad

Pasos para visualizar las gráficas de volumen de velocidad:

- En la barra de herramientas se selecciona la opción *Volume Rendering*, en la nueva ventana se nombra el gráfico como Volumen de Velocidad, luego se hace clic en Ok, y se procede con la configuración de los detalles del gráfico.

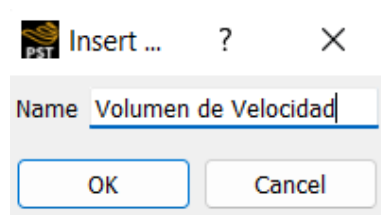
**Figura 159**

*Barra de Herramientas de la interfaz CFD-Post.*



**Figura 160**

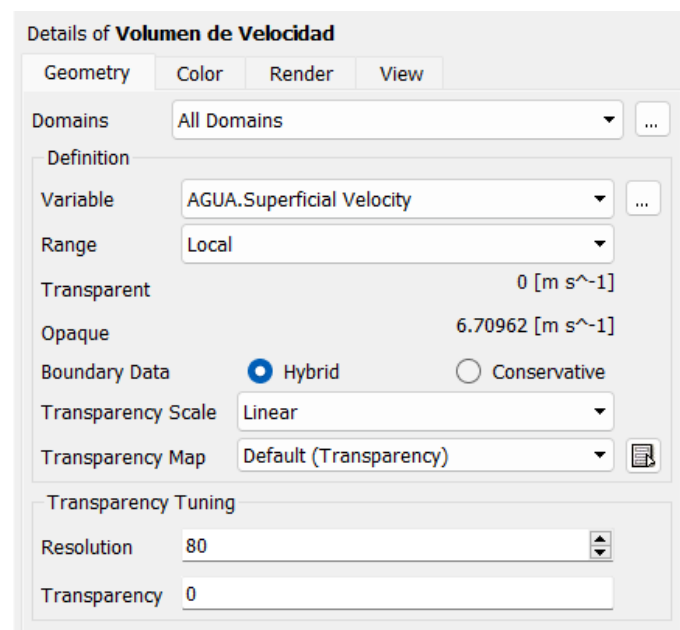
*Creación del gráfico de volumen de velocidad en la interfaz CFD-Post.*



- Variable: AGUA.Superficial Velocity

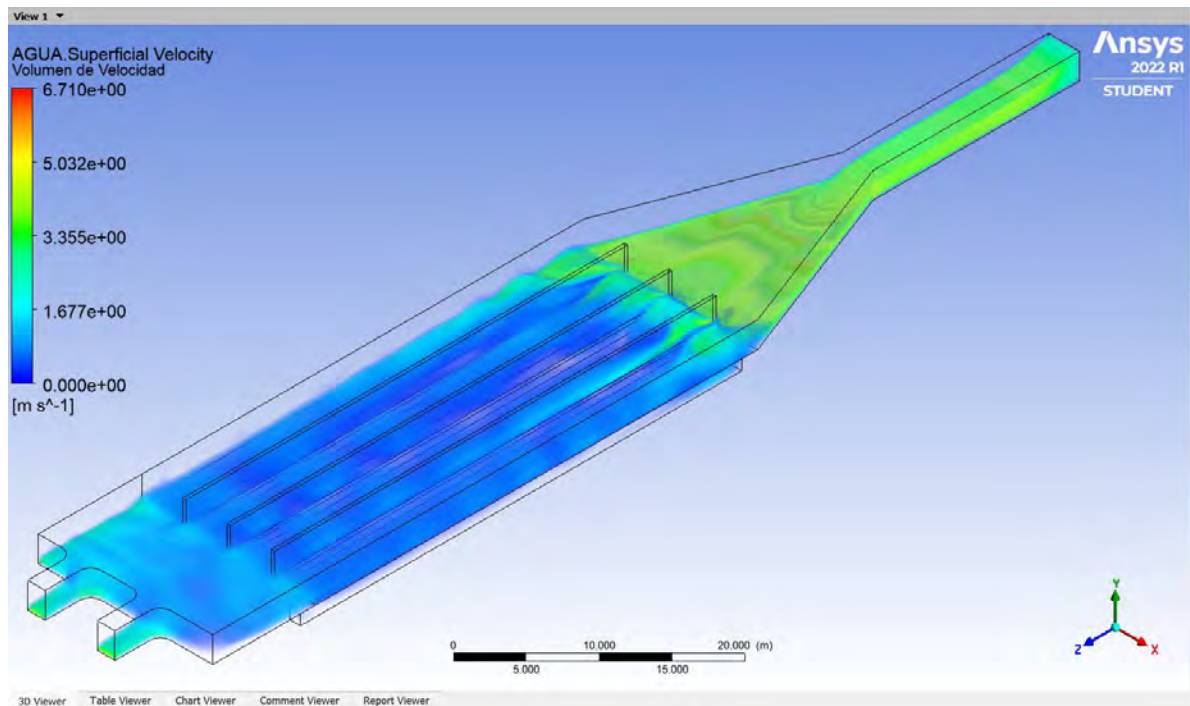
**Figura 161**

*Configuración de Geometry para los gráficos de volumen de velocidad. (Variable: AGUA.Superficial Velocity).*

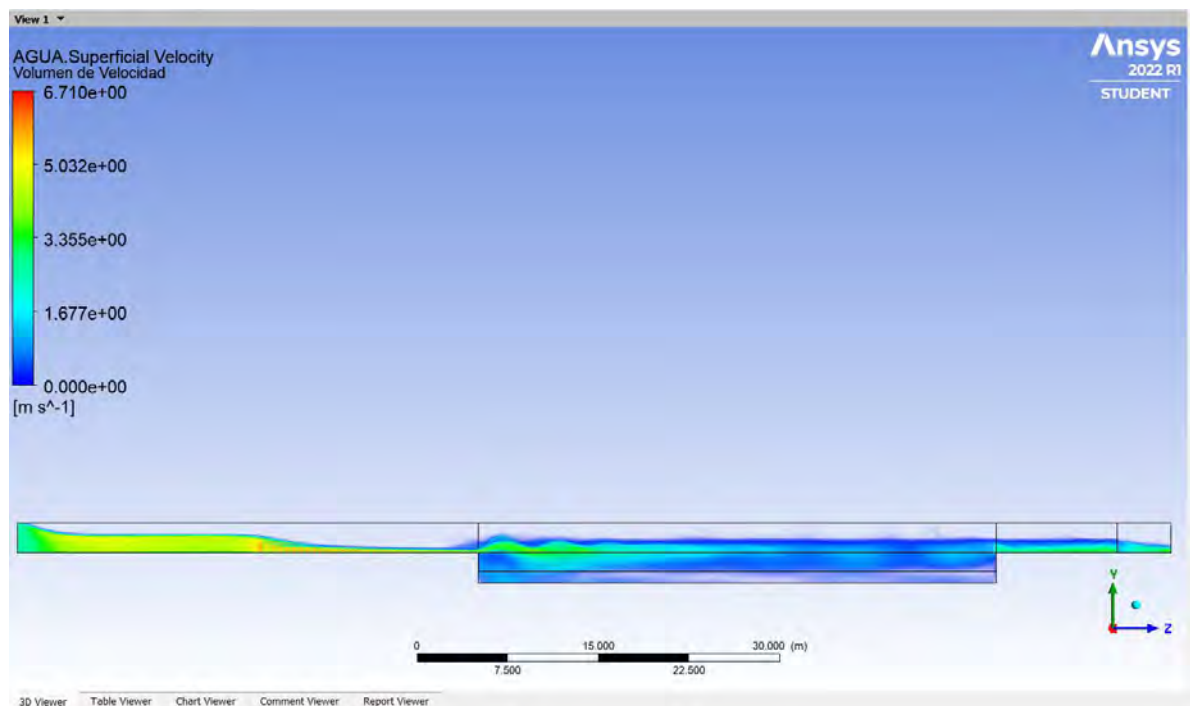


**Figura 162**

*Volumen de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*

**Figura 163**

*Volumen de velocidad en un perfil longitudinal del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*

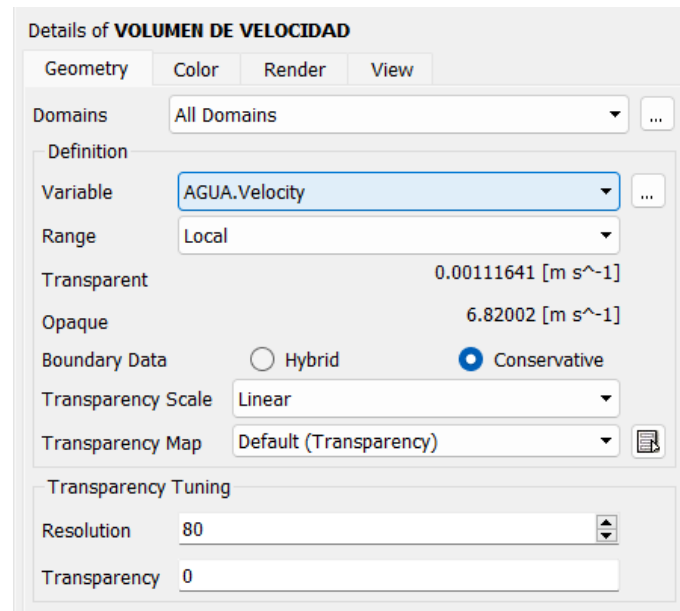


Se observa una velocidad máxima de 6.7096 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida.

- Variable: AGUA. Velocity

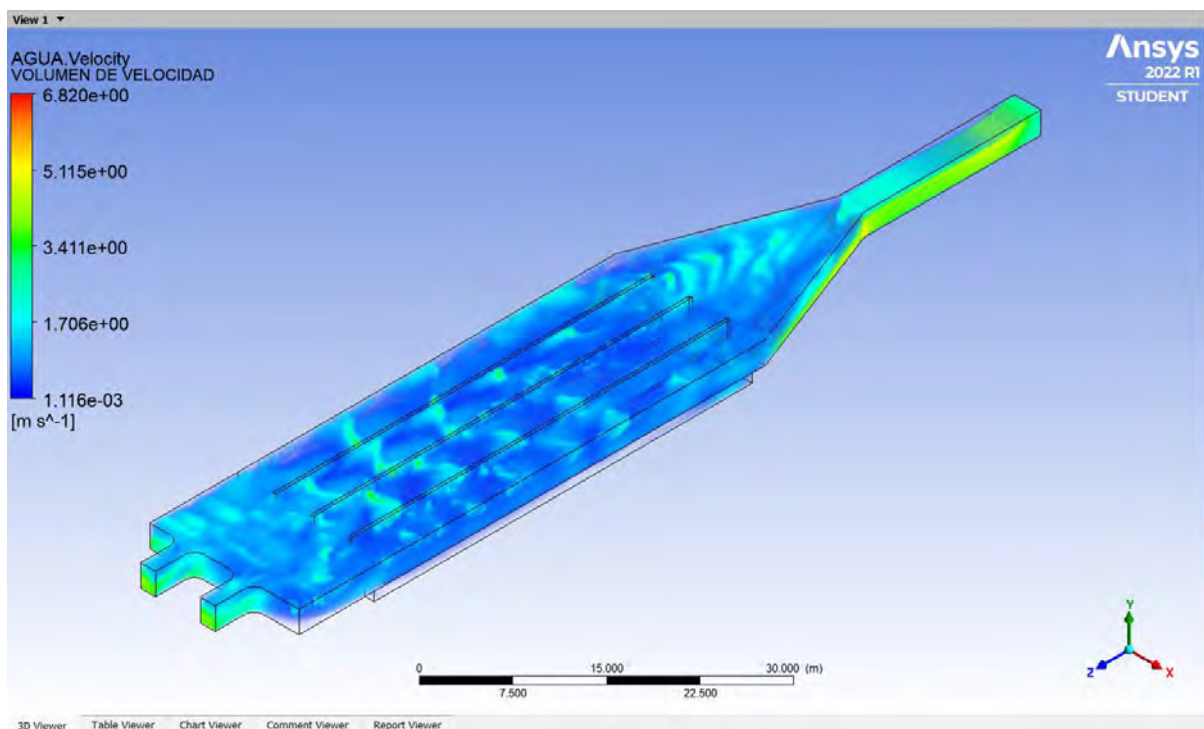
**Figura 164**

*Configuración de Geometry para los gráficos de volumen de velocidad.  
(Variable: AGUA. Velocity).*



**Figura 165**

*Volumen de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*



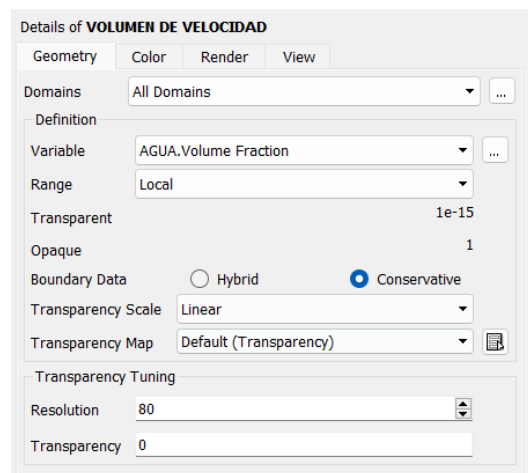
Se observa una velocidad máxima de 6.82 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $1.116 \times 10^{-3}$  m/s en las naves.

#### 4.3.7 Volumen de velocidad: fracción de volumen

Es la gráfica de Volumen de Velocidad usando la variable *AGUA.Volume Fraction*, la configuración se indica a continuación (ver figura 166):

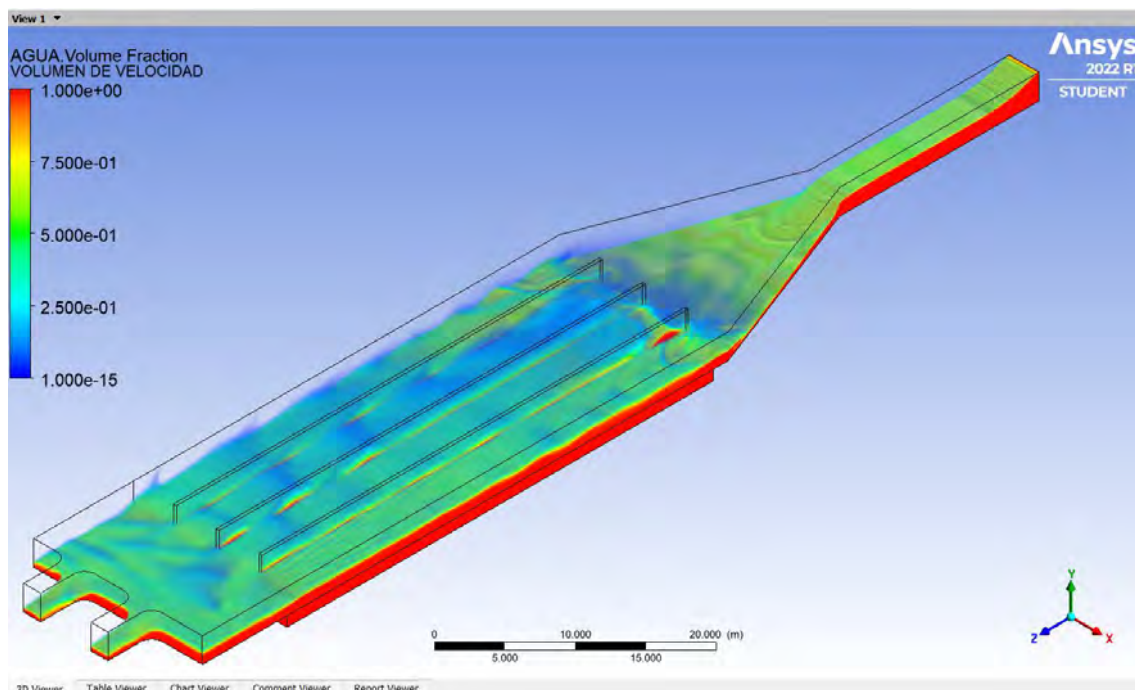
**Figura 166**

*Configuración de Geometry para los gráficos de volumen de velocidad: fracción de volumen. (Variable: AGUA. Velocity).*



**Figura 167**

*Volumen de velocidad: fracción de volumen del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*



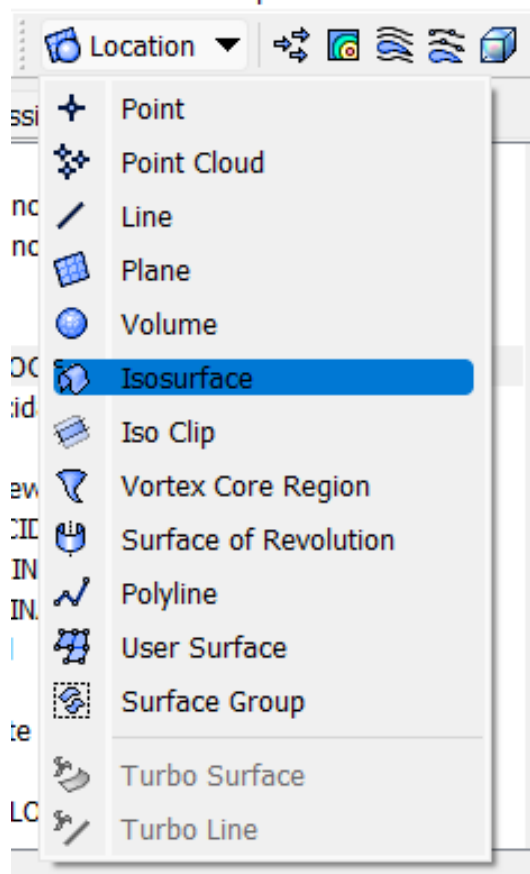
#### 4.3.8 Región sólida: velocidad

Pasos para visualizar las gráficas región de velocidad:

- En la barra de herramientas se selecciona la opción *Location*, se selecciona la opción *Isosurface*, en la nueva ventana se nombra el gráfico como región de velocidad, luego se hace clic en Ok, y se procede con la configuración de los detalles del gráfico.

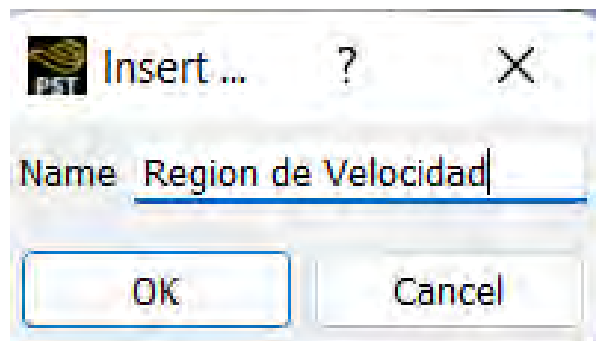
**Figura 168**

*Barra de herramientas de la interfaz CFD-Post.*



**Figura 169**

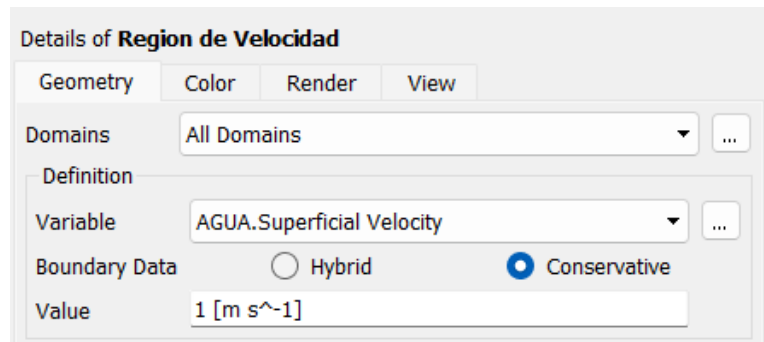
*Creación del gráfico de región de velocidad en la interfaz CFD-Post.*



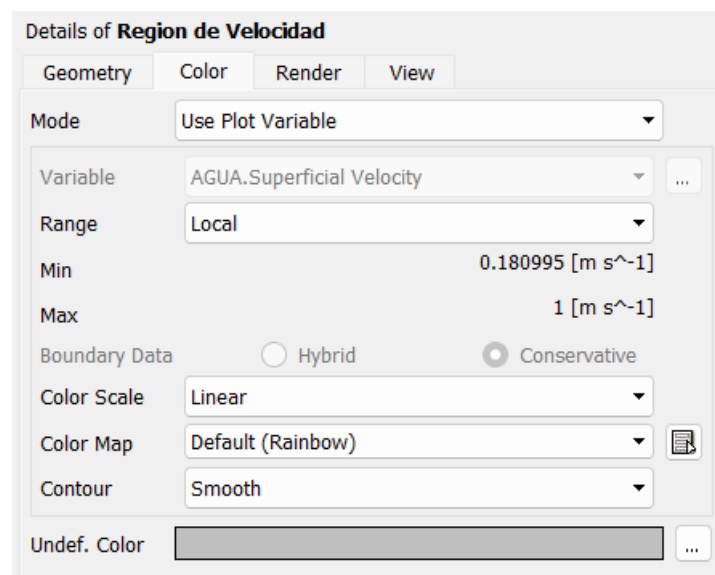
- Variable: AGUA.Superficial Velocity

**Figura 170**

*Configuración de Geometry para los gráficos de región de velocidad.  
(Variable: AGUA.Superficial Velocity).*

**Figura 171**

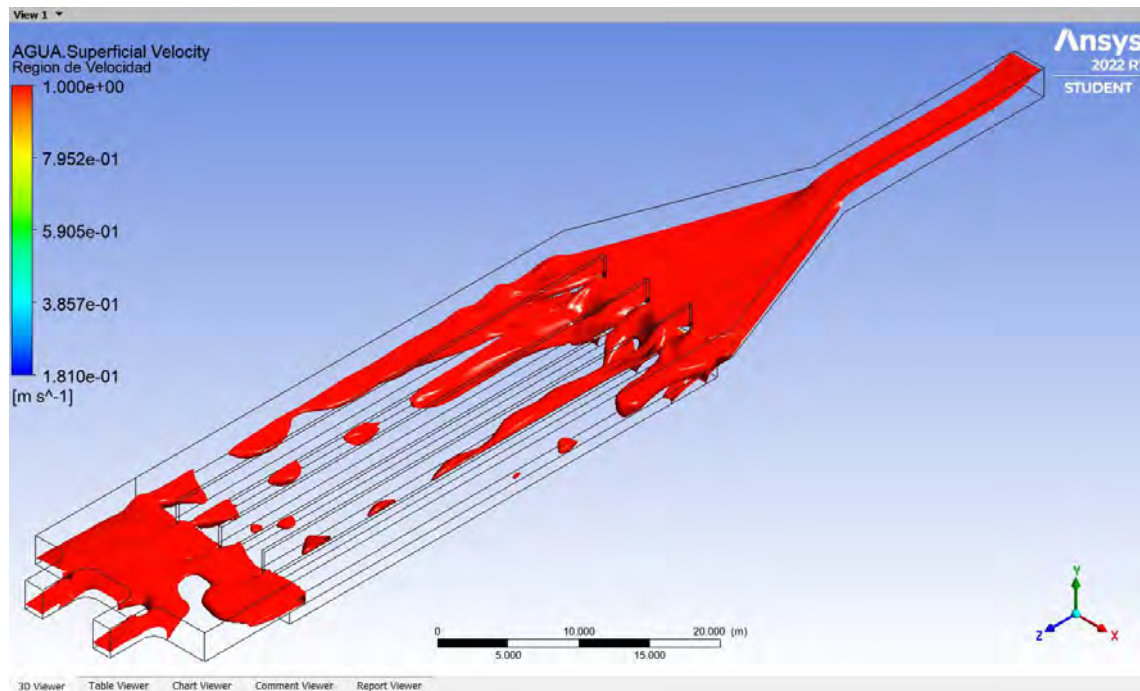
*Configuración de Color para los gráficos de región de velocidad.  
(Variable: AGUA.Superficial Velocity).*





**Figura 172**

*Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*

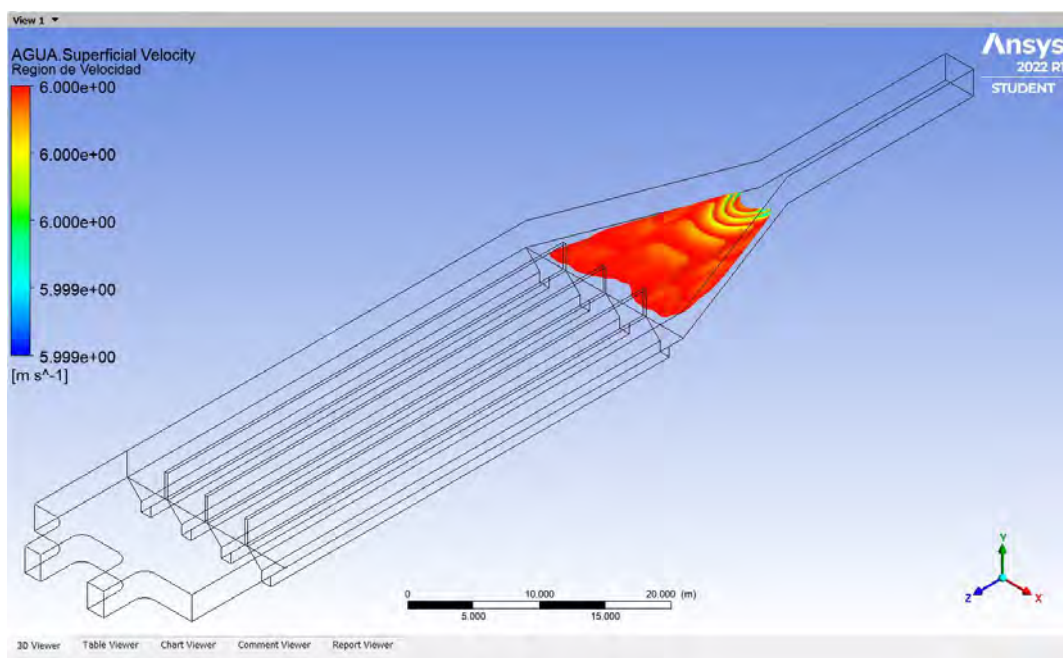


Se observa una velocidad máxima de 1 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de 0.181 m/s.

Se observa máximas velocidades en la transición de entrada del desarenador (ver figura 173):

**Figura 173**

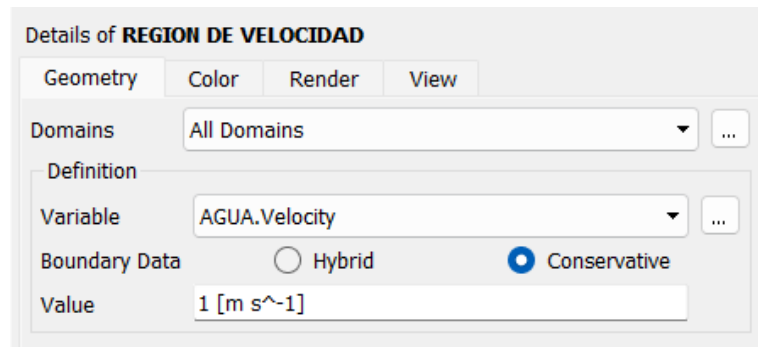
*Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes para una velocidad de 6 m/s.*



- Variable: AGUA. Velocity

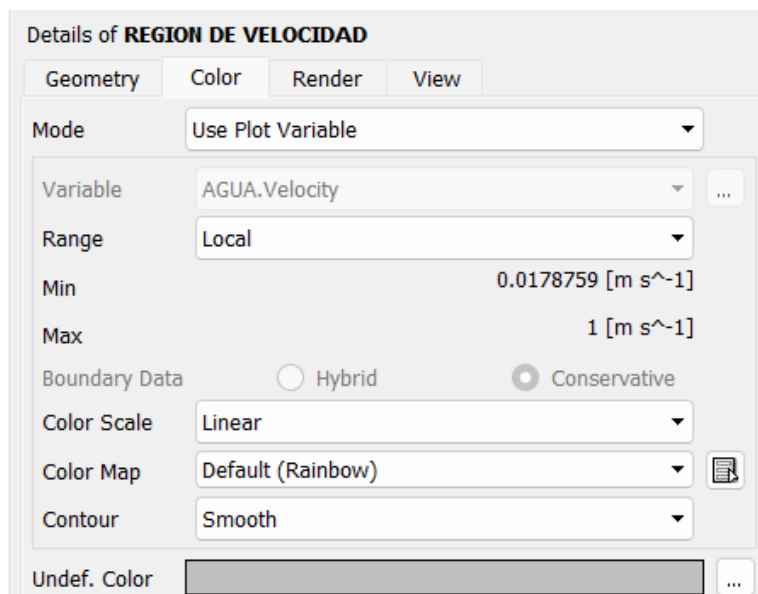
**Figura 174**

*Configuración de Geometry para los gráficos de región de velocidad. (Variable: AGUA. Velocity).*



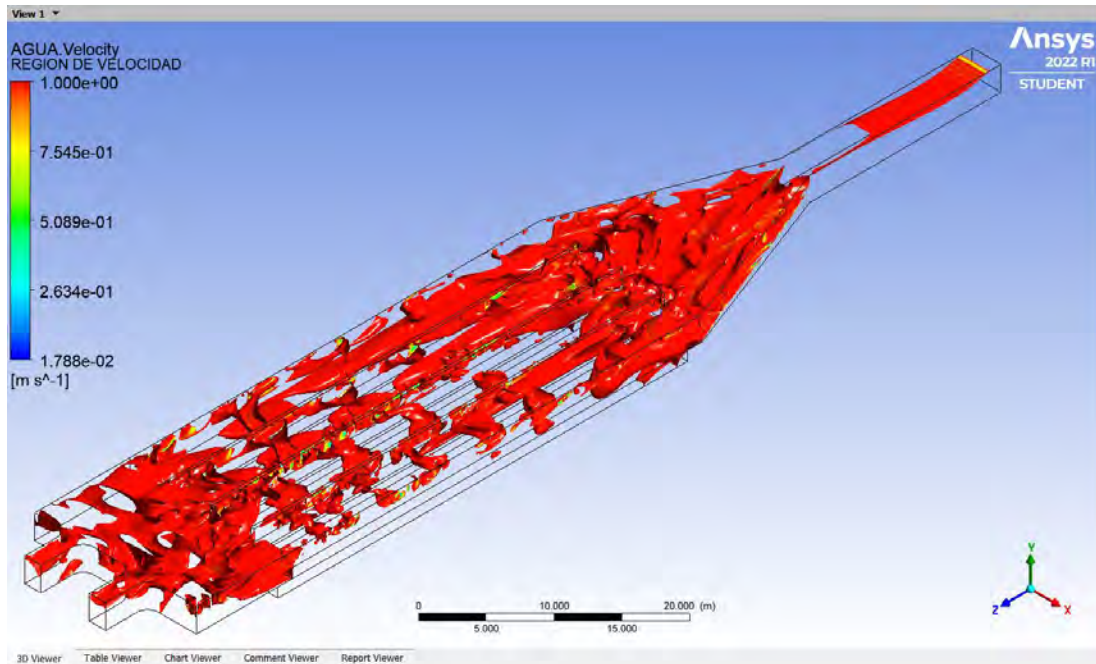
**Figura 175**

*Configuración de color para los gráficos de región de velocidad. (Variable: AGUA. Velocity).*



**Figura 176**

*Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*

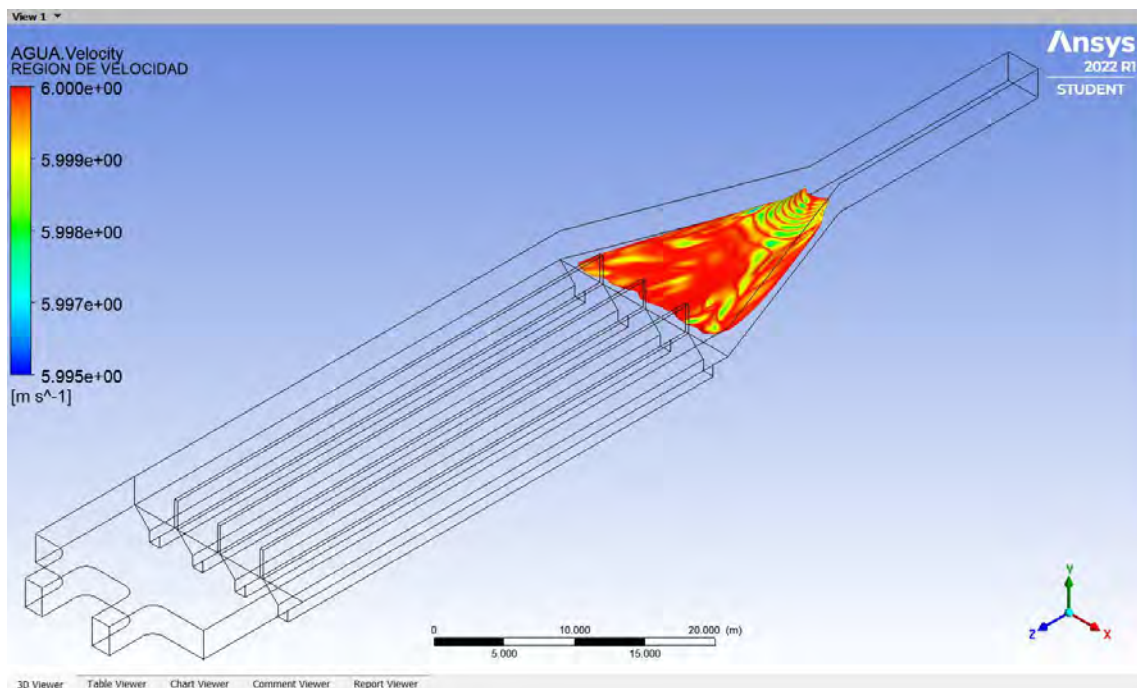


Se observa una velocidad máxima de 1 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de 0.01788 m/s.

Se observa máximas velocidades en la transición de entrada del desarenador (ver figura 177):

**Figura 177**

*Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes para una velocidad de 6 m/s.*



### 4.3.9 Cálculo de velocidad promedio en la salida del desarenador

Pasos para calcular la velocidad promedio:

- En la barra de herramientas se selecciona la opción *Expression*, en la nueva ventana se nombra el gráfico como Velocidad Promedio, luego se hace clic en Ok, y se procede con la configuración de la expresión.

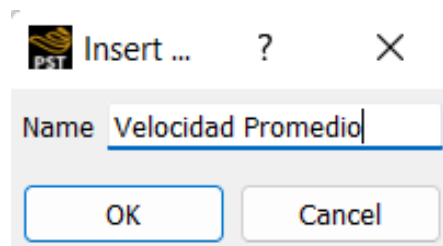
**Figura 178**

*Barra de herramientas de la interfaz CFD-Post.*



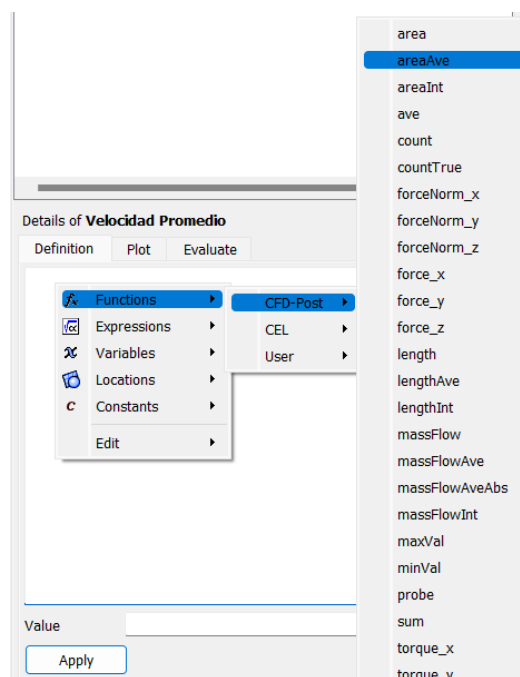
**Figura 179**

*Cálculo de la velocidad promedio, nombre de la expresión en la interfaz CFD-Post.*



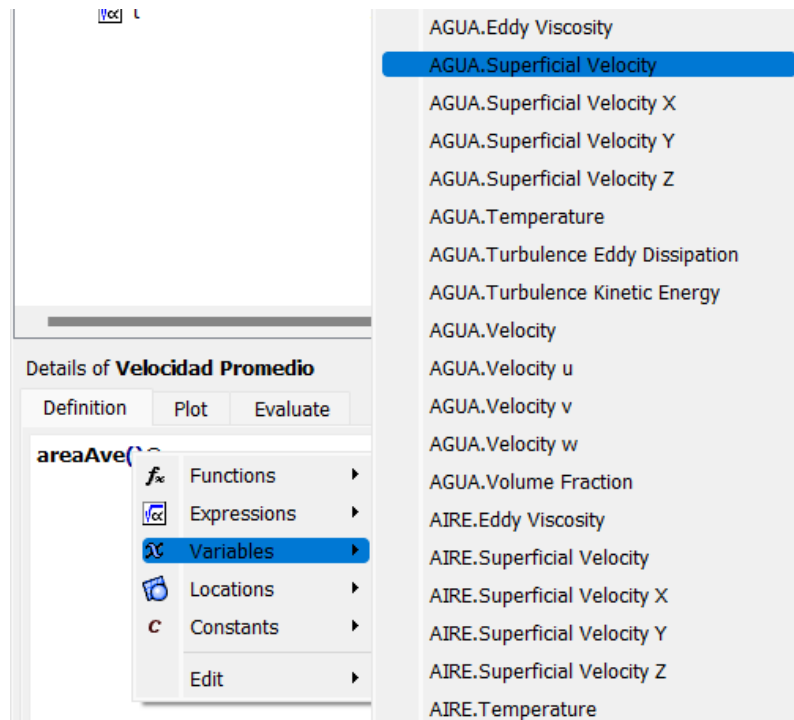
**Figura 180**

*Cálculo de la velocidad promedio, inserción de la expresión en la interfaz CFD-Post.*

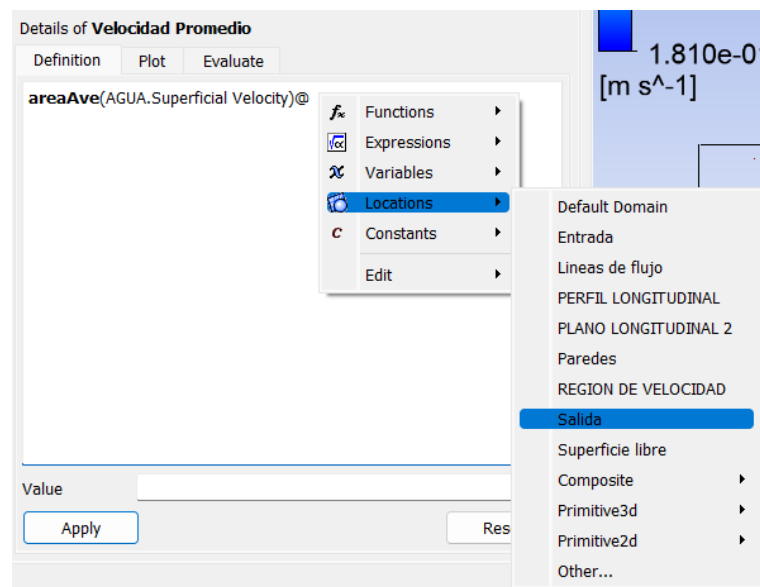


**Figura 181**

*Cálculo de la velocidad promedio, inserción de la variable AGUA.Superficial Velocity.*

**Figura 182**

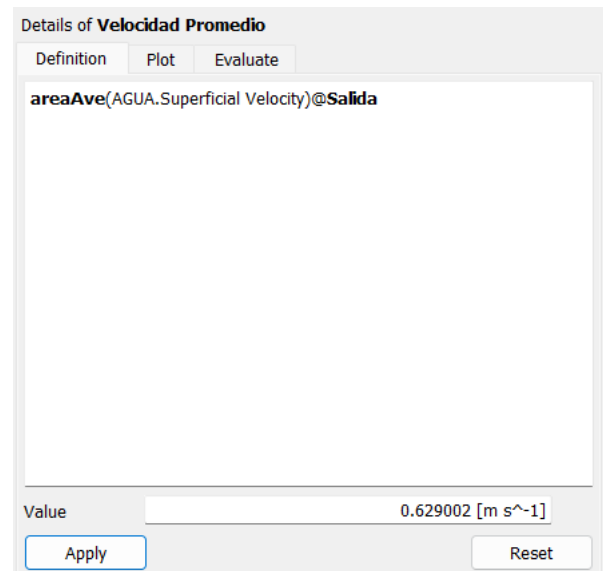
*Cálculo de la velocidad promedio, inserción de la ubicación (Locations): Salida.*



Se observa que la velocidad promedio a la salida del desarenador es de 0.629 m/s (ver figura 183):

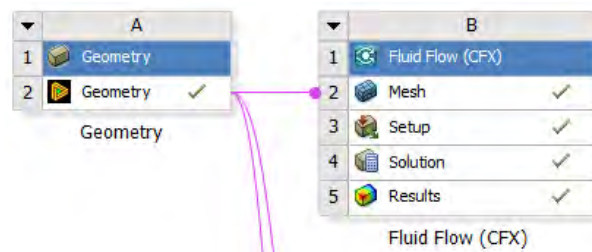
**Figura 183**

*Cálculo de la velocidad promedio en la salida del desarenador*



**Figura 184**

*Comprobación final del proceso de modelación.*



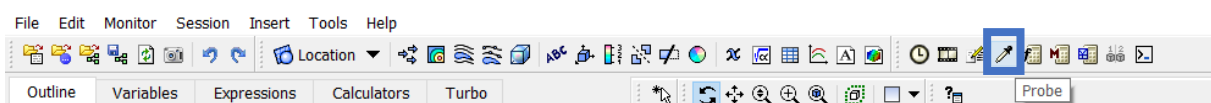
#### 4.3.10 Cálculo de velocidad en las naves del desarenador

Pasos para calcular la velocidad en las naves del desarenador:

- Se usa el plano transversal antes mencionado a  $Z = 40$  m, luego con la herramienta *Probe* se busca la velocidad a una distancia X, Y y Z, siendo Z 40 m, distancia a la que se tiene el plano transversal.

**Figura 185**

*Barra de herramientas de la interfaz CFD-Post.*

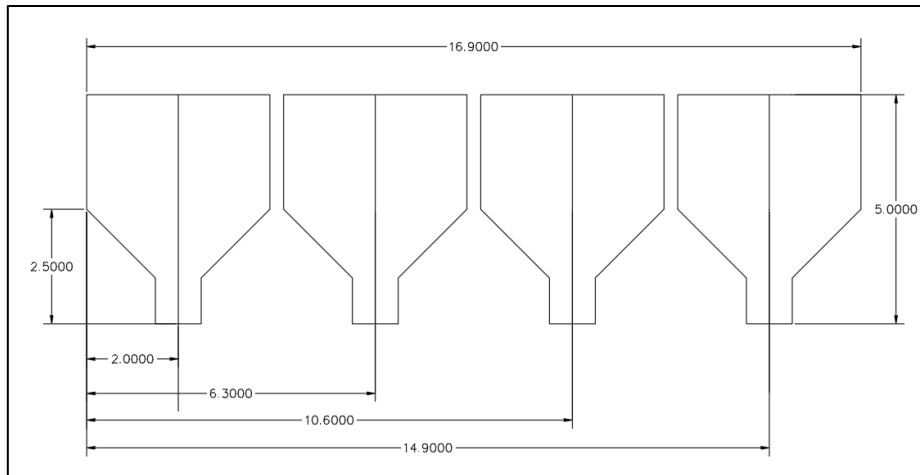




- La distancia en X va variando de nave en nave, para la primera es  $X = 2$  m, para la segunda es  $X = 6.30$  m, para la tercera es  $X = 10.60$  m y para la cuarta nave es  $X = 14.90$  (ver figura 186).

**Figura 186**

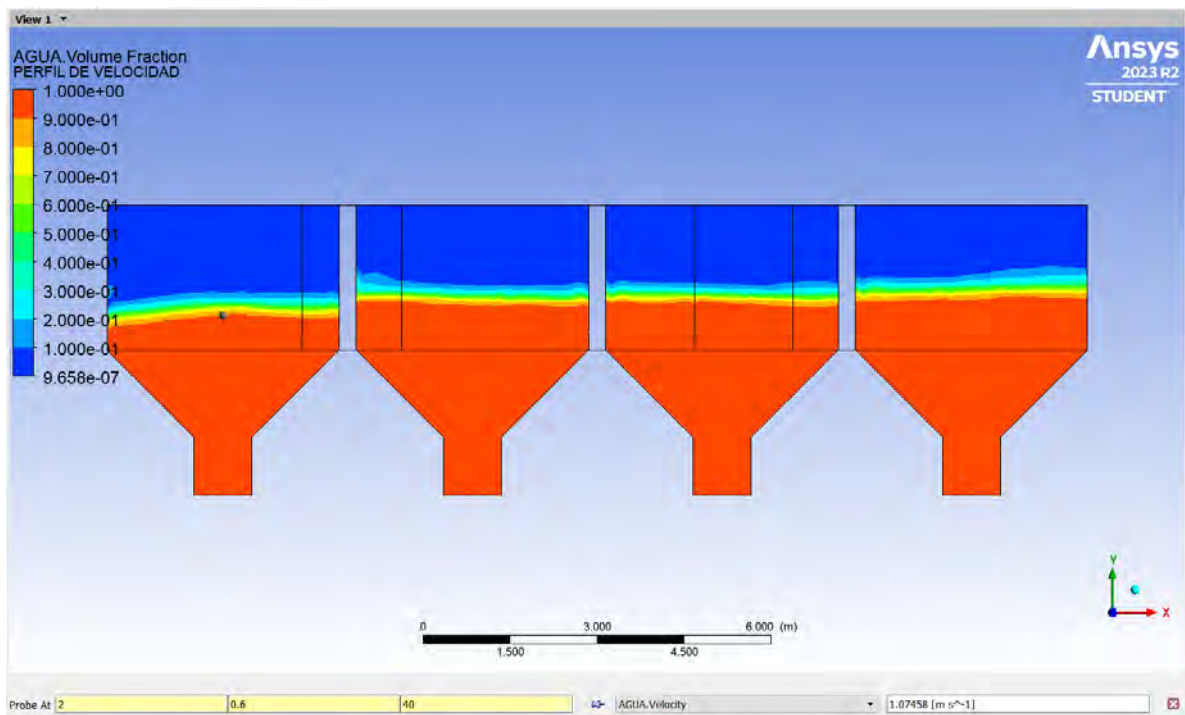
*Distancias en X para cada nave del desarenador.*



#### 4.3.10.1 Velocidad en la nave 1:

**Figura 187**

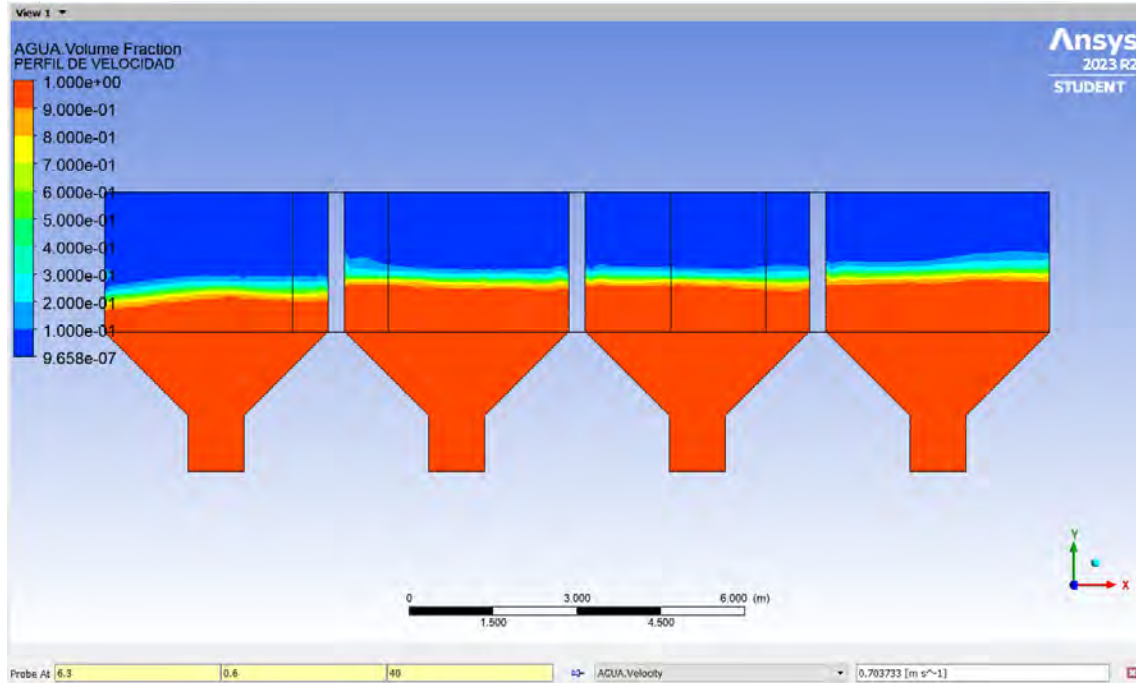
*Cálculo de la velocidad en la nave 1.*



#### 4.3.10.2 Velocidad en la nave 2:

**Figura 188**

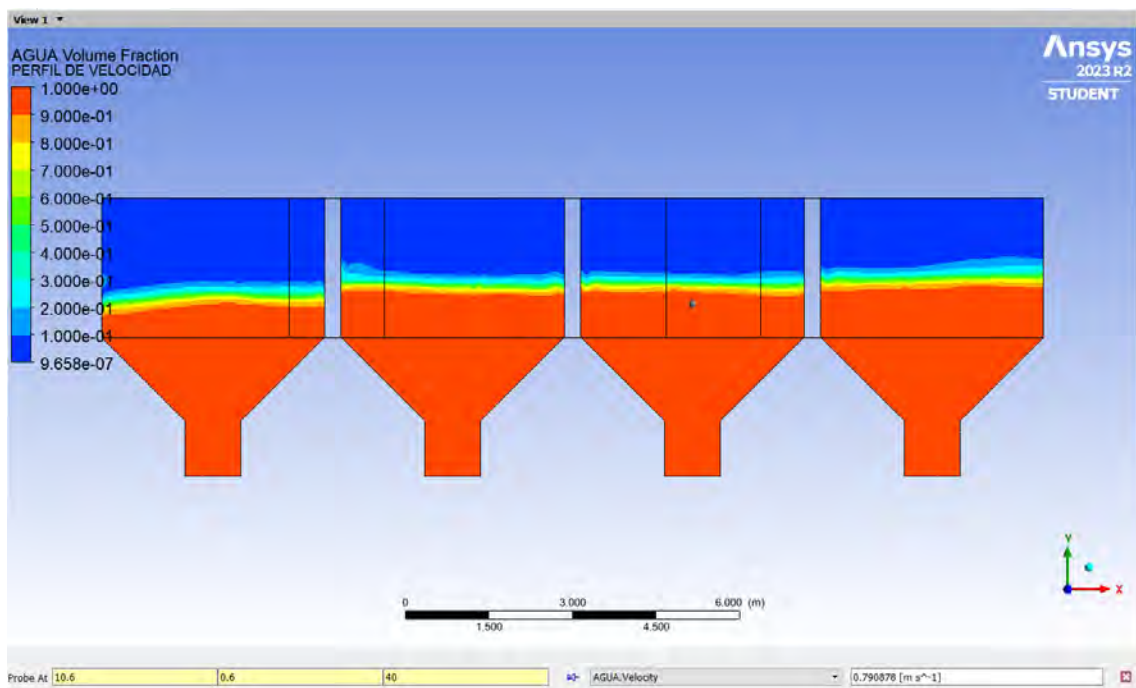
*Cálculo de la velocidad en la nave 2.*



#### 4.3.10.3 Velocidad en la nave 3:

**Figura 189**

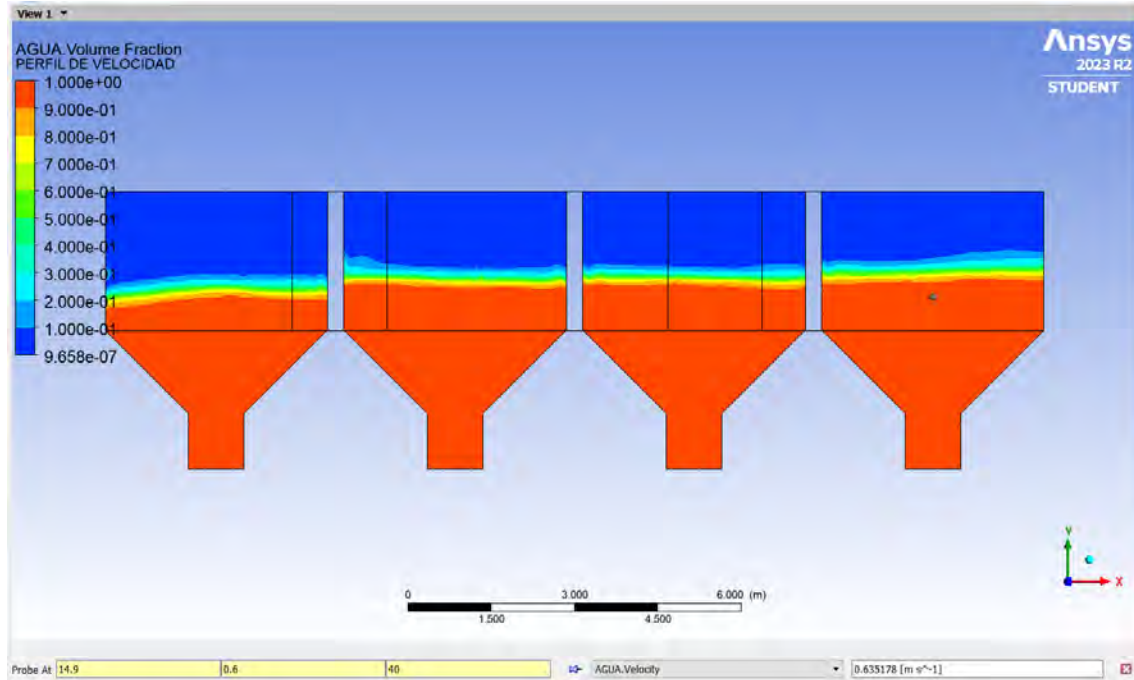
*Cálculo de la velocidad en la nave 3.*



#### 4.3.10.4 Velocidad en la nave 4:

**Figura 190**

*Cálculo de la velocidad en la nave 4.*

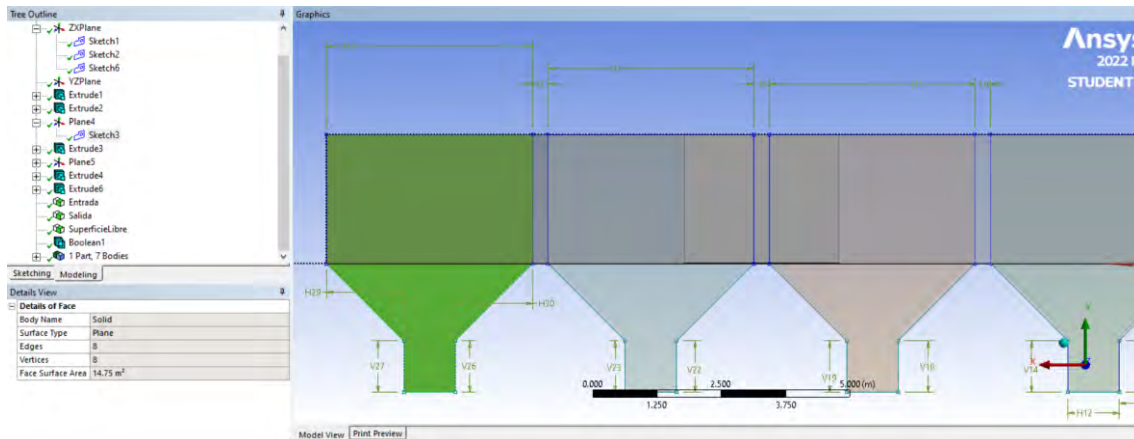


#### 4.3.10.5 Área de las naves:

- El área es: 14.75 m<sup>2</sup>.

**Figura 191**

*Áreas de las naves.*



#### 4.4 Análisis de resultados

##### a) Vectores de velocidad

- Se observa altas velocidades en el canal aguas arriba y en la transición de entrada del desarenador.
- Se observa altas velocidades en la entrada de las naves del desarenador y la formación de vórtices.
- La nave 4 presenta bajas velocidades, en comparación a las otras naves, condición que se asemeja al modelo físico, en el que la nave 4 presentaba las menores velocidades y flujo de retorno.
- Se observa bajas velocidades en la salida del desarenador, esto hará que los sedimentos decantados sean arrastrados por las condiciones de turbulencia y flujo no uniforme desde las naves del desarenador.

##### b) Líneas de corriente

- Se observa líneas de flujo paralelas en el canal aguas arriba.
- Se observa en el ingreso de las naves y en la transición de entrada la formación de vórtices, flujo de retorno y bajas velocidades en la nave 4, lo que indica que el flujo no se distribuye uniformemente en cada una de las naves. Esta condición es debido a que no existe una transición de salida, es decir, el ancho varía bruscamente a un valor notablemente pequeño, y especialmente en la nave mencionada hay un impacto frontal con muros lo que finalmente genera el flujo de retorno.
- El flujo turbulento y la formación de vórtices evitan que los sedimentos se decanten en su totalidad en las cámaras del desarenador y sean arrastrados hasta la salida del mismo.

#### 4.5 Comparación de resultados con el modelo físico original

##### a) Canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador:

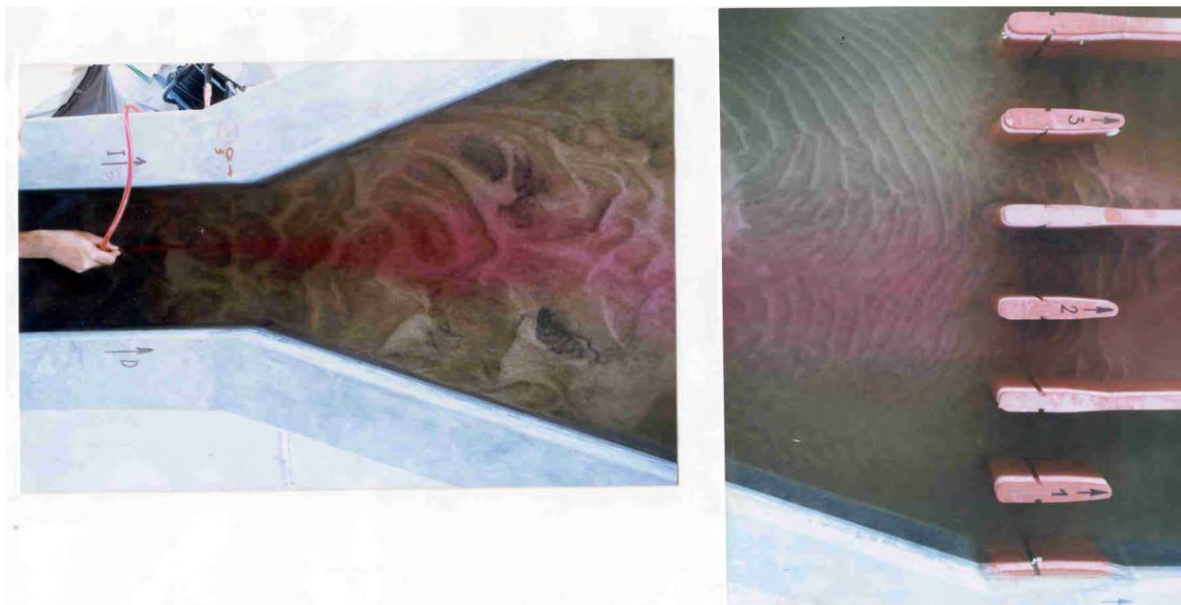
**Tabla 13**

*Comparación 1: Modelo físico original y simulación numérica.*

Modelo físico original	Simulación numérica
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa que las partículas sólidas se decantan en el canal aguas arriba del desarenador (ver figura 192).</li> <li>- Se observa turbulencia en el canal aguas arriba y en la transición de entrada del desarenador.</li> <li>- Se observa sedimentos en la transición de entrada del desarenador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa que las líneas de flujo son paralelas en el canal aguas arriba del desarenador y en la transición de entrada (ver figura 193).</li> <li>- Se observa altas velocidades en la transición de entrada del desarenador.</li> <li>- Las condiciones mencionadas harán que las partículas sólidas se decanten en la transición de entrada del desarenador.</li> </ul>

**Figura 192**

*Modelo físico original: canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador.*

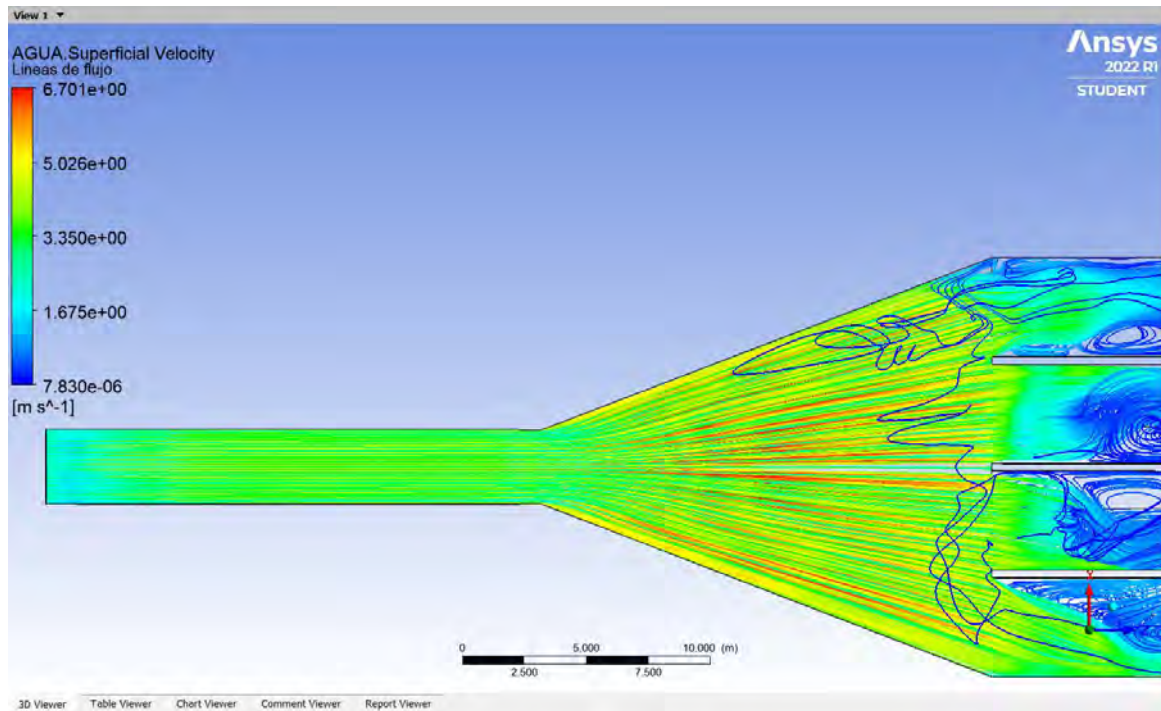


*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)



**Figura 193**

*Simulación numérica del modelo físico original: canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador.*



**b) Entrada de las Naves del desarenador:**

**Tabla 14**

*Comparación 2: modelo físico original.*

Modelo físico original	Simulación numérica
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa que en la entrada de las naves el flujo no es uniforme.</li> <li>- Se observa la formación de vórtices y turbulencia en el flujo al ingreso de las naves (ver figura 194).</li> <li>- Se observa caudal de retorno y bajas velocidades en la nave 4.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa altas velocidades y la formación de vórtices en el ingreso de las naves (ver figura 195).</li> <li>- Se observa que al ingreso de las naves las líneas de flujo no son uniformes (ver figura 195).</li> <li>- Las líneas de flujo indican caudal de retorno en la nave 4.</li> <li>- Se produce recirculación del flujo hacia la transición de entrada por el caudal de retorno, por lo que los sedimentos se terminarán decantando en esa zona.</li> </ul>



**Figura 194**

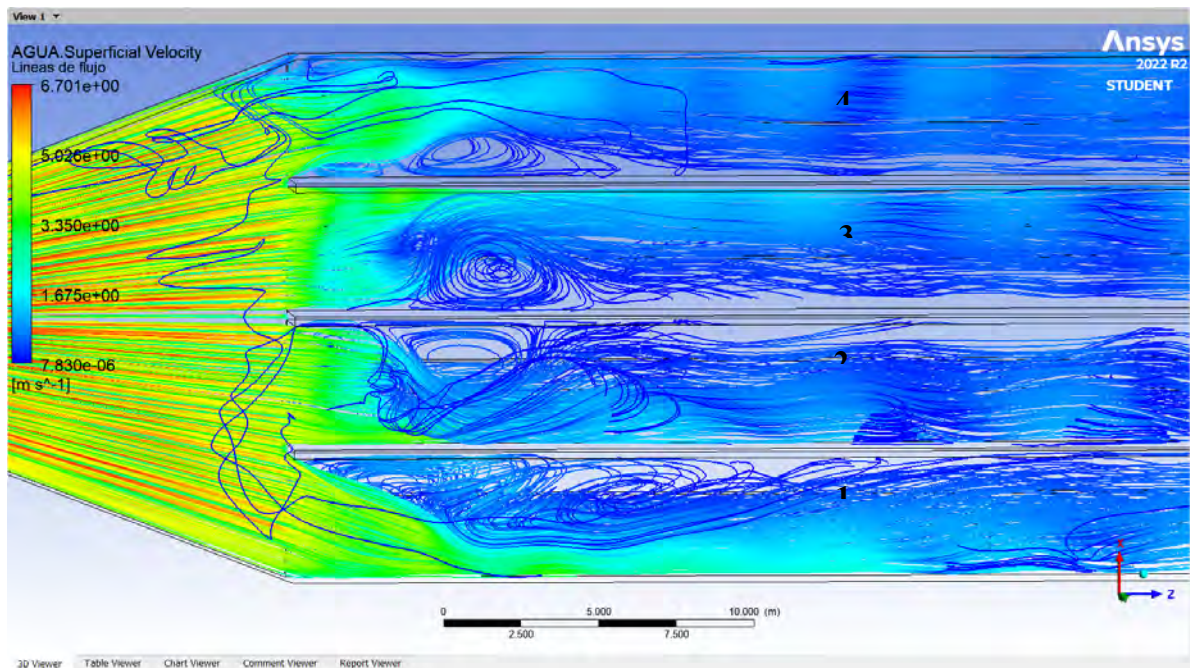
*Modelo físico original: entrada de las naves del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

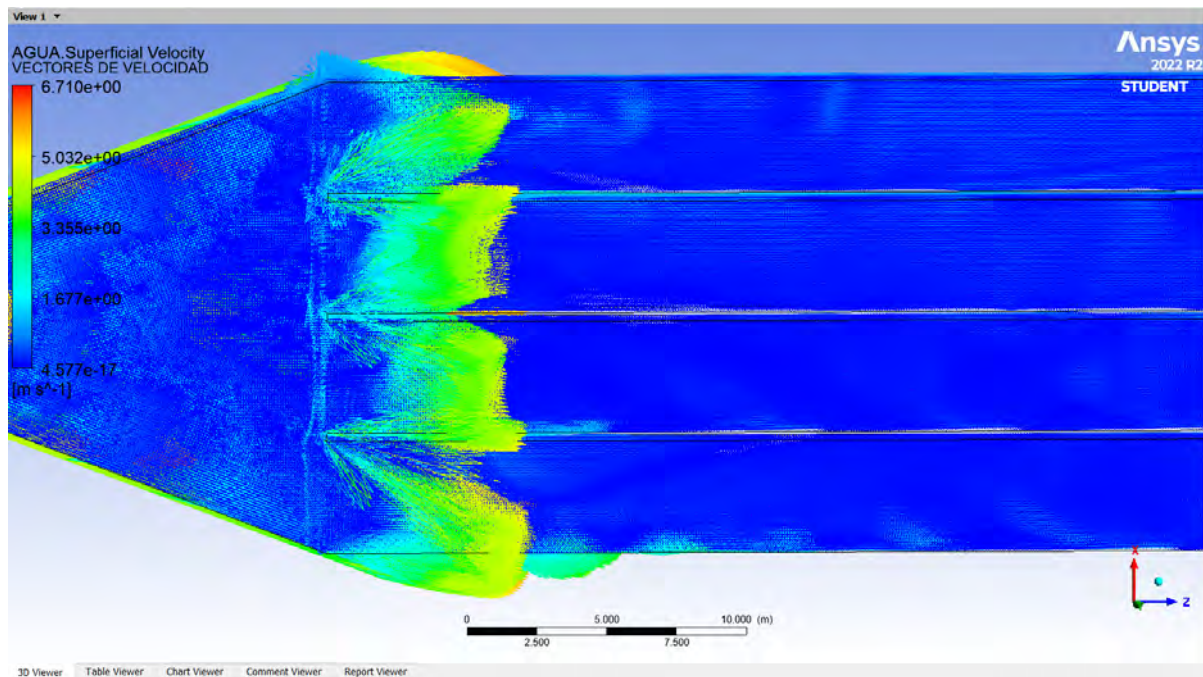
**Figura 195**

*Simulación numérica del modelo físico original: entrada de las naves del desarenador.*



**Figura 196**

*Simulación numérica del modelo físico original: entrada de las naves del desarenador.*



**c) Naves del desarenador:**

**Tabla 15**

*Comparación 3: modelo físico original.*

Modelo físico original	Simulación numérica
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa formación de vórtices en las naves, condición que altera el estado de las partículas sólidas e impide que estas se decanten (ver figura 197).</li> <li>- Se observa la poca sedimentación de las partículas sólidas en las naves, la mayoría de estas se han decantado al ingreso y a la salida del desarenador (ver figura 198).</li> <li>- Se observa bajas velocidades en la nave 4.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa la formación de vórtices en las naves del desarenador, lo que genera turbulencia a lo largo de las naves y que los sedimentos sean arrastrados hasta la salida del desarenador (ver figura 199).</li> <li>- La nave 4 presenta las velocidades más bajas, esto es debido al flujo de retorno que se observa en esta nave (ver tabla 16).</li> </ul>



**Figura 197**

*Modelo físico original: naves del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 198**

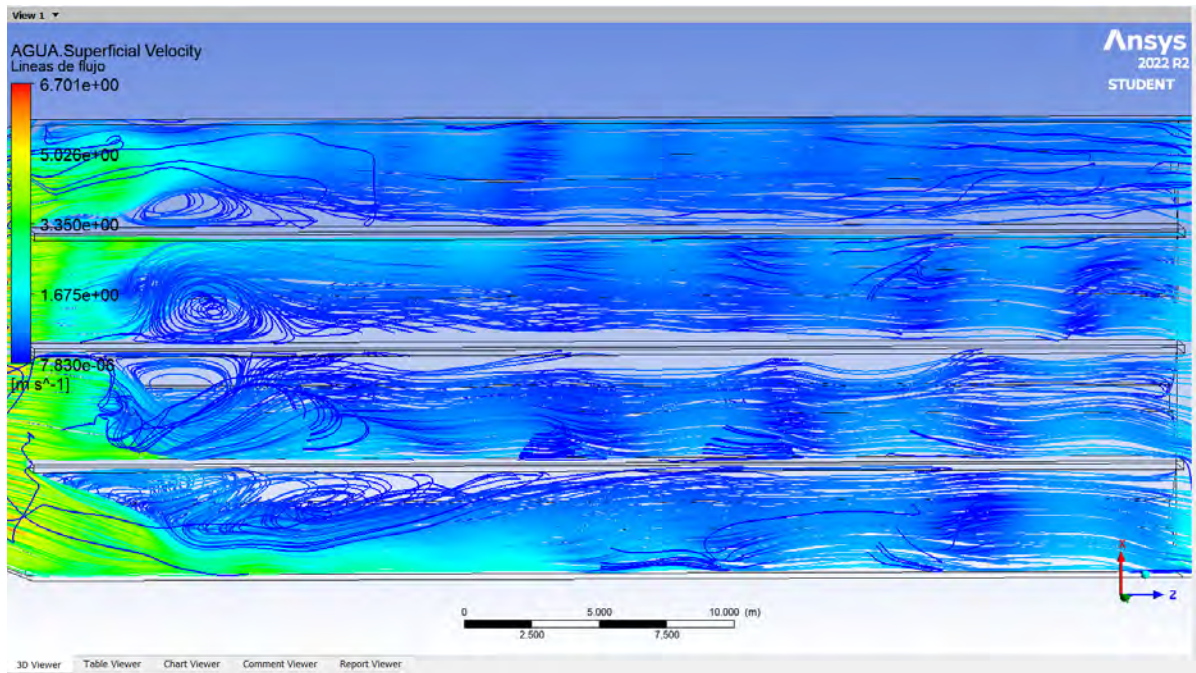
*Modelo físico original: naves del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 199**

*Simulación numérica del modelo físico original: naves del desarenador.*

**Tabla 16**

*Velocidades promedio en las naves del desarenador del modelo físico original.*

Velocidad en las naves	Nave 1	Nave 2	Nave 3	Nave 4
Velocidad (m/s)	1.07	0.70	0.79	0.46

**d) Salida del desarenador:**

**Tabla 17**

*Comparación 4: modelo físico original.*

<b>Modelo físico original</b>	<b>Simulación numérica</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa la formación de vórtices a la salida del desarenador, esto hace que los sedimentos decantados se resuspendan (ver figura 200).</li> <li>- Se observa sedimentos decantados en la salida del desarenador (ver figura 201).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa líneas de corriente paralelas en la salida de las naves 1, 2 y 3, debido al flujo turbulento en las naves, los sedimentos se van a decantar aquí (ver figura 202).</li> <li>- Se observa líneas de flujo no uniformes en la salida de la nave 4 del desarenador, incluso se puede visualizar que retornan a la nave, esto es porque el flujo tiene un impacto frontal con muros, produciéndose así flujo de retorno.</li> <li>- Se observa bajas velocidades a la salida del desarenador, los sedimentos arrastrados por las condiciones de turbulencia y flujo no uniforme en las naves del desarenador se decantan aquí debido a la disminución de la velocidad (ver figura 202).</li> </ul>

**Figura 200**

*Modelo físico original: salida del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)



**Figura 201**

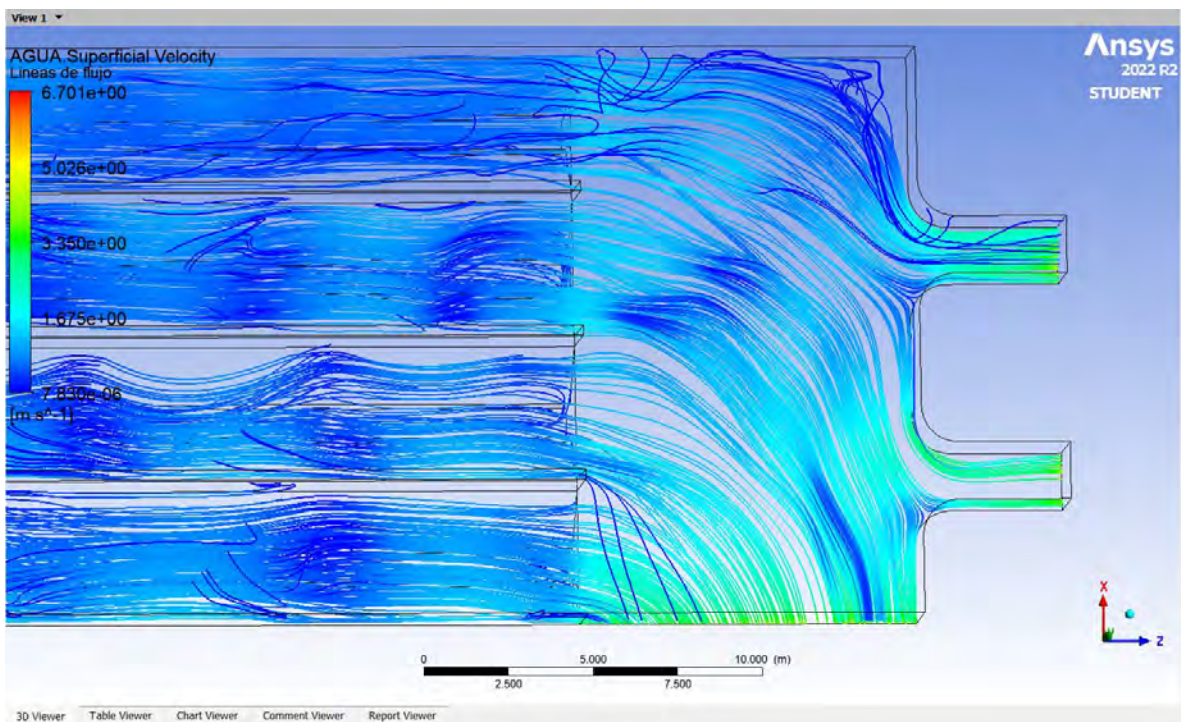
*Modelo físico original: salida del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 202**

*Simulación numérica del modelo físico original: salida del desarenador.*



## Capítulo 5

### Simulación numérica del modelo físico final a escala del Desarenador de Majes

En este capítulo se va a desarrollar la simulación numérica del modelo físico final a escala del desarenador de Majes mediante ANSYS CFX, teniendo como objetivos:

- Comparar el comportamiento hidráulico del modelo final a escala del Desarenador de Majes del modelo físico realizado a escala en el campus de la Universidad de Piura y numérico realizado mediante ANSYS CFX.
- Verificar que el comportamiento hidráulico del modelo final a escala del desarenador de Majes del modelo físico realizado a escala en el campus de la Universidad de Piura es igual o parecido al comportamiento que se registrará en los resultados de la modelación numérica en ANSYS CFX.

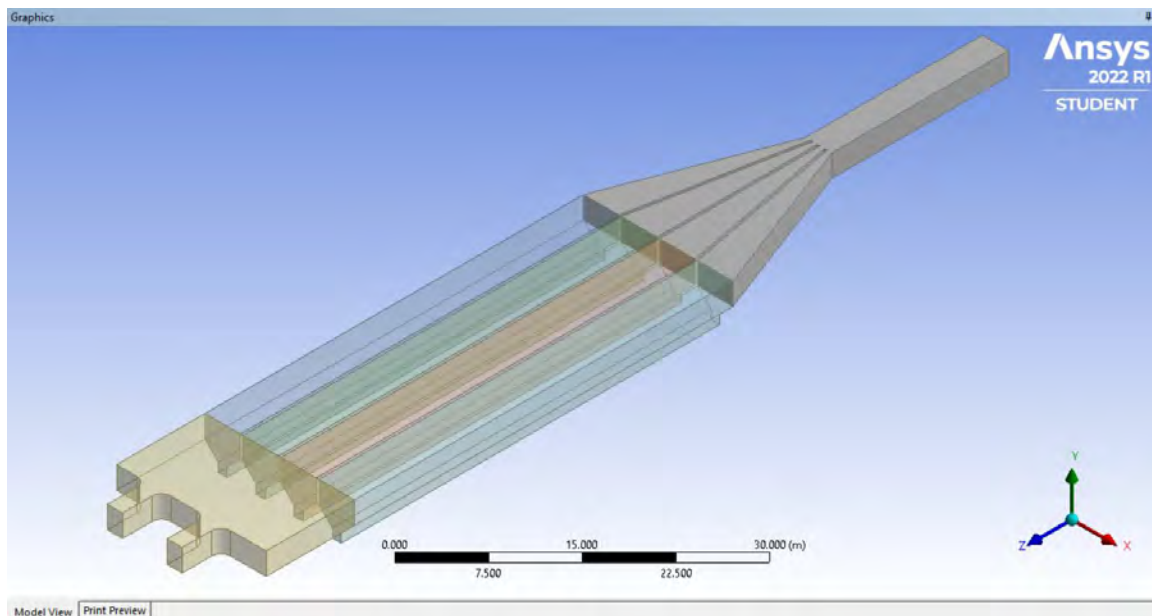
#### 5.1 Etapa 1: Pre-Procesamiento

##### 5.1.1 Geometría

- Conficciones finales: reducción de la sección transversal del desarenador desde la transición de entrada hasta las naves.
- Diseño de la geometría del modelo final a escala del desarenador de Majes.

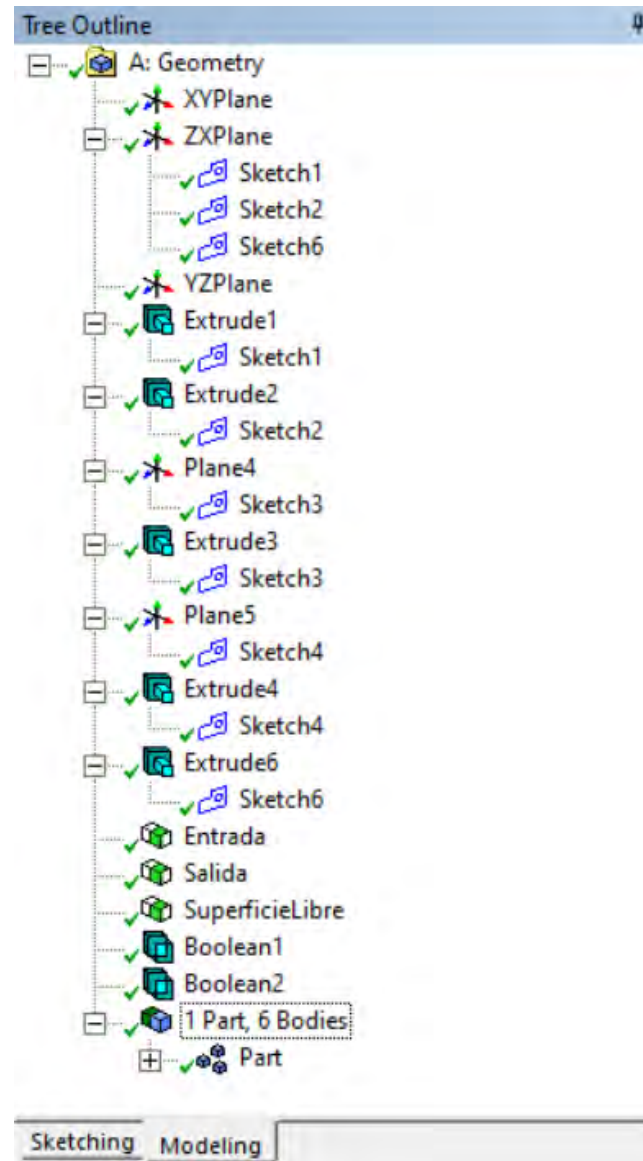
#### Figura 203

*Interfaz Desing Modeler. Geometría del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*



**Figura 204**

*Interfaz Desing Modeler. Detalle del diseño de la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes.*



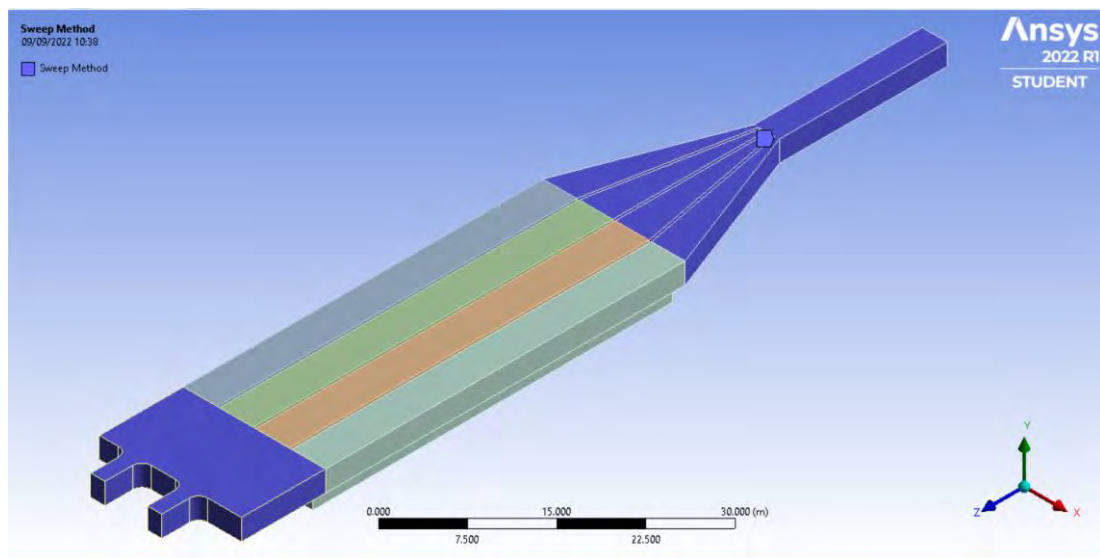


### 5.1.2 Mallado

Se utilizó un tipo de mallado híbrido, aplicando Sweep Method en tres partes del desarenador, en la entrada, en la transición de entrada y en la salida del desarenador. Para las naves del desarenador se usó los métodos MultiZone, Hex Dominant Method, Automatic y Tetrahedrons (Patch Conforming) y se analizó los parámetros de calidad de cada uno para determinar cuál es el que mejor se adecúa a la geometría. Para el modelo físico final se presenta el detalle de los dos primeros métodos.

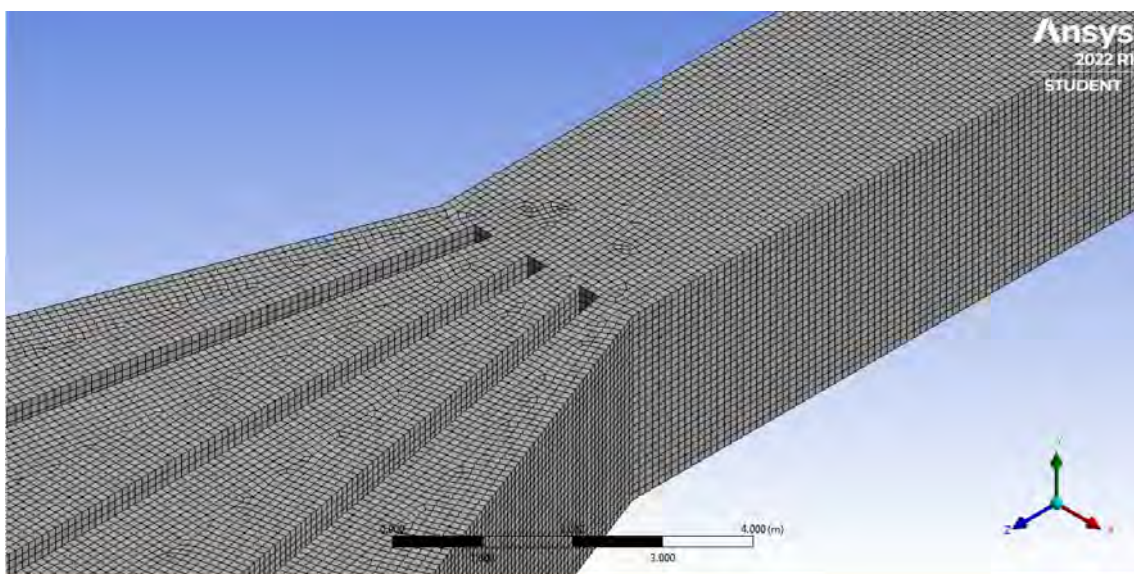
**Figura 205**

*Interfaz Mesh. Aplicación de Sweep Method en la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes.*



**Figura 206**

*Interfaz Mesh. Sweep Method de la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes.*

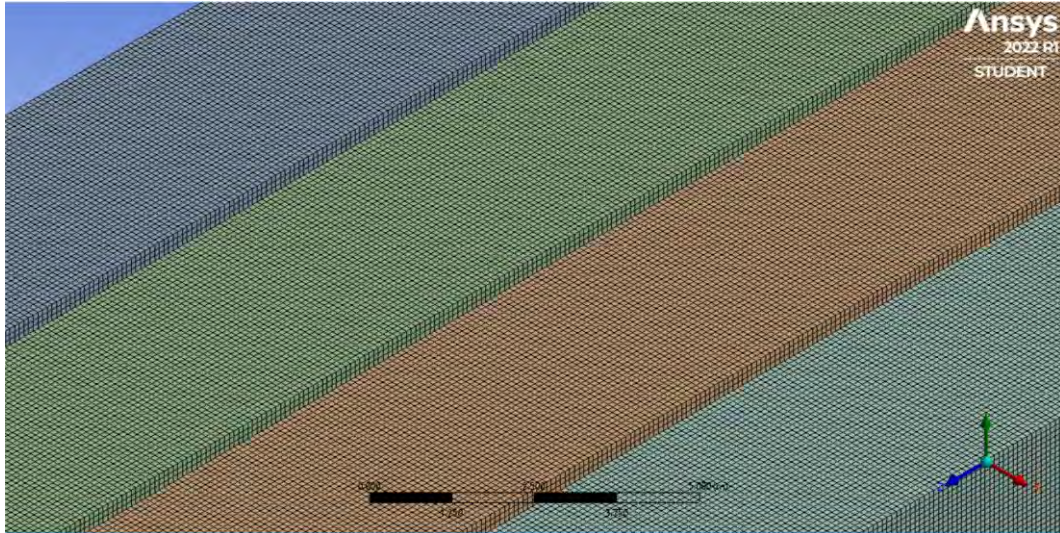


### 5.1.2.1 Tipos de Mallado

#### a) MultiZone:

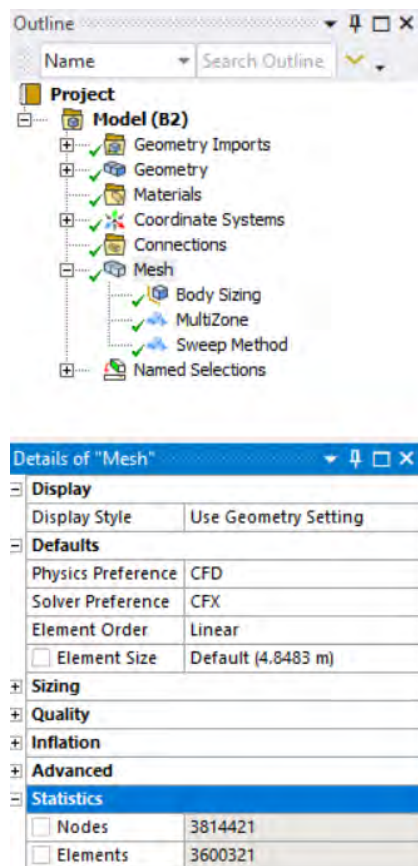
**Figura 207**

*Malla MultiZone de la geometría del modelo físico final del desarenador de majes. detalle del mallado en las naves del desarenador.*



**Figura 208**

*Número de nodos y elementos de la malla MultiZone.*

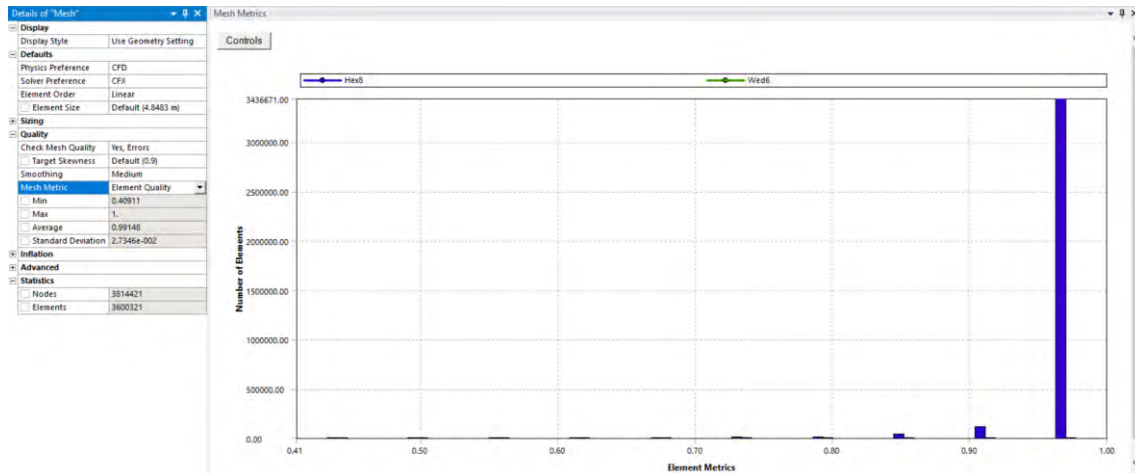


Parámetros de calidad:

- ✓ Element Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 indica alta calidad. Se tiene un valor promedio de 0.99148 (Ver Figura 209).

**Figura 209**

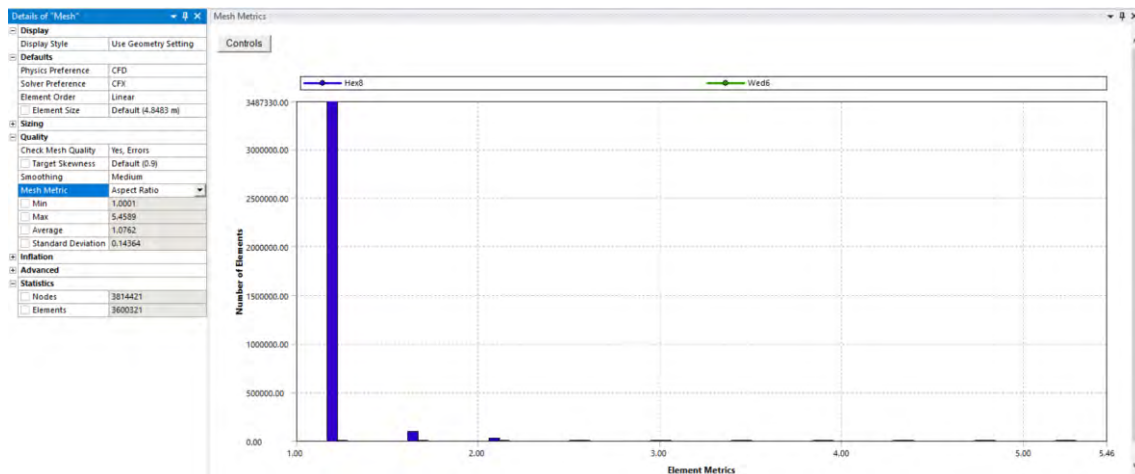
*Parámetro de calidad Element Quality de la malla MultiZone.*



- ✓ Aspect Ratio: Debe ser menor a 5. Se tiene un valor promedio de 1.0762 (ver figura 210).

**Figura 210**

*Parámetro de calidad Aspect Ratio de la malla MultiZone.*

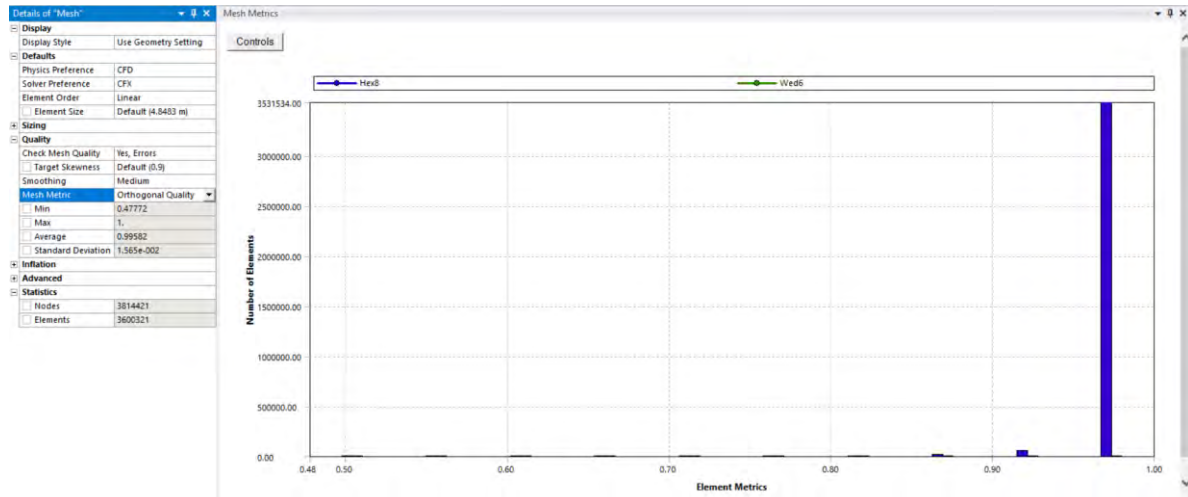




- ✓ Orthogonal Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 alta calidad porque indica que los ángulos de las celdas tienden a  $90^\circ$ . Se tiene un valor promedio de 0.99582 (ver figura 211).

**Figura 211**

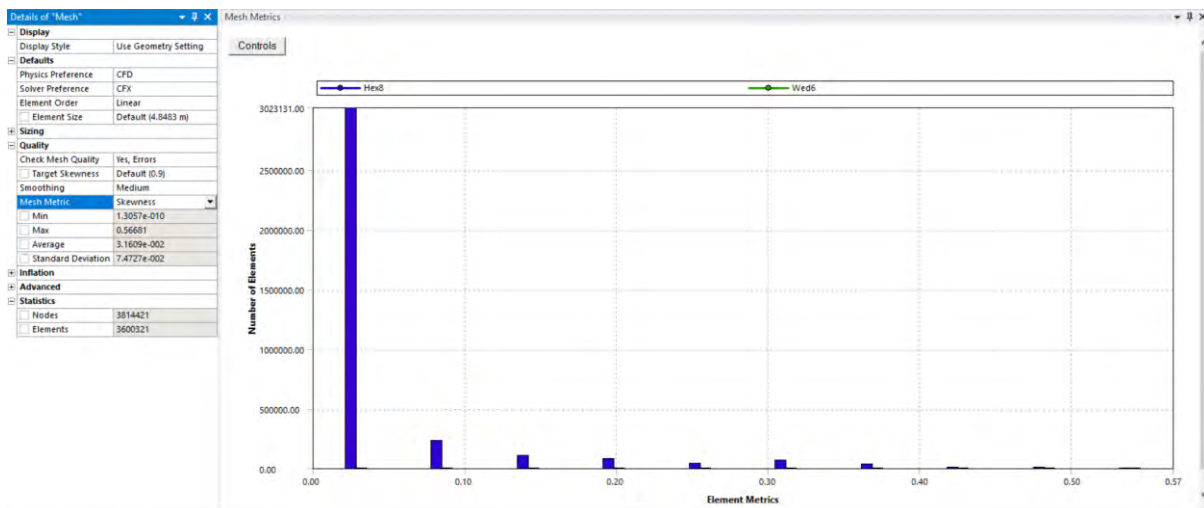
*Parámetro de calidad Orthogonal Quality de la malla MultiZone.*



- ✓ Skewness: Oscila entre 0 y 1, 0 indica alta calidad y 1 indica baja calidad. Se tiene un valor promedio de 3.1609e-002 (ver figura 212).

**Figura 212**

*Parámetro de calidad Skewness de la malla MultiZone.*

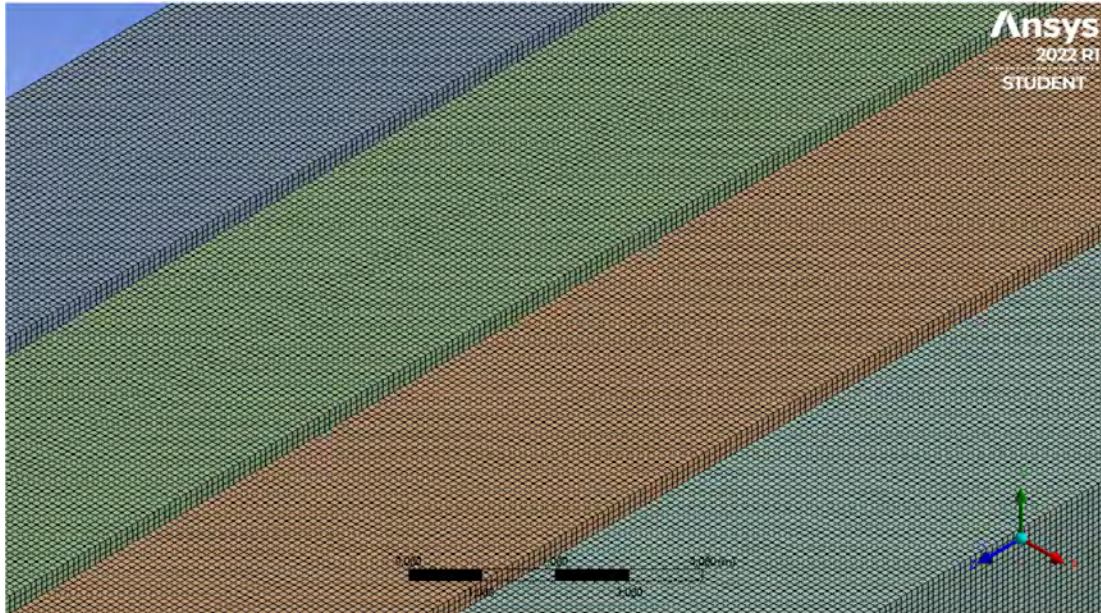


## b) Hex Dominant:

Como segunda opción se tiene el mallado Hex Dominant.

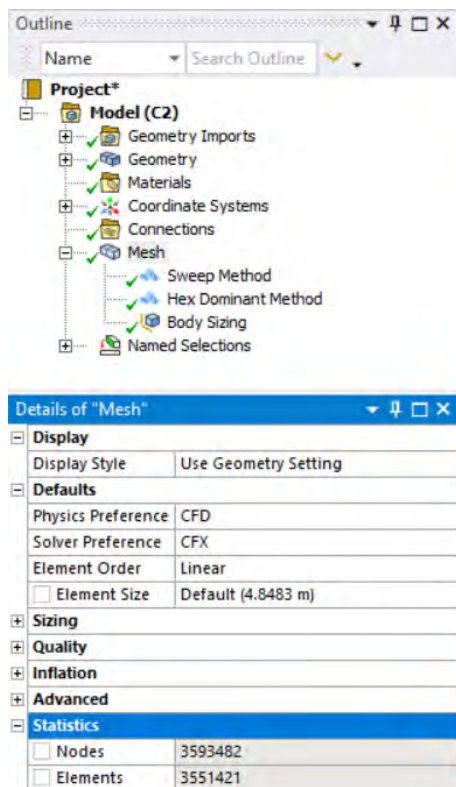
**Figura 213**

*Malla Hex Dominant de la geometría del modelo físico final del desarenador de majes. detalle del mallado en las naves del desarenador.*



**Figura 214**

*Número de nodos y elementos de la malla Hex Dominant.*

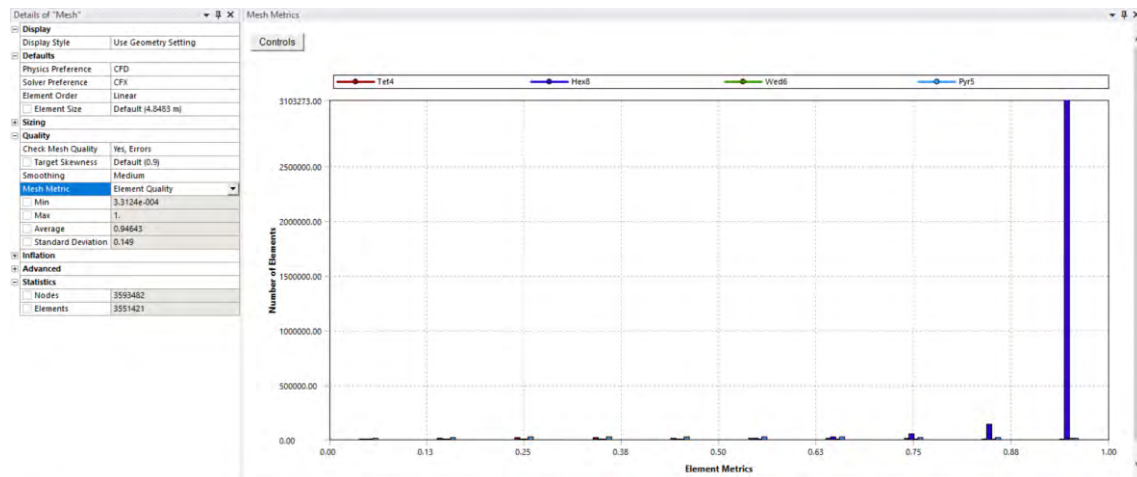


Parámetros de calidad:

- ✓ Element Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 indica alta calidad. Se tiene un valor promedio de 0.94643 (ver figura 215).

**Figura 215**

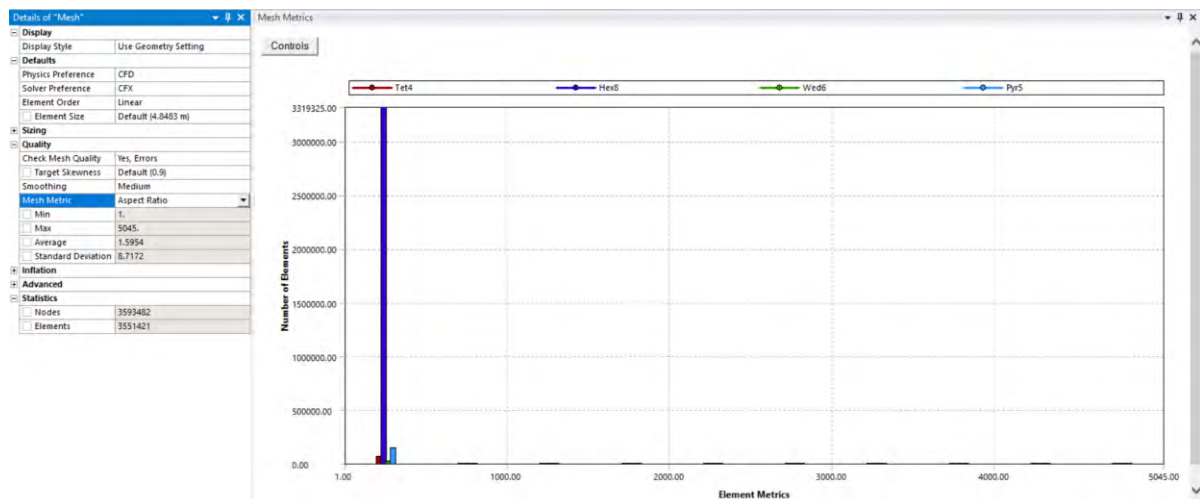
*Parámetro de calidad Element Quality de la malla Hex Dominant.*



- ✓ Aspect Ratio: Debe ser menor a 5. Se tiene un valor promedio de 1.5954 (ver figura 216).

**Figura 216**

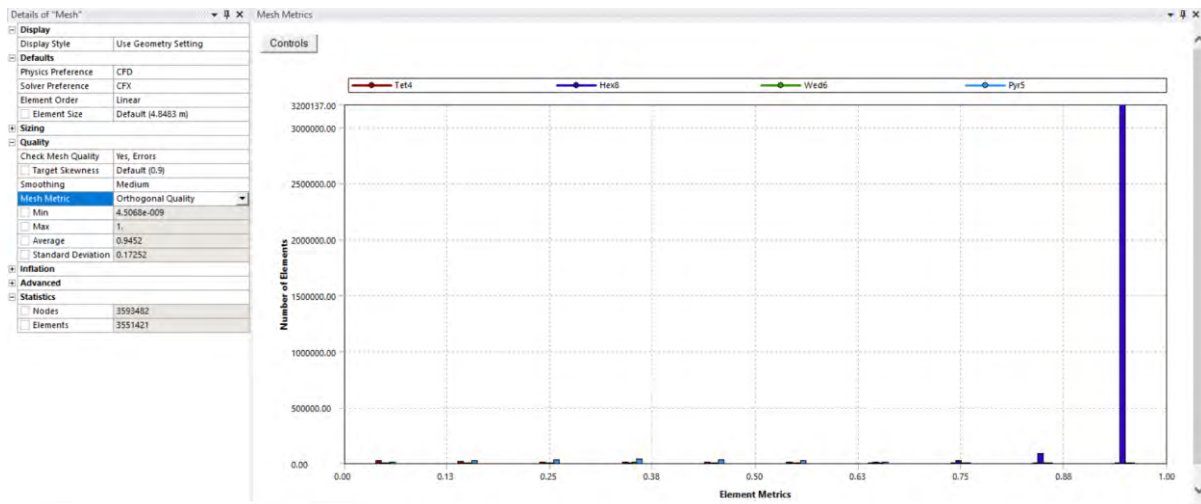
*Parámetro de calidad Aspect Ratio de la malla Hex Dominant.*



- ✓ Orthogonal Quality: Oscila entre 0 y 1, 0 indica baja calidad y 1 alta calidad porque indica que los ángulos de las celdas tienden a  $90^\circ$ . Se tiene un valor promedio de 0.9452 (ver figura 217).

**Figura 217**

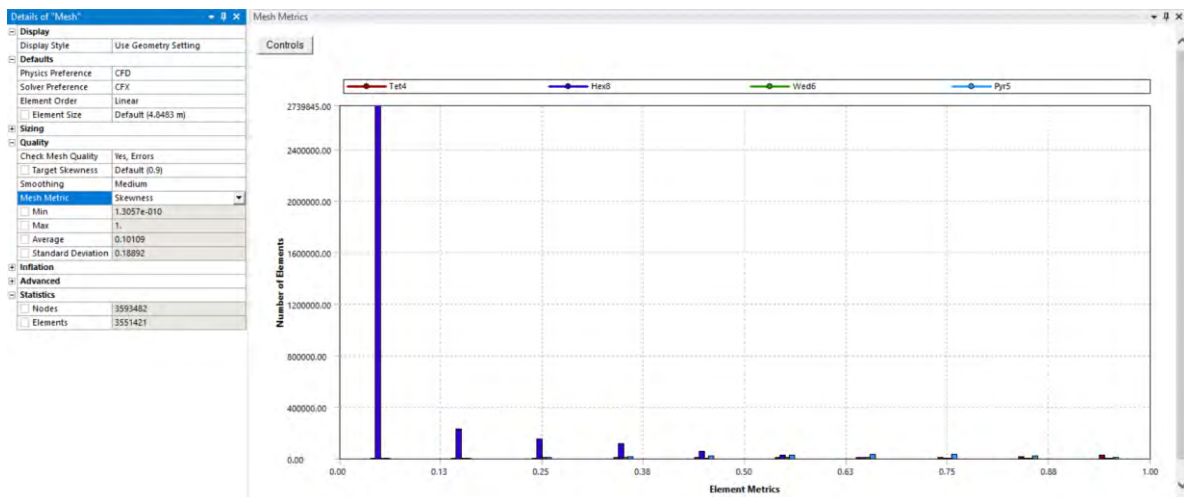
*Parámetro de calidad Orthogonal Quality de la malla Hex Dominant.*



- ✓ Skewness: Oscila entre 0 y 1, 0 indica alta calidad y 1 indica baja calidad. Se tiene un valor promedio de 0.10109 (ver figura 218).

**Figura 218**

*Parámetro de calidad Skewness de la malla Hex Dominant.*





### 5.1.2.2 Análisis del tipo de Mallado

- Número de nodos y elementos para los métodos MultiZone y Hex Dominant:

**Tabla 18**

*Número de nodos y elementos para los dos tipos de mallado.*

	<b>Nodos</b>	<b>Elementos</b>
<b>MultiZone</b>	3814421	3600321
<b>Hex Dominant</b>	3593482	3551421

- Se realizó el análisis de los parámetros de calidad de cada tipo de mallado, se obtuvo los siguientes valores (Ver Tabla 19):

**Tabla 19**

*Valores de los parámetros de calidad para los diferentes tipos de mallado.*

<b>Modelo final</b>				
<b>Parámetros de calidad / mallado</b>	<b>Multizone</b>	<b>Hex Dominant</b>	<b>Automatic</b>	<b>Tetrahedrons</b>
<b>Element quality</b> <b>0 – 1</b>	0.99148	0.94643	0.85493	0.85604
<b>Aspect radio</b> <b>1, &lt; 5</b>	1.0762	1.5954	1.7699	1.7684
<b>Ortogonalidad</b> <b>0 – 1</b>	0.99582	0.9452	0.79834	0.79994
<b>Skewness</b> <b>0 – 1</b>	3.1609e-002	0.10109	0.20255	0.20089
<b>Imbalances</b>	3.3647	7.1178	8.8384	3.9292

Se observa que el mallado MultiZone presenta mejores parámetros de calidad y los valores de los imbalances son bajos. El análisis de resultados se realizará en base a este modelo.

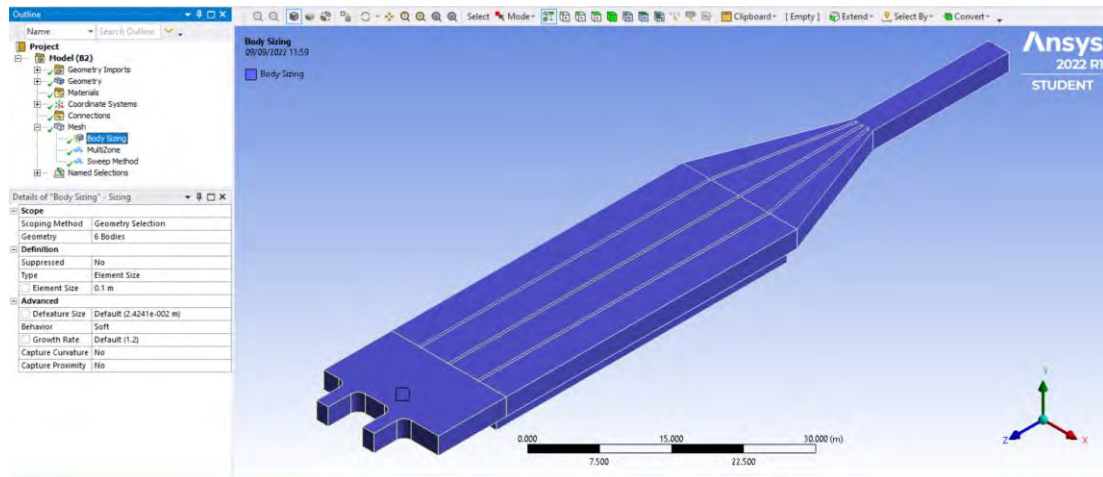


### 5.1.3 Configuración de la modelación

- Se aplicó un Body Sizing de 0.1 m a toda la geometría.

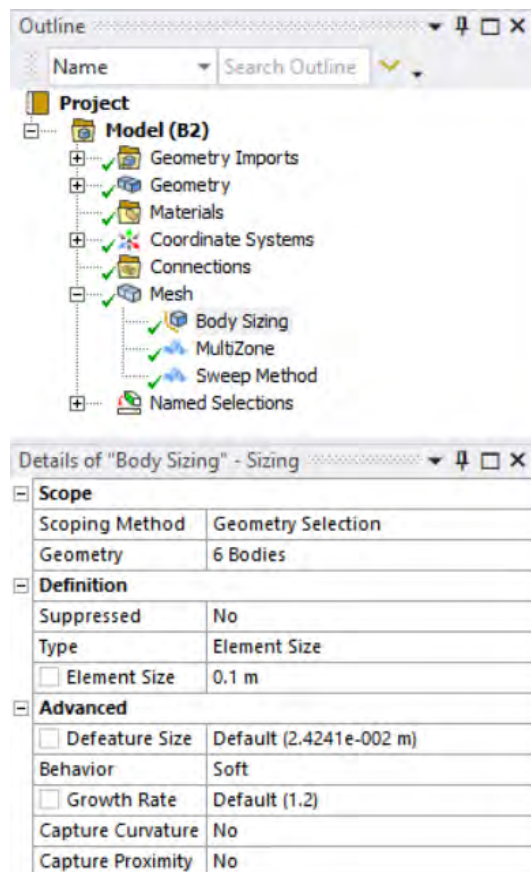
**Figura 219**

*Interfaz Mesh. Body Sizing del mallado de la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes.*



**Figura 220**

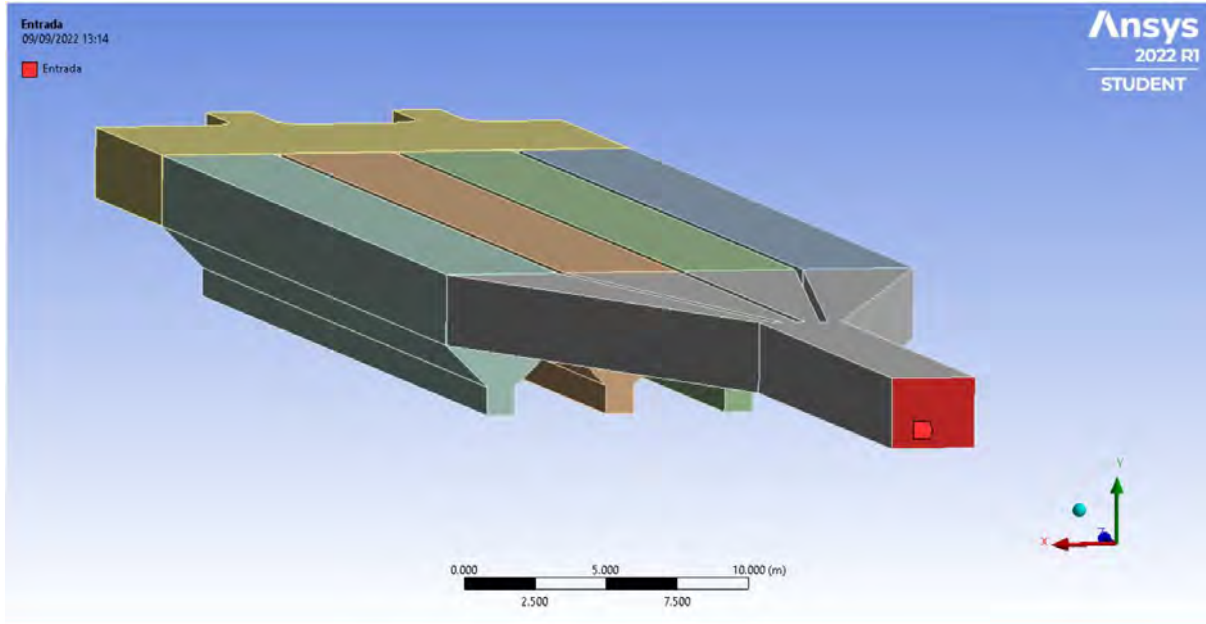
*Interfaz Mesh. Sizing del mallado de la geometría del modelo físico final del desarenador de Majes.*



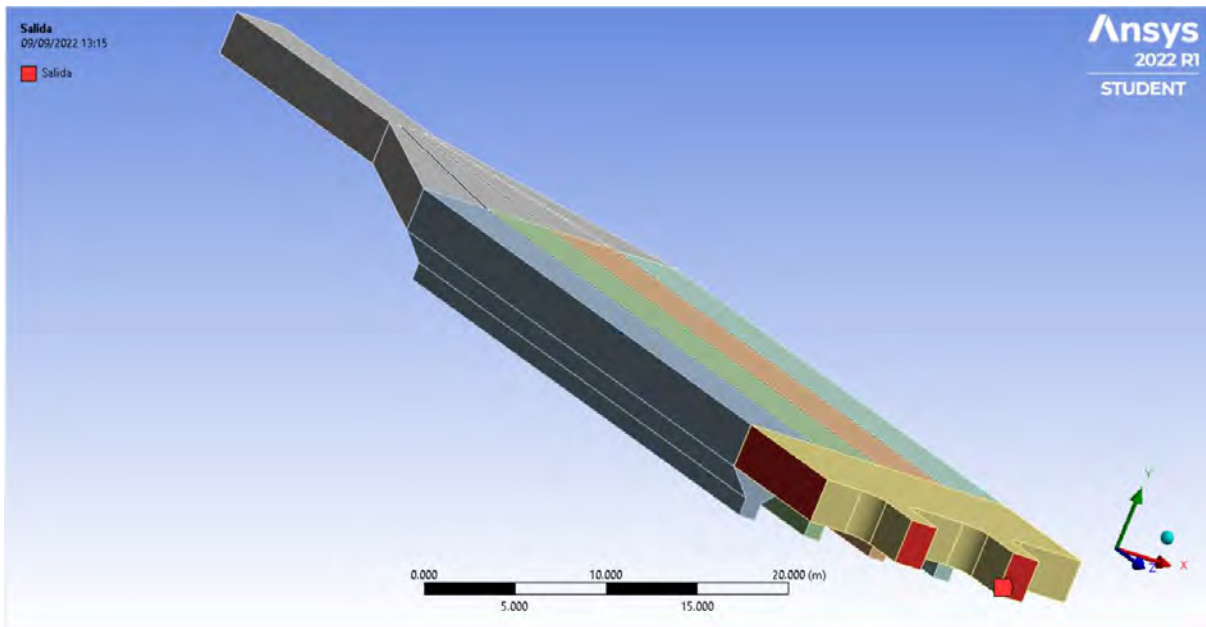
- Se nombra las partes del desarenador entrada, salida y superficie libre.

**Figura 221**

*Interfaz Mesh. Entrada del canal aguas arriba del desarenador.*

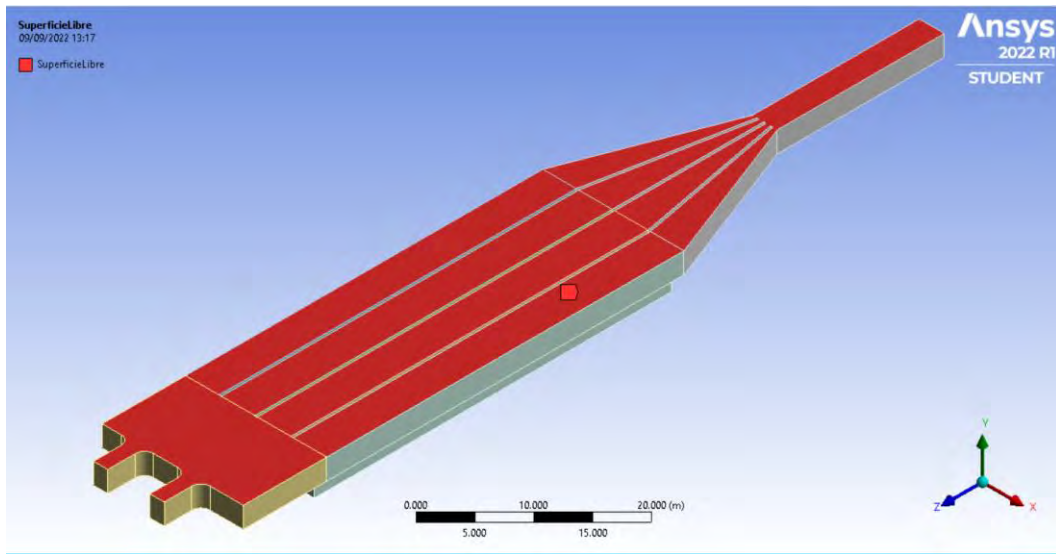
**Figura 222**

*Interfaz Mesh. Salida del desarenador.*



**Figura 223**

*Interfaz Mesh. Superficie libre del desarenador.*



### 5.1.4 Propiedades del fluido

Las propiedades del fluido se ingresan en la configuración *Setup*, los pasos se describen en el Capítulo 04.

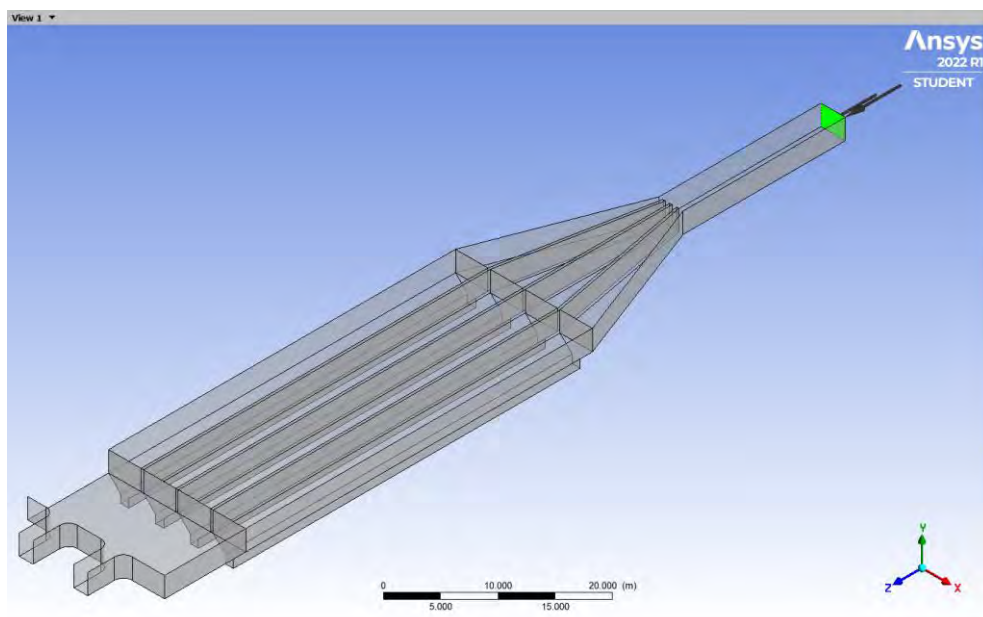
### 5.1.5 Condiciones de borde

La configuración de las condiciones de borde que describen el comportamiento del fluido dentro del desarenador se describe en el Capítulo 04.

#### 5.1.5.1 Entrada

**Figura 224**

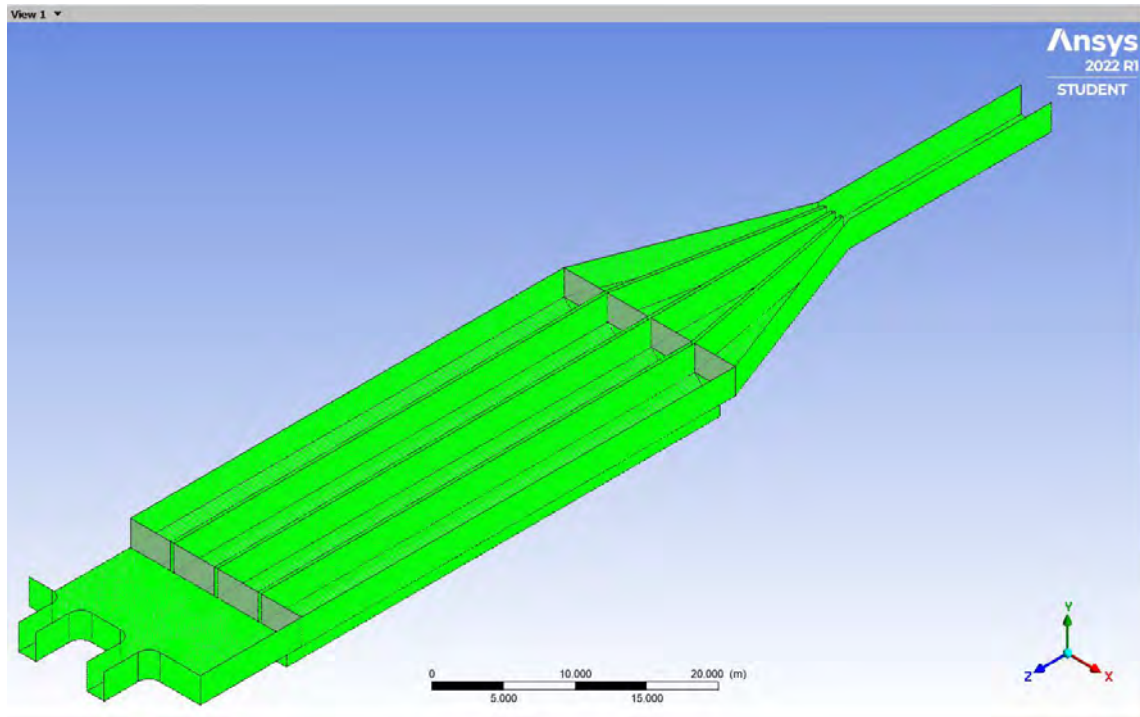
*Configuración de la frontera Entrada.*



### 5.1.5.2 Paredes

**Figura 225**

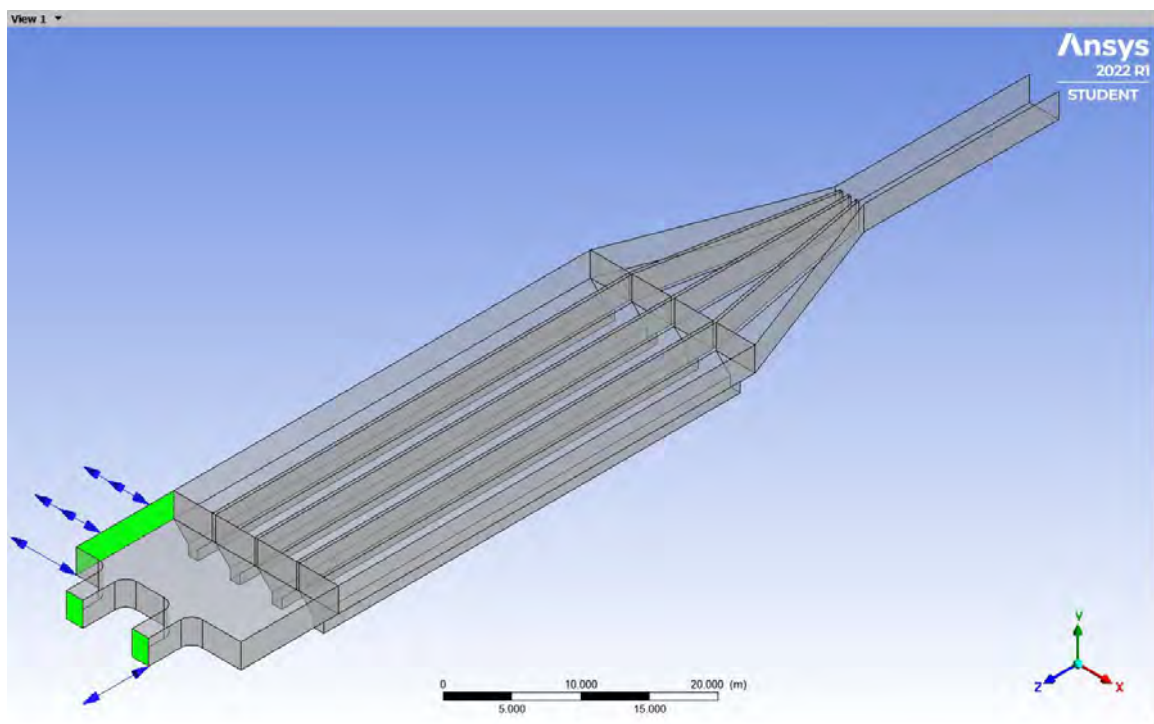
*Configuración de la frontera Paredes.*



### 5.1.5.3 Salida

**Figura 226**

*Configuración de la frontera Salida.*

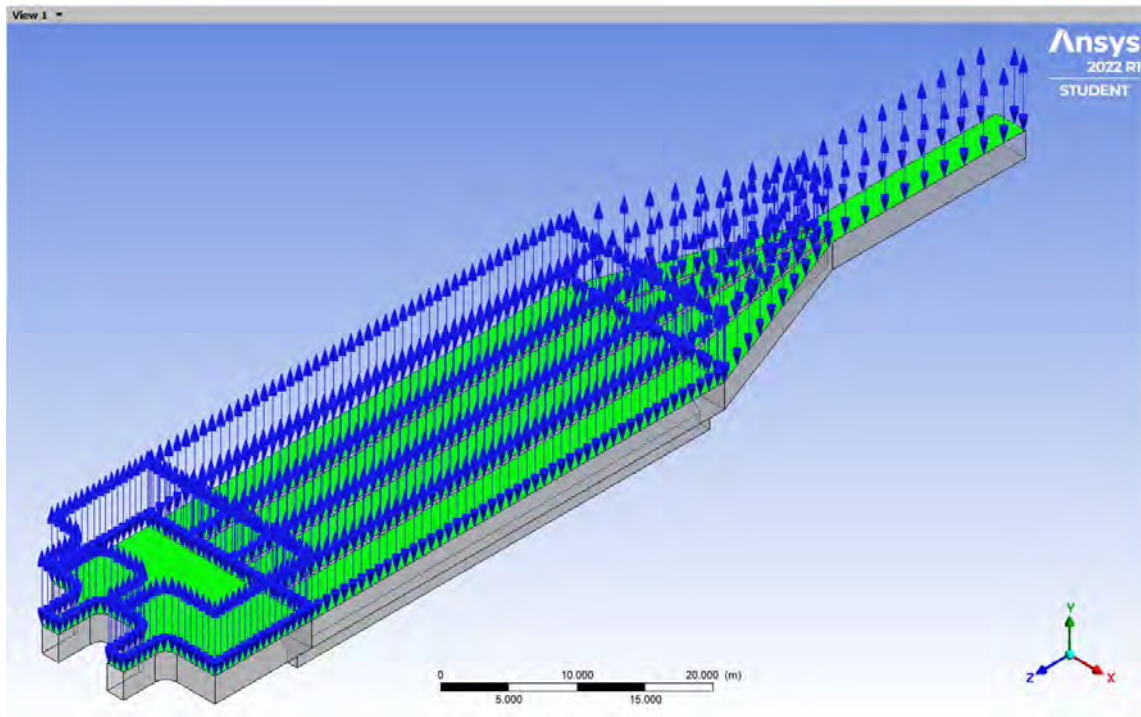




#### 5.1.5.4 Superficie libre

**Figura 227**

*Configuración de la frontera Superficie libre.*



#### 5.1.6 Configuración del tipo de análisis

Se define el tipo de análisis para flujo estacionario. Los pasos para la configuración se describen en el Capítulo 04.

#### 5.1.7 Control del solucionador

- Se verifica las unidades. Los pasos de la configuración se describen en el Capítulo 04.
- Se configura *Solver Control*: para 800 iteraciones y valor residual RMS de 0.0001, los pasos de la configuración se describen en el Capítulo 04.

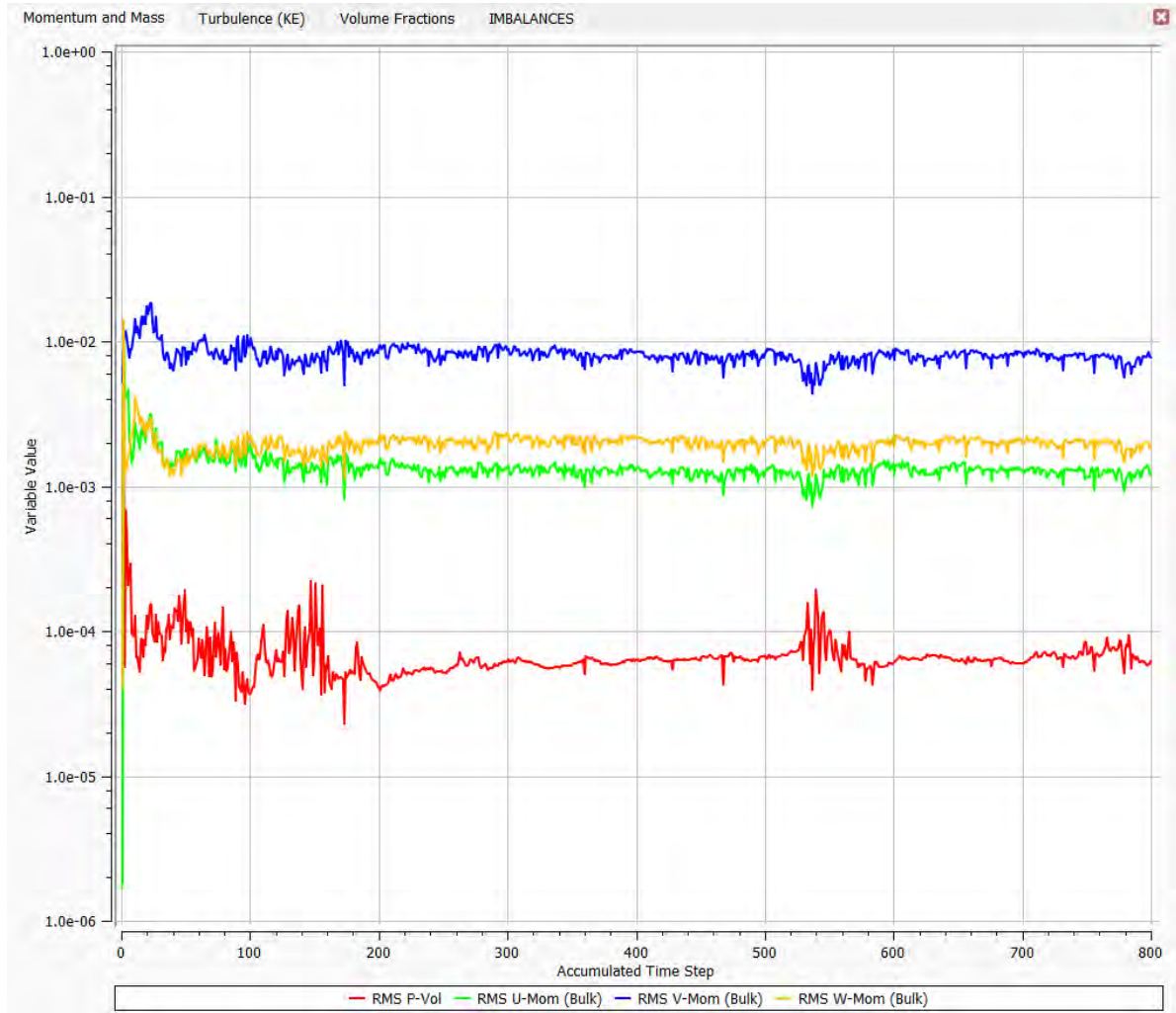


## 5.2 Etapa 2: Procesamiento

### a) Gráficas de residuos promedio de los volúmenes de control RMS del mallado MultiZone:

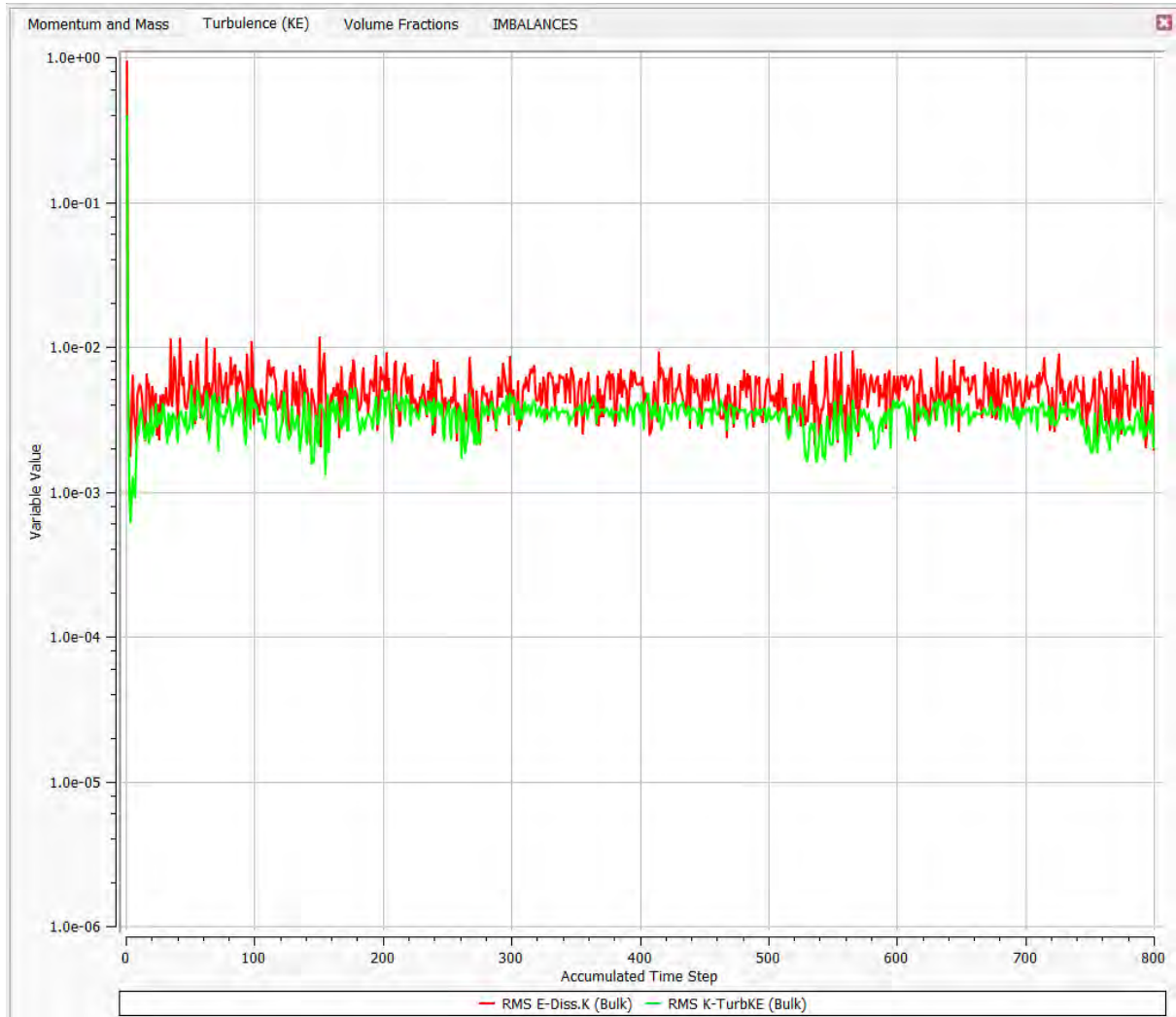
**Figura 228**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Momentum and Mass.*



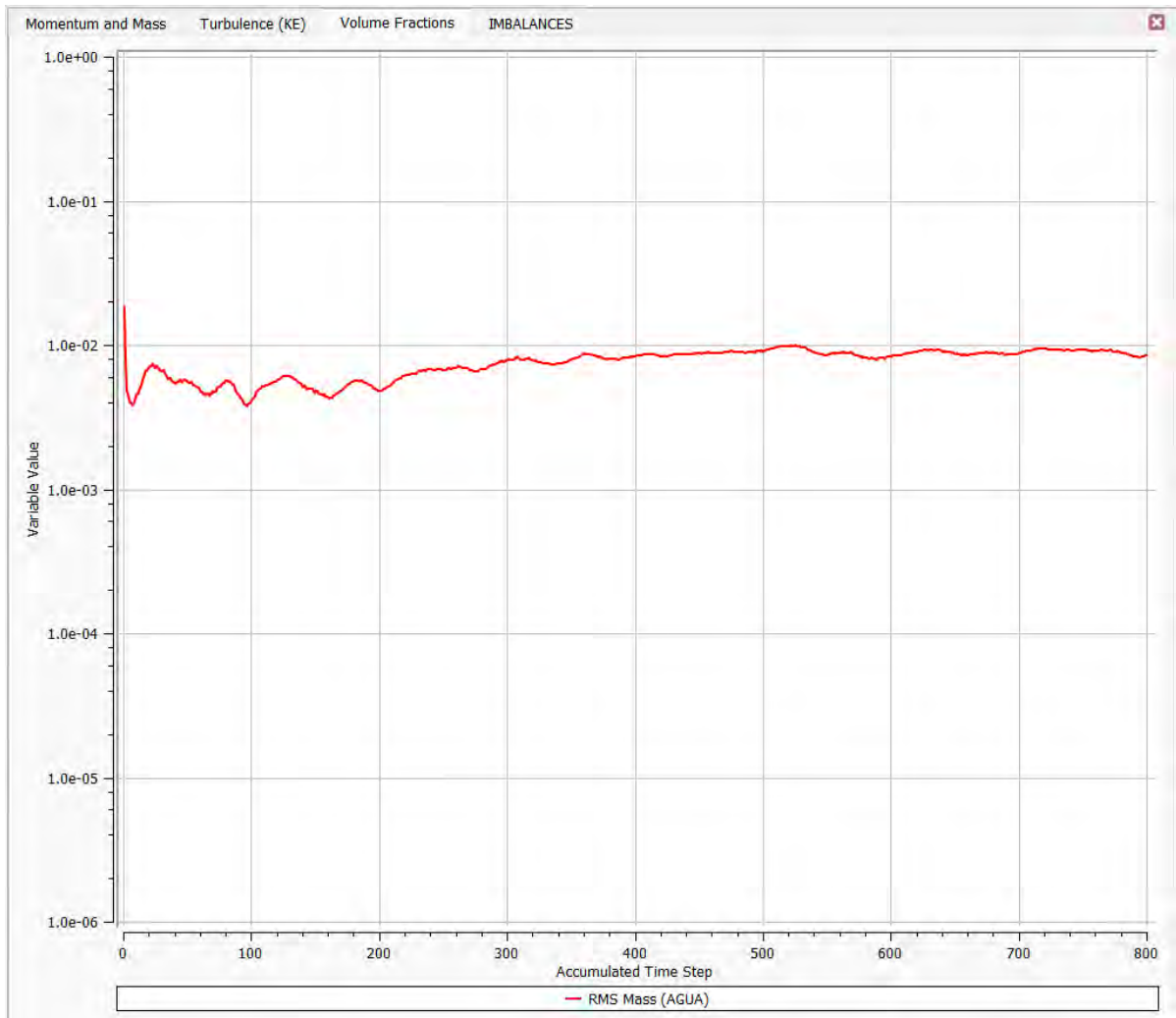
**Figura 229**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Turbulence (KE).*

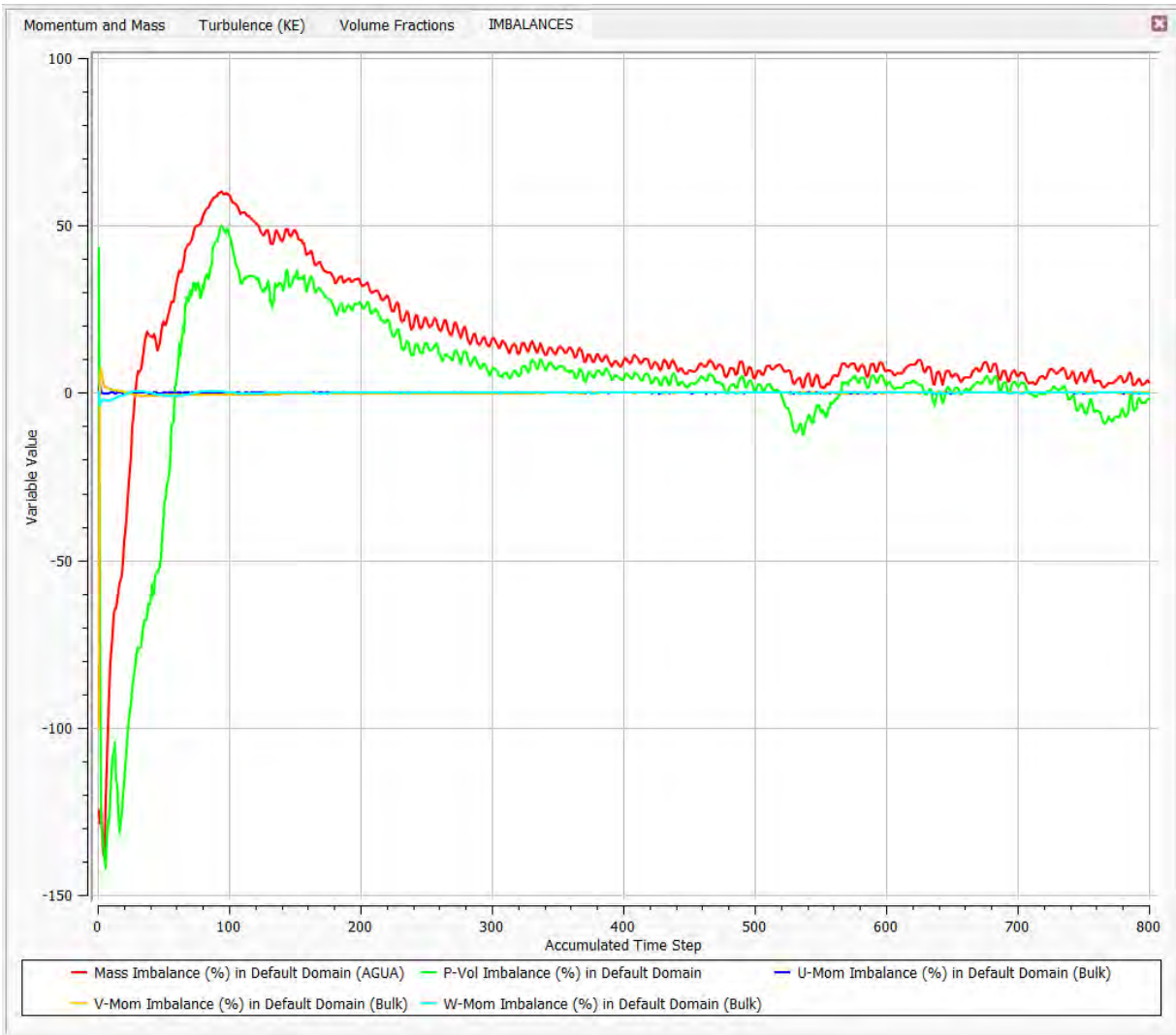


**Figura 230**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Volumen Fractions.*



**Figura 231**  
*Gráfica de Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido del mallado MultiZone.*



**Figura 232**  
*Cuadro de Imbalances del mallado MultiZone.*

Normalised Imbalance Summary		
Equation	Maximum Flow	Imbalance (%)
U-Mom-Bulk	1.7181E+07	-0.0693
V-Mom-Bulk	1.7181E+07	-0.0245
W-Mom-Bulk	1.7181E+07	-0.0396
P-Vol	1.9940E+04	-1.8978
Mass-AGUA	1.9940E+04	3.3647

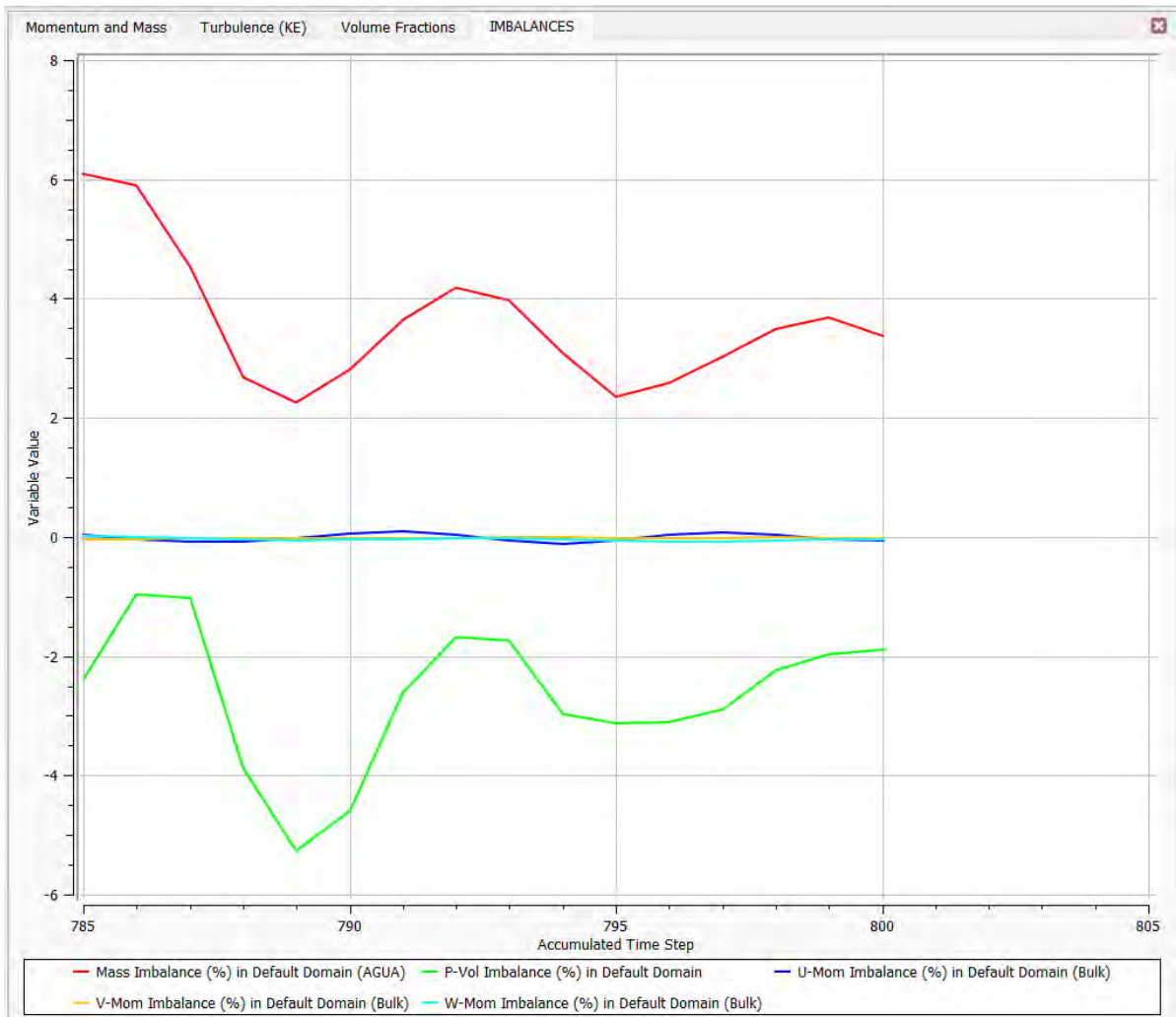
=====

Wall Force and Moment Summary

=====

**Figura 233**

*Gráfica de Imbalances del mallado MultiZone en un rango de estudio más reciente.*

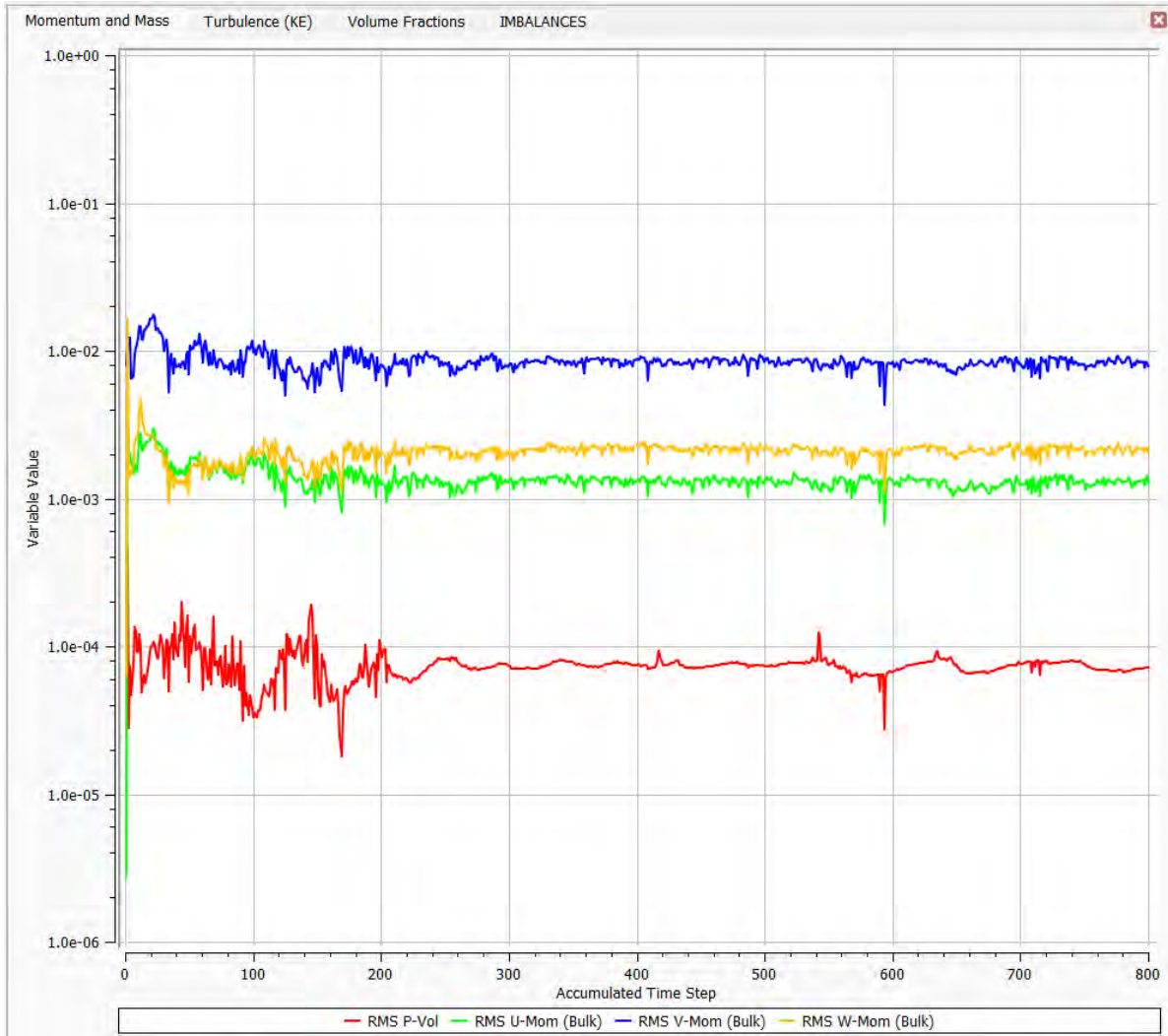




**b) Gráficas de residuos promedio de los volúmenes de control RMS del mallado Hex Dominat:**

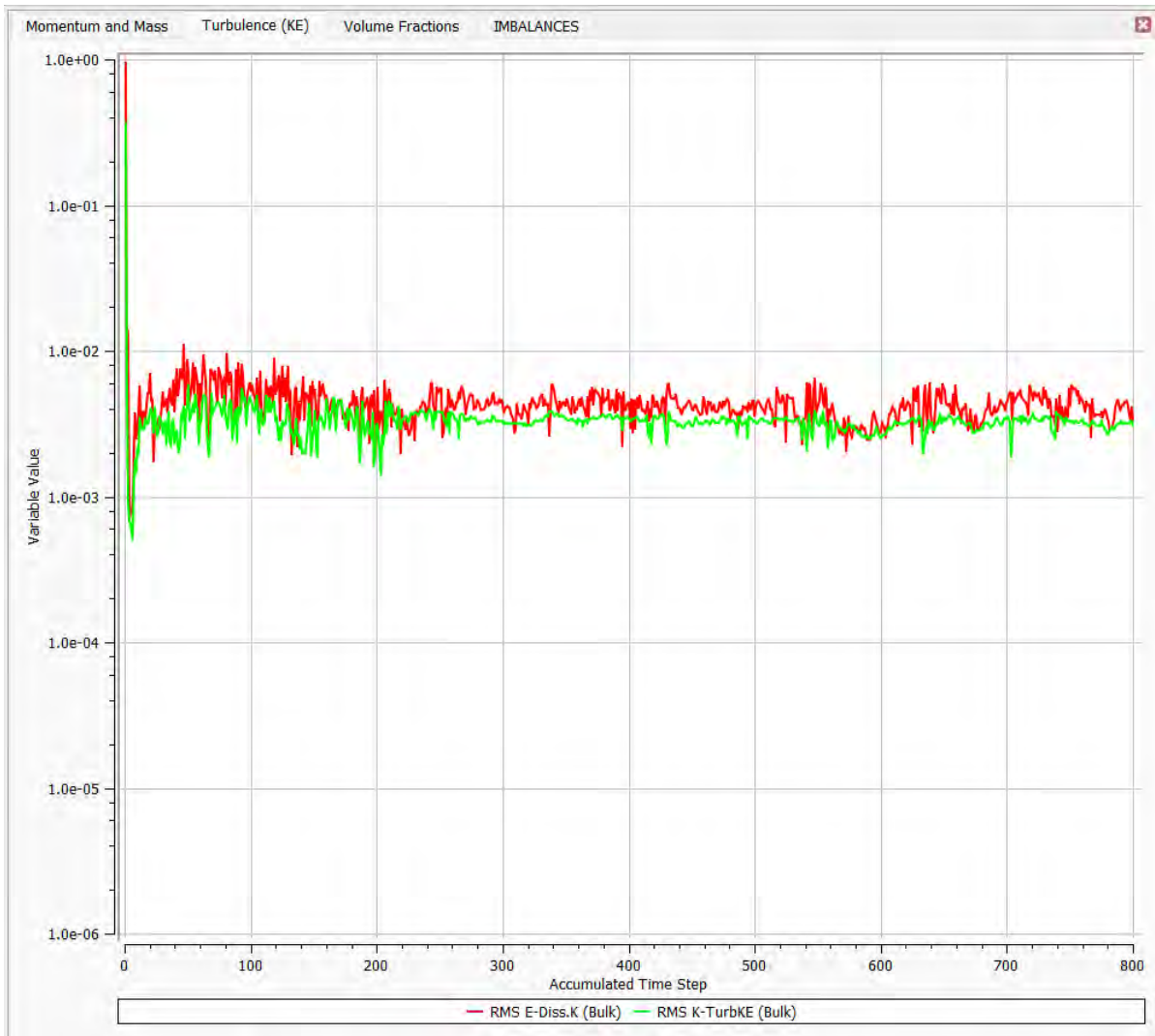
**Figura 234**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Momentum and Mass.*



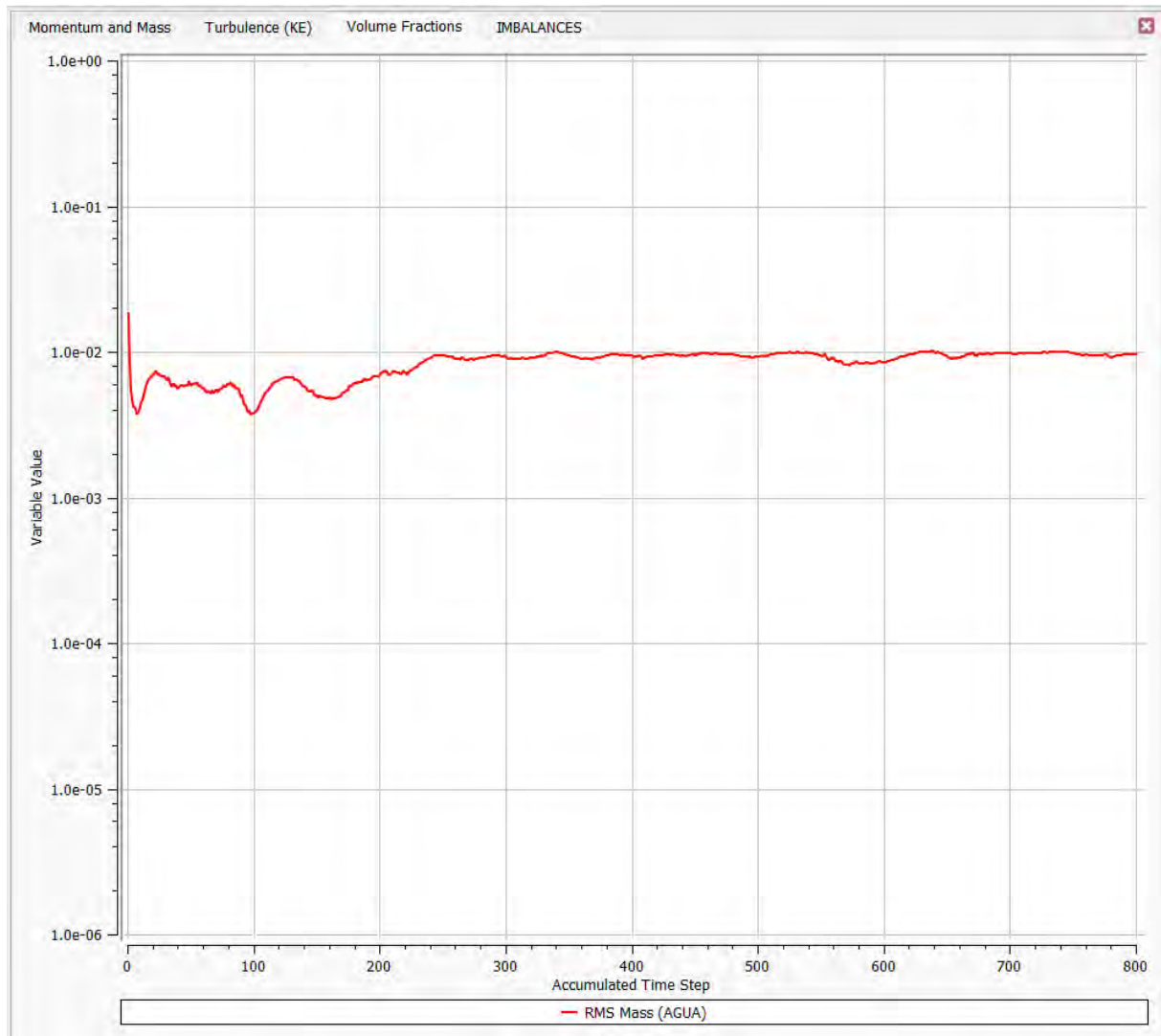
**Figura 235**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Turbulence (KE).*



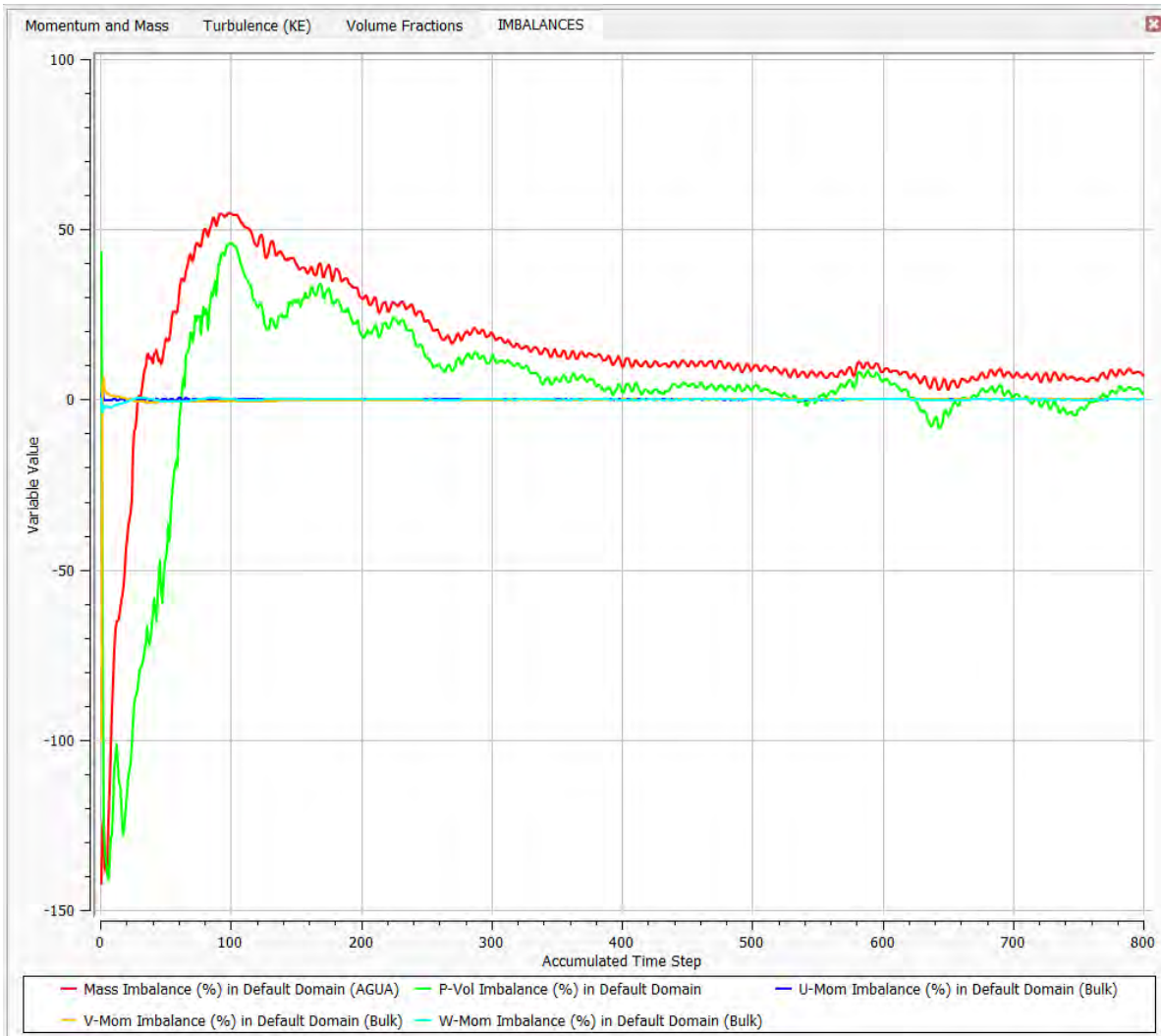
**Figura 236**

*Gráfica de residuos promedio de las ecuaciones de conservación de Volumen Fractions.*



**Figura 237**

*Gráfica de Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido del mallado Hex Dominant.*

**Figura 238**

*Cuadro de Imbalances del mallado Hex Dominat.*

Normalised Imbalance Summary		
Equation	Maximum Flow	Imbalance (%)
U-Mom-Bulk	1.7158E+07	-0.0142
V-Mom-Bulk	1.7158E+07	-0.0122
W-Mom-Bulk	1.7158E+07	-0.0195
P-Vol	1.9940E+04	1.6626
Mass-AGUA	1.9940E+04	7.1178

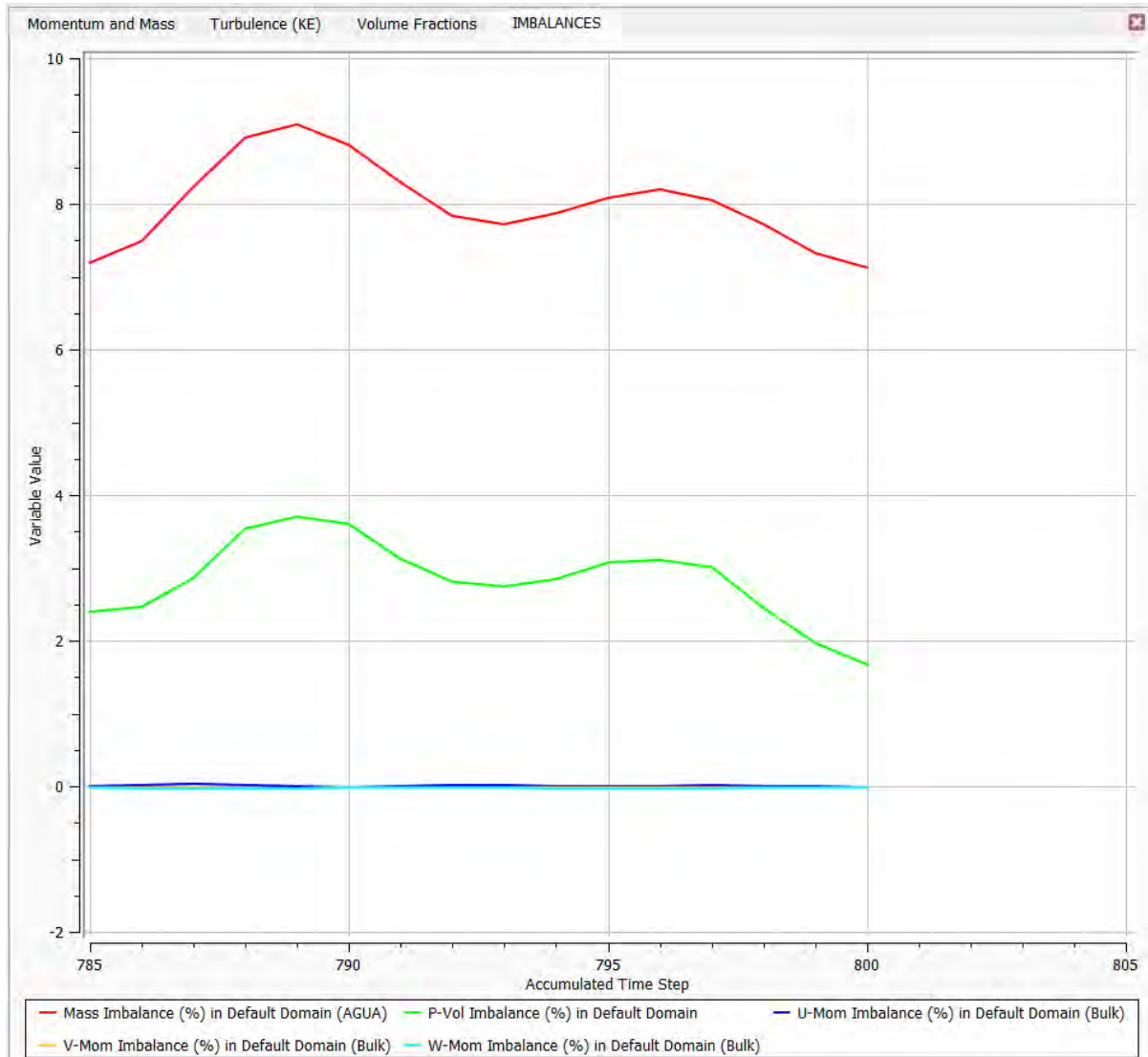
=====

Wall Force and Moment Summary

=====

**Figura 239**

*Gráfica de Imbalances del mallado Hex Dominant en un rango de estudio más reciente.*



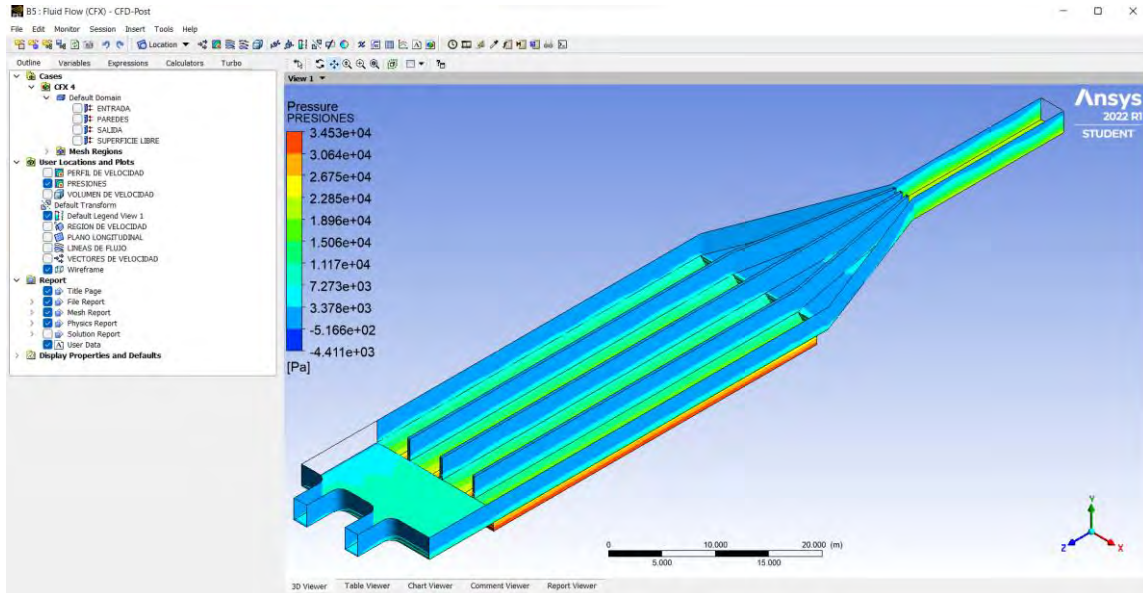


### 5.3 Etapa 3: Post-procesamiento

Se presentan los resultados de la simulación del modelo final del desarenador de Majes.

**Figura 240**

*Vista preliminar del modelo físico final a escala en la ventana Results – CFD-Post.*

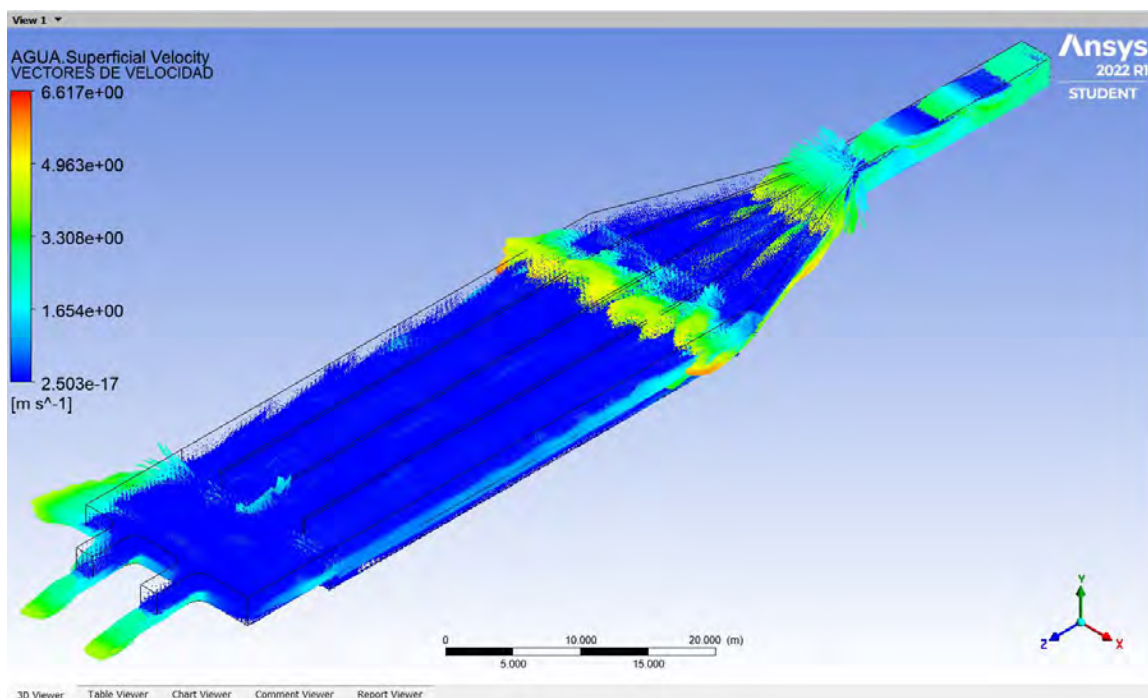


#### 5.3.1 Vectores de velocidad

- Variable: AGUA.Superficial Velocity

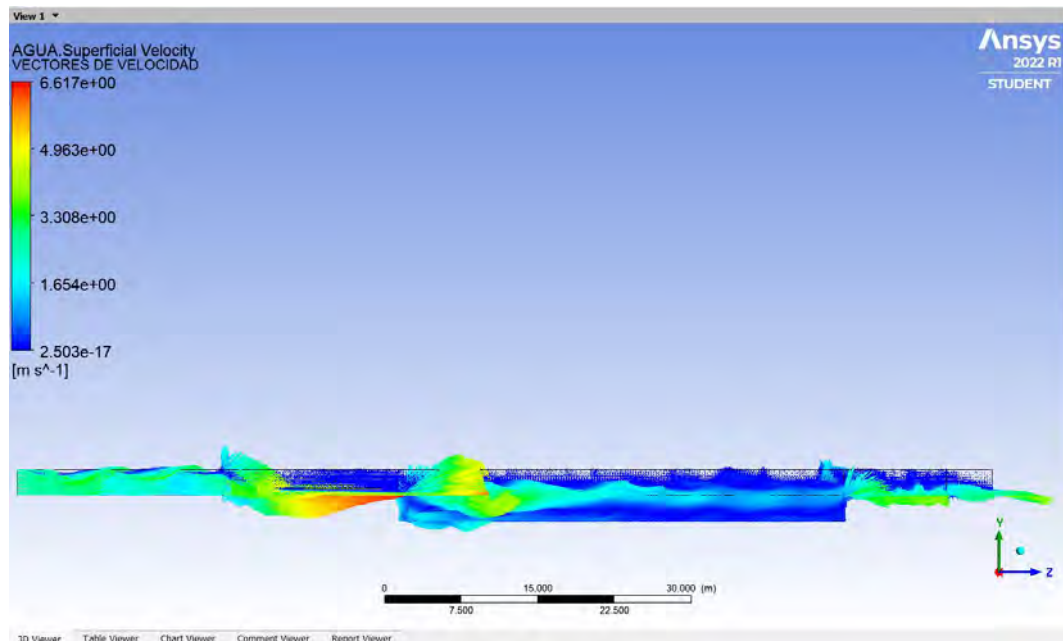
**Figura 241**

*Vectores de velocidad en el modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*



**Figura 242**

*Vectores de velocidad en un perfil longitudinal en el modelo físico final a escala del Desarenador de Majes.*

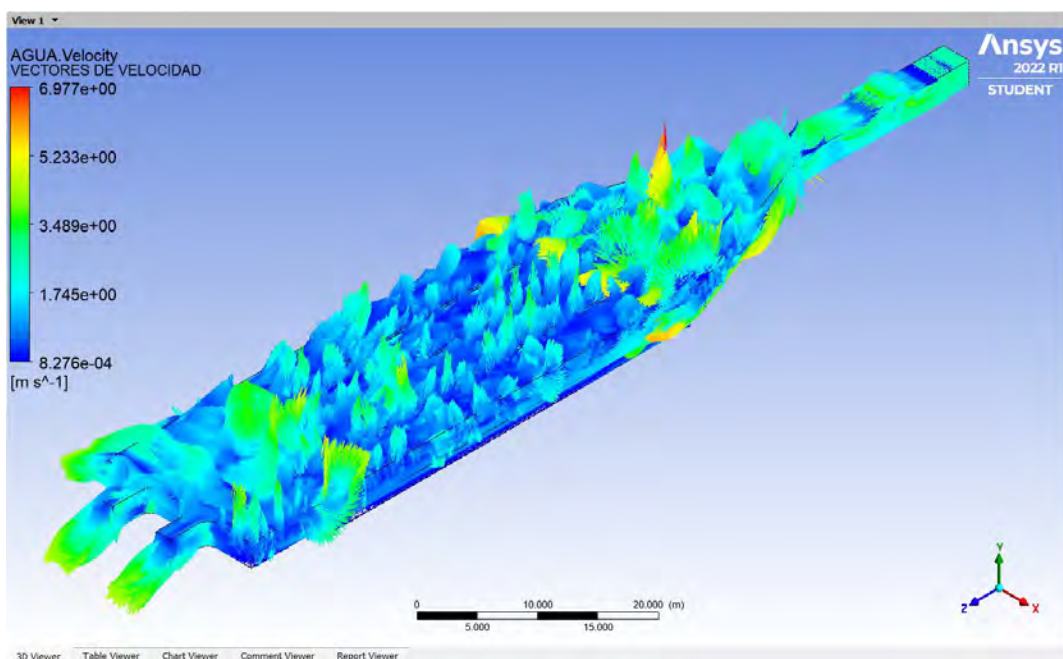


Se observa una velocidad máxima de 6.6167 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $2.503 \times 10^{-17}$  m/s en las naves.

- Variable: AGUA.Velocity.

**Figura 243**

*Vectores de velocidad en el modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*



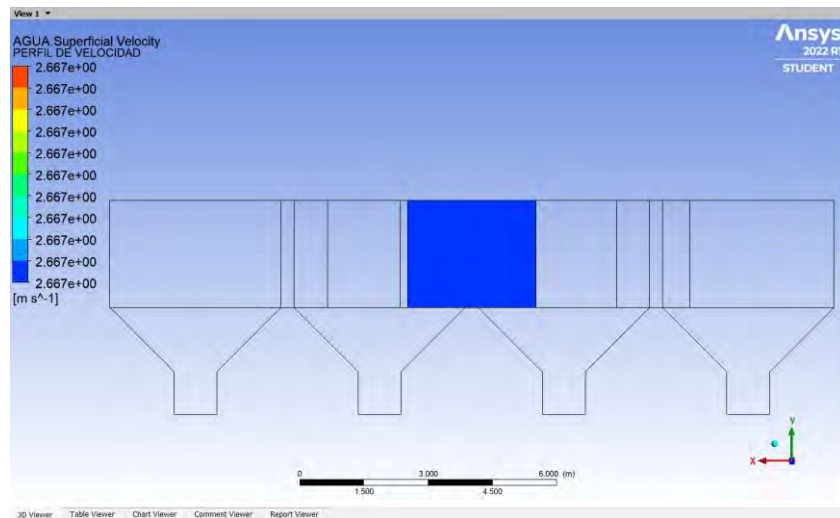
Se observa una velocidad máxima de 6.977 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $8.276 \times 10^{-4}$  m/s en las naves.

### 5.3.2 Perfiles de velocidad

#### 5.3.2.1 Entrada

**Figura 244**

*Perfil de velocidad en la entrada del canal aguas arriba del desarenador.*

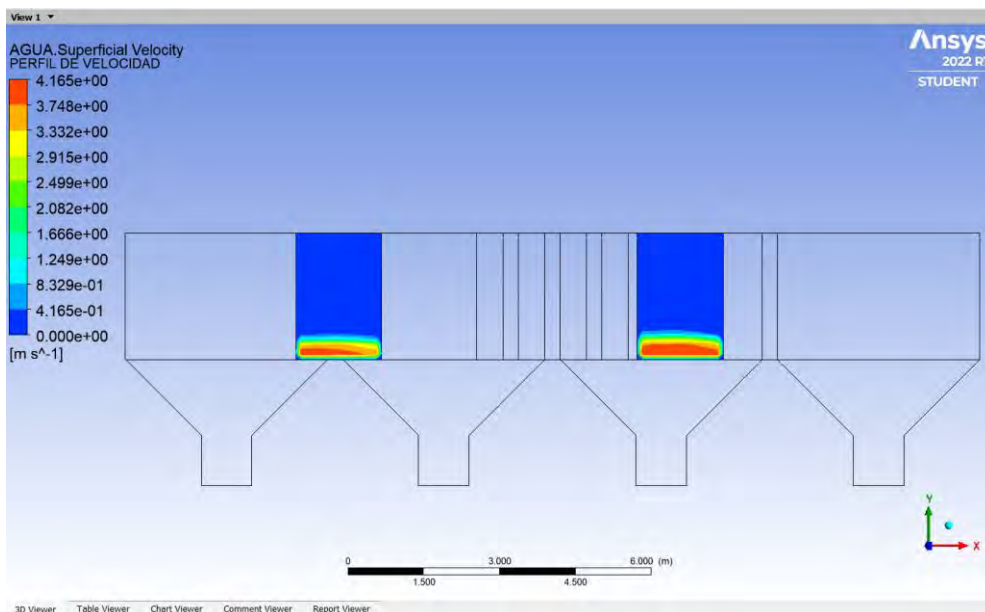


Se observa que la velocidad es de 2.67 m/s, la misma que se definió como condición de borde en la configuración del *Stup*.

#### 5.3.2.2 Salida

**Figura 245**

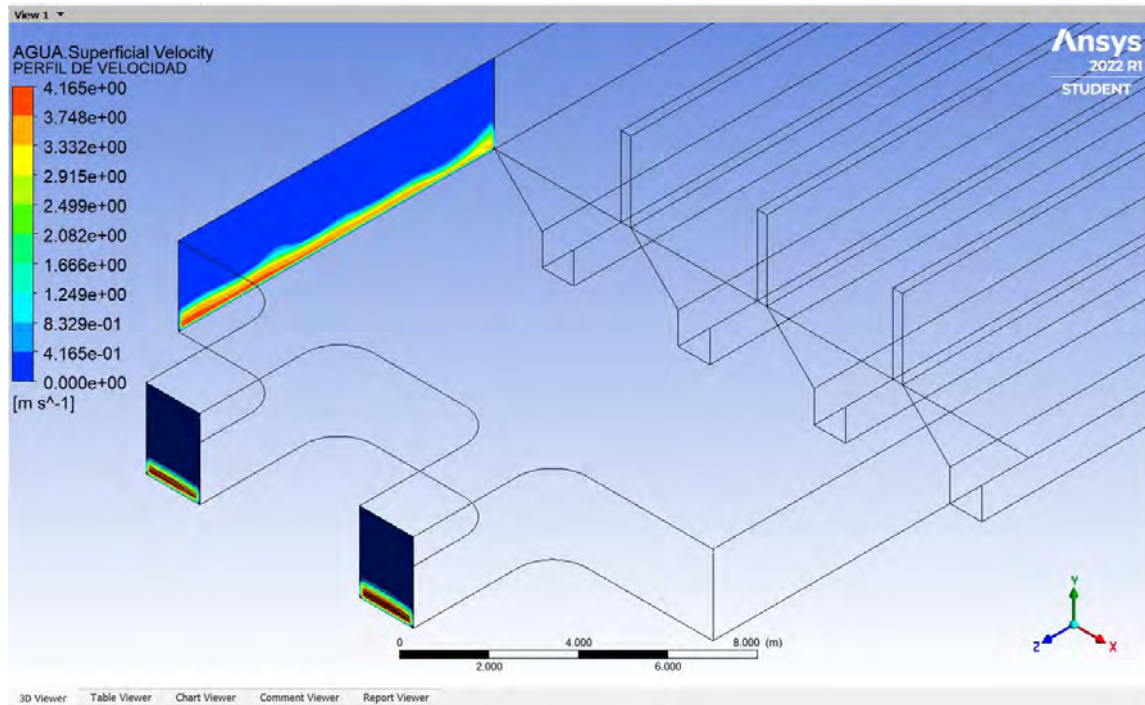
*Perfil de velocidad en la salida del desarenador.*





**Figura 246**

*Perfil de velocidad en la salida del desarenador.*

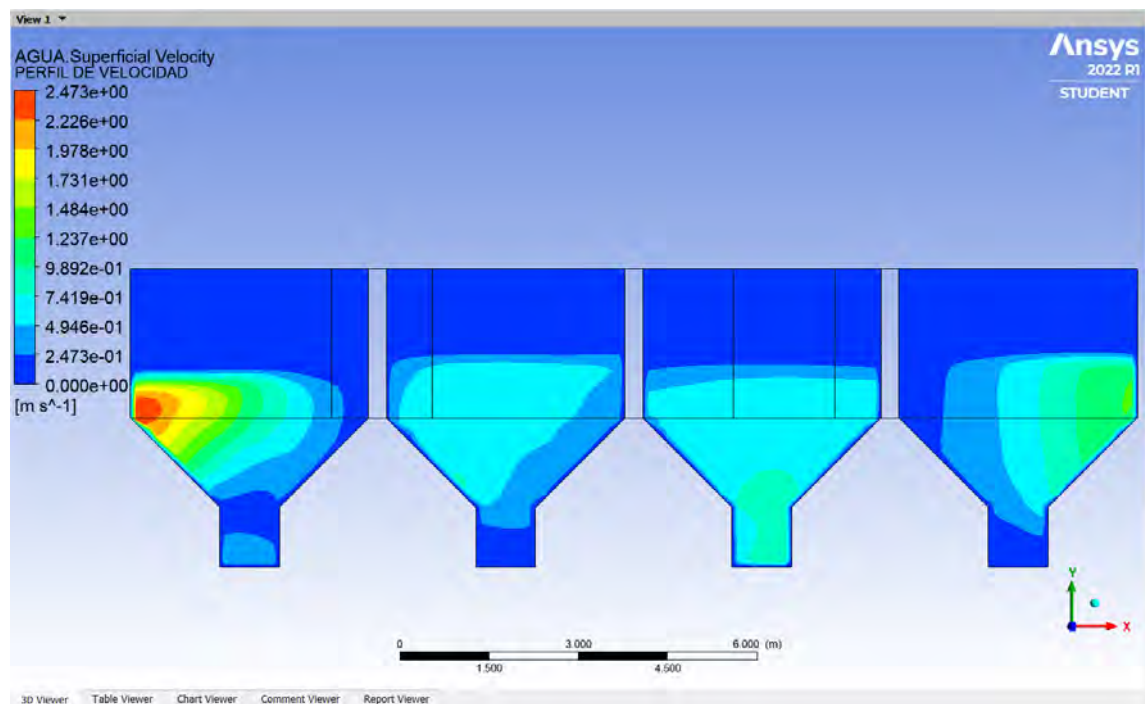


Se observa que la máxima velocidad es de 4.165 m/s.

### 5.3.2.3 En un plano transversal

**Figura 247**

*Perfiles de velocidad en un plano transversal.*

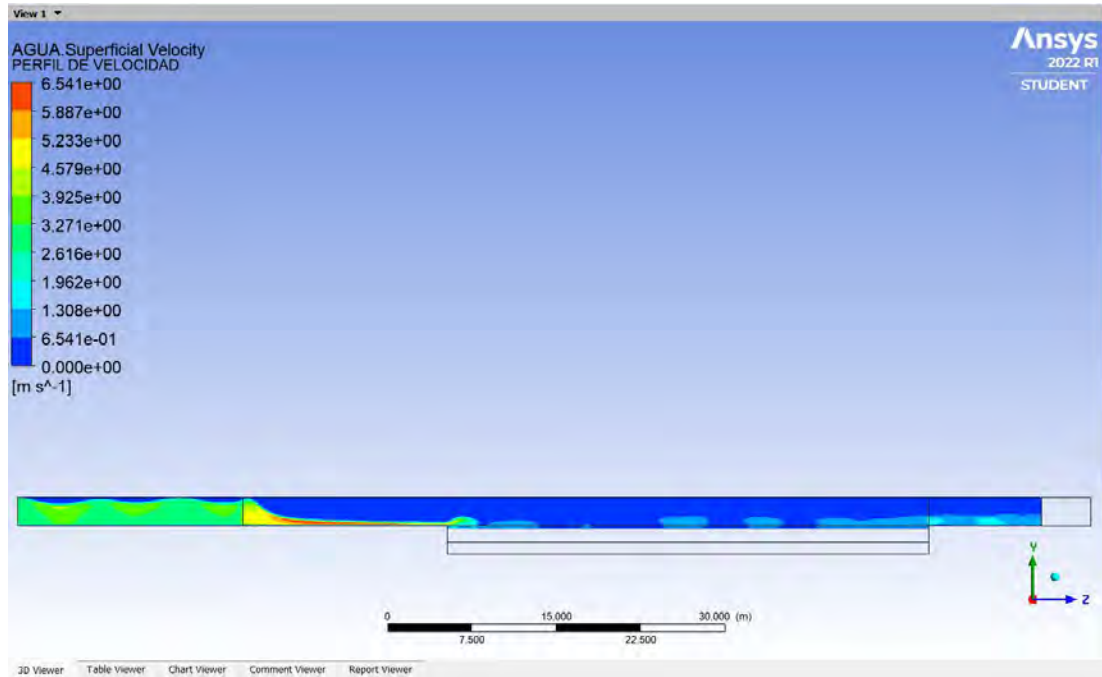


Se observa que la máxima velocidad en un plano transversal es de 2.473 m/s, este plano está a 40 m en la dirección Z, y se ubica en las naves del desarenador.

#### 5.3.2.4 En un plano longitudinal

**Figura 248**

*Perfiles de velocidad en un plano longitudinal.*



Se observa que la máxima velocidad es de 6.541 m/s en la transición de entrada y el desarenador y en el ingreso de las naves.

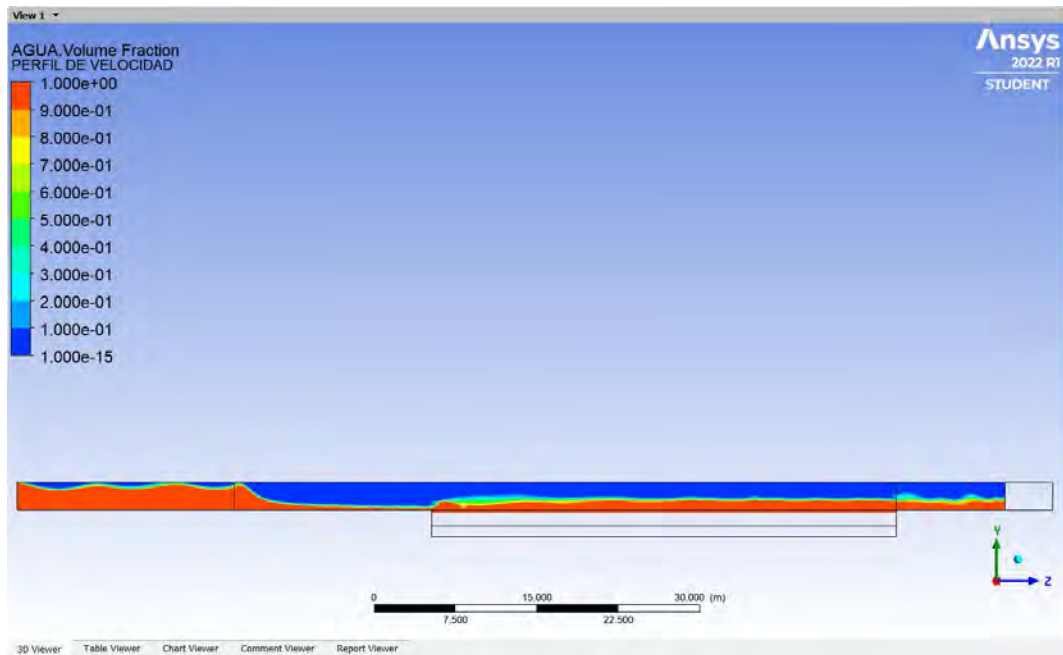


### 5.3.3 Fracción de volumen: plano longitudinal

- Variable: AGUA.Volumen Fraction

**Figura 249**

*Perfiles de velocidad: fracción de volumen en un plano longitudinal, para una velocidad de flujo en el canal aguas arriba del desarenador de 2.67 m/s.*

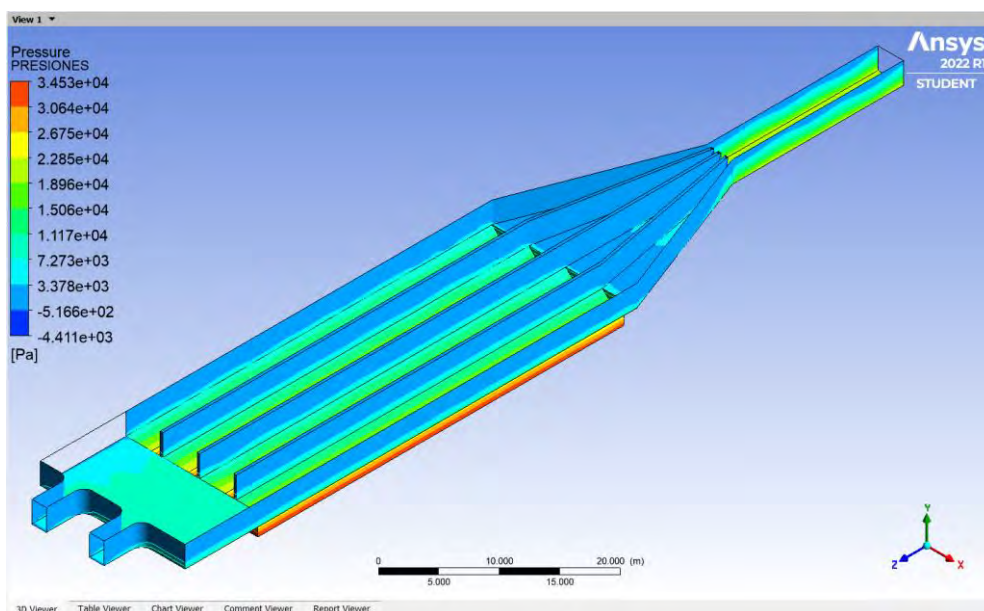


### 5.3.4 Presiones

Gráfica de presiones en las paredes del desarenador:

**Figura 250**

*Perfiles de velocidad de presiones en las paredes del desarenador.*



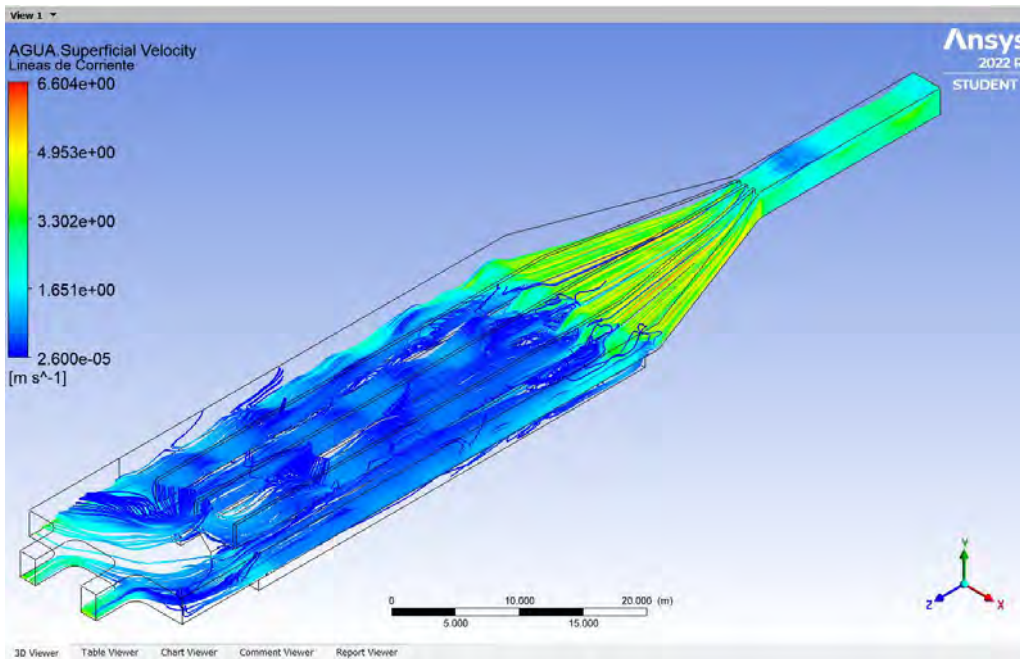
Se observa una presión mínima de  $-4411.2$  [Pa] y una presión máxima de  $34534.6$  [Pa] en las paredes de las naves del desarenador.

### 5.3.5 Líneas de corriente

- Variable: AGUA.Superficial Velocity

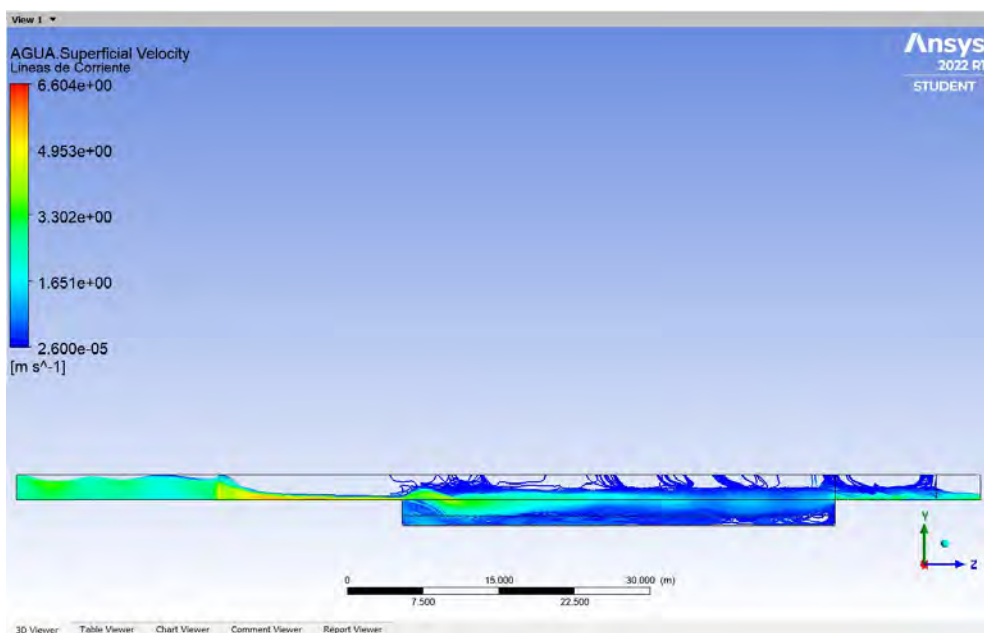
**Figura 251**

*Líneas de corriente del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*



**Figura 252**

*Líneas de corriente en un perfil longitudinal del modelo físico original a escala del desarenador de Majes.*

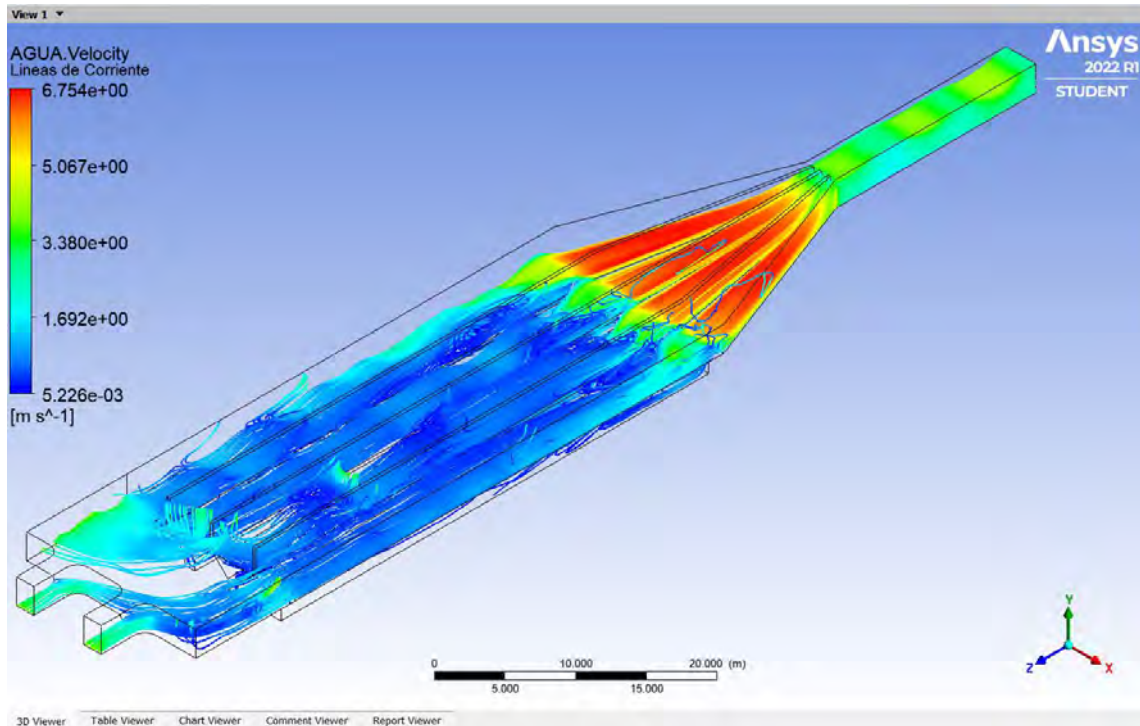


Se observa una velocidad máxima de 6.604 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $2.5999 \times 10^{-5}$  m/s en las naves.

- Variable: AGUA. Velocity

### Figura 253

*Líneas de corriente de los vectores de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*



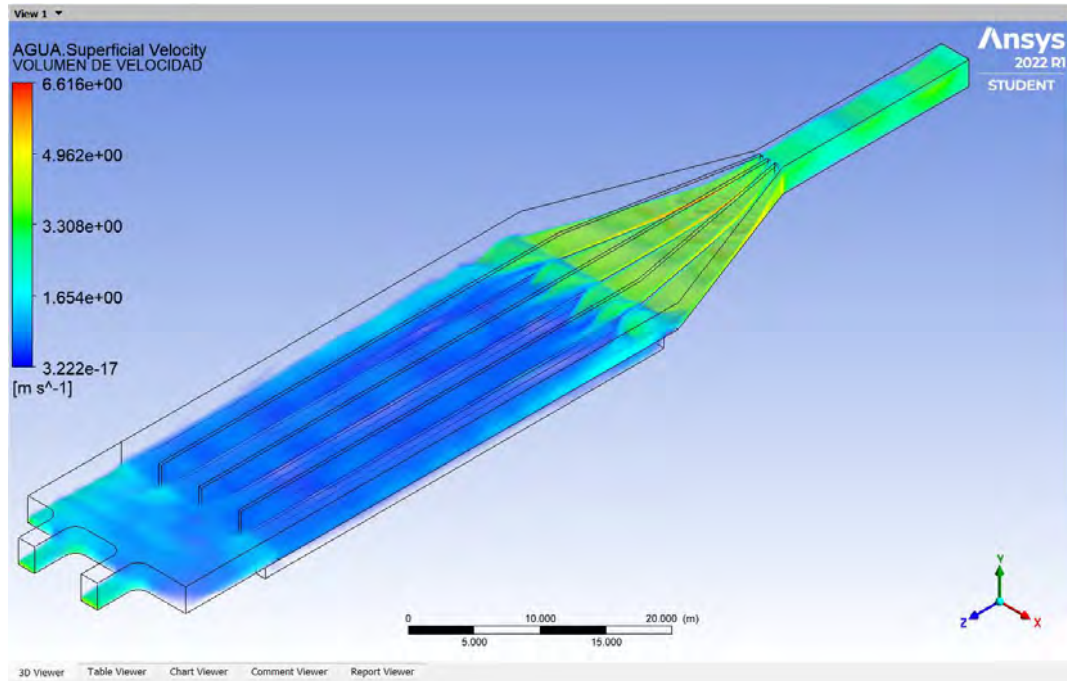
Se observa una velocidad máxima de 6.754 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida, y una velocidad mínima de  $5.226 \times 10^{-3}$  m/s en las naves.

### 5.3.6 Volumen de velocidad

- Variable: AGUA.Superficial Velocity

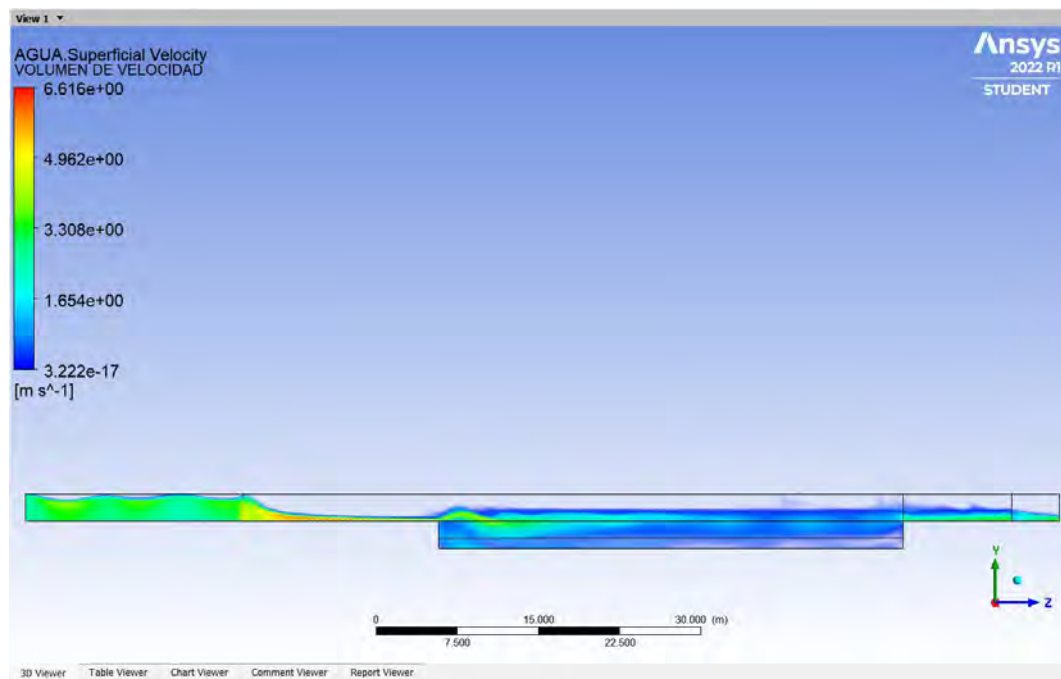
**Figura 254**

*Volumen de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*



**Figura 255**

*Volumen de velocidad en un perfil longitudinal del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*

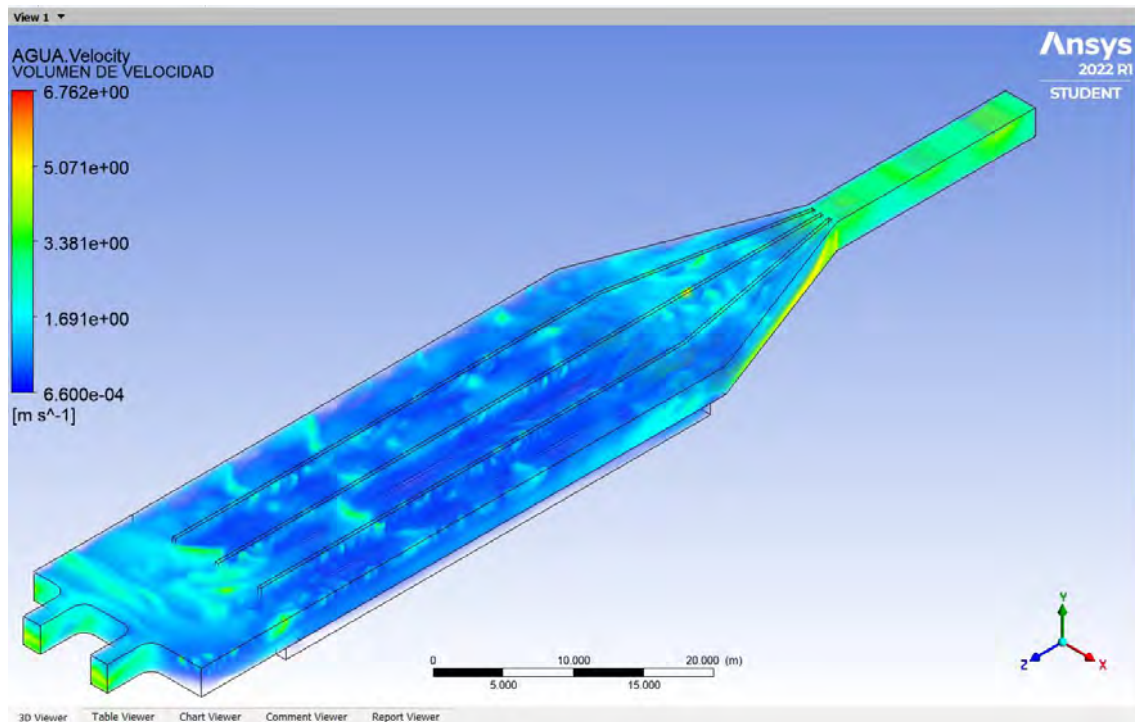


Se observa una velocidad máxima de 6.616 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $3.222 \times 10^{-17}$  m/s en las naves del desarenador.

- Variable: AGUA. Velocity

**Figura 256**

*Volumen de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*



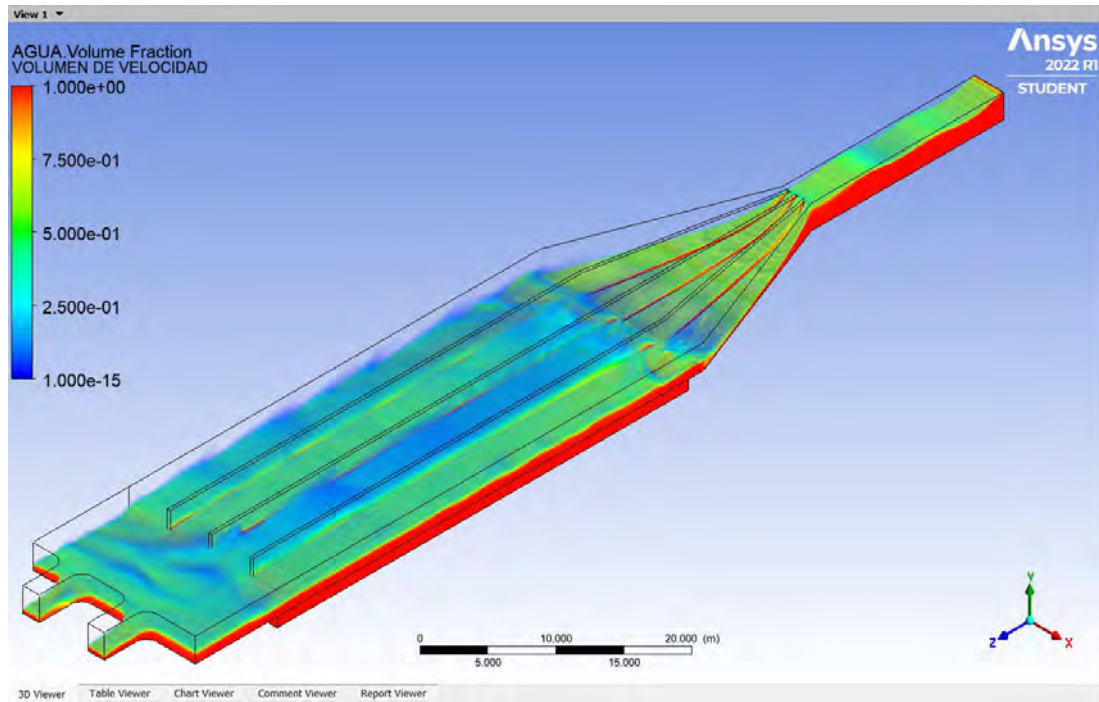
Se observa una velocidad máxima de 6.762 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de  $6.600 \times 10^{-04}$  m/s en las naves.



### 5.3.7 Volumen de velocidad: fracción de volumen

**Figura 257**

*Volumen de velocidad: fracción de volumen del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*

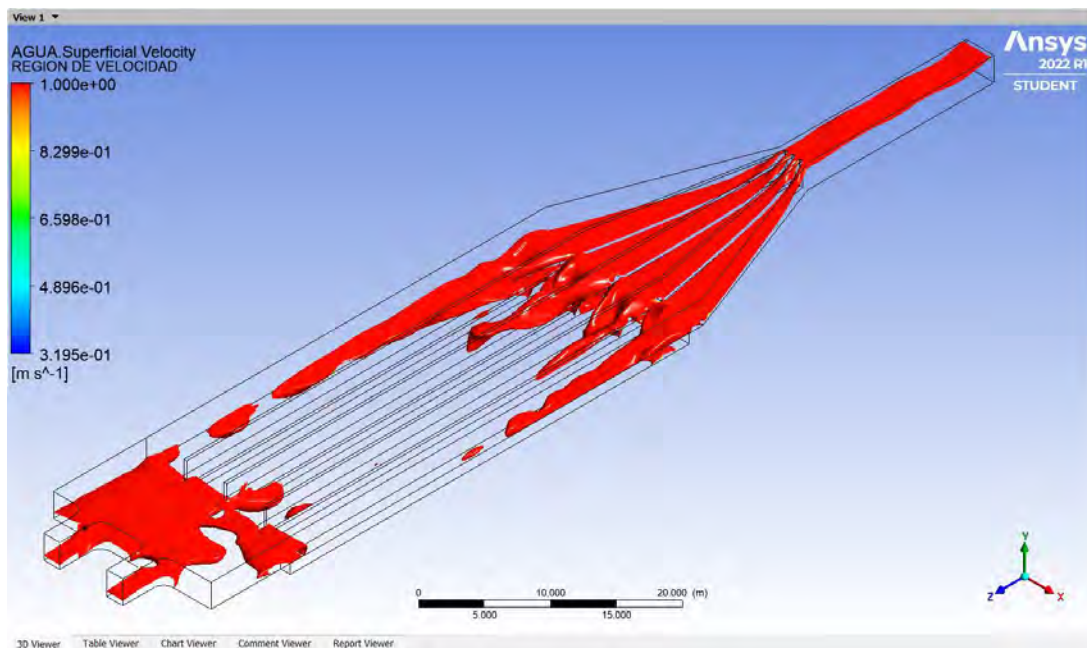


### 5.3.8 Región sólida: velocidad

- Variable: AGUA.Surface Velocity

**Figura 258**

*Región de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*

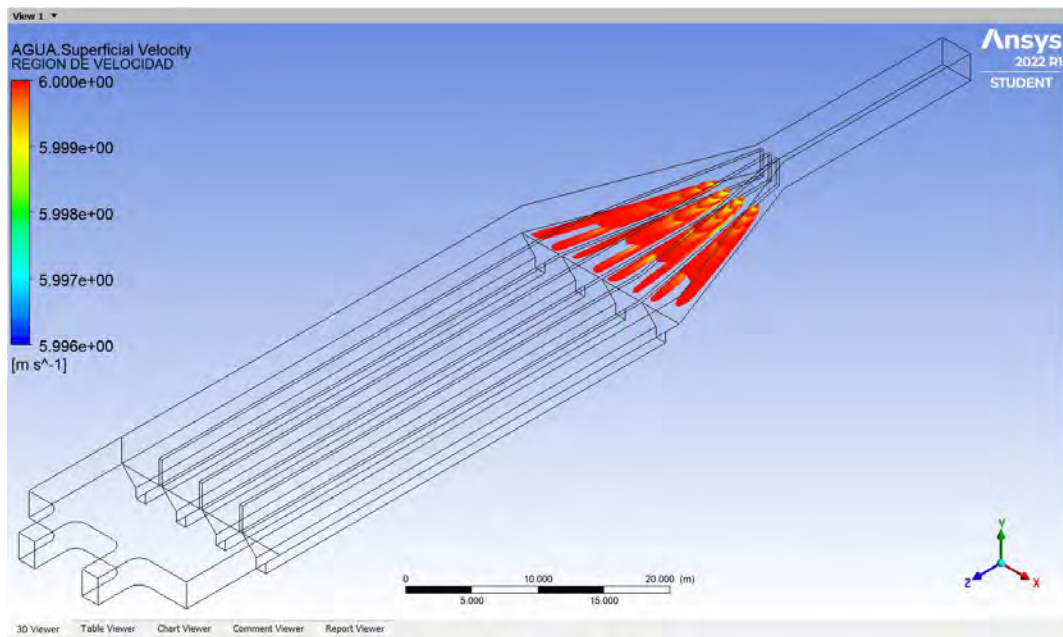


Se observa una velocidad máxima de 1 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de 0.3195 m/s.

Se observa máximas velocidades en la transición de entrada del desarenador (ver figura 259):

**Figura 259**

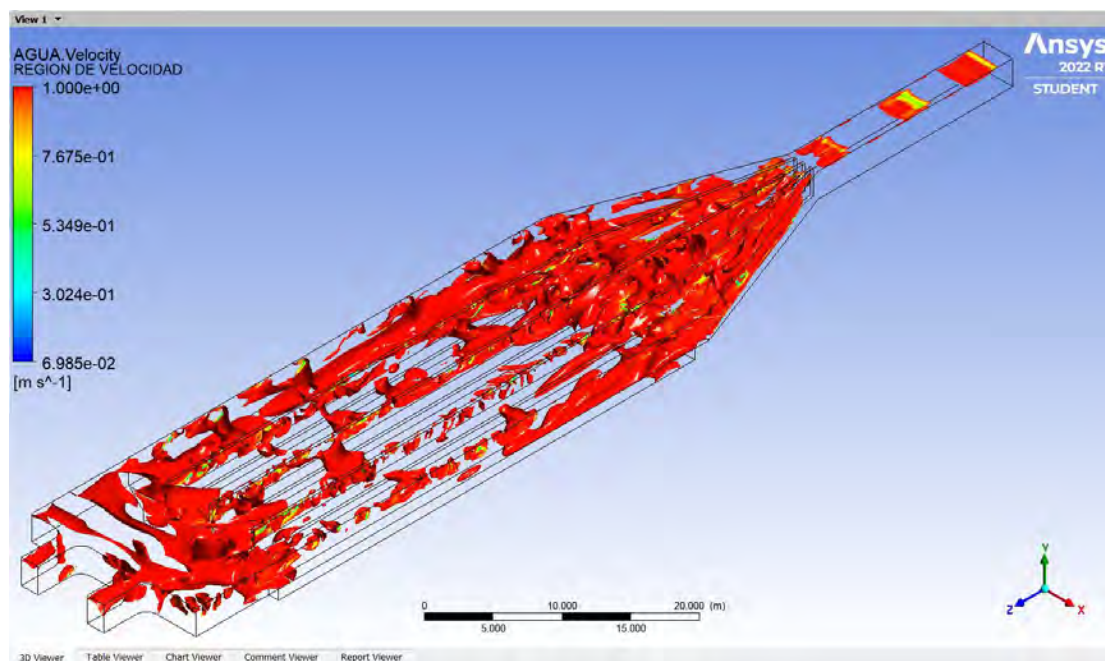
*Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes para una velocidad de 6 m/s.*



- Variable: AGUA. Velocity

**Figura 260**

*Región de velocidad del modelo físico final a escala del desarenador de Majes.*

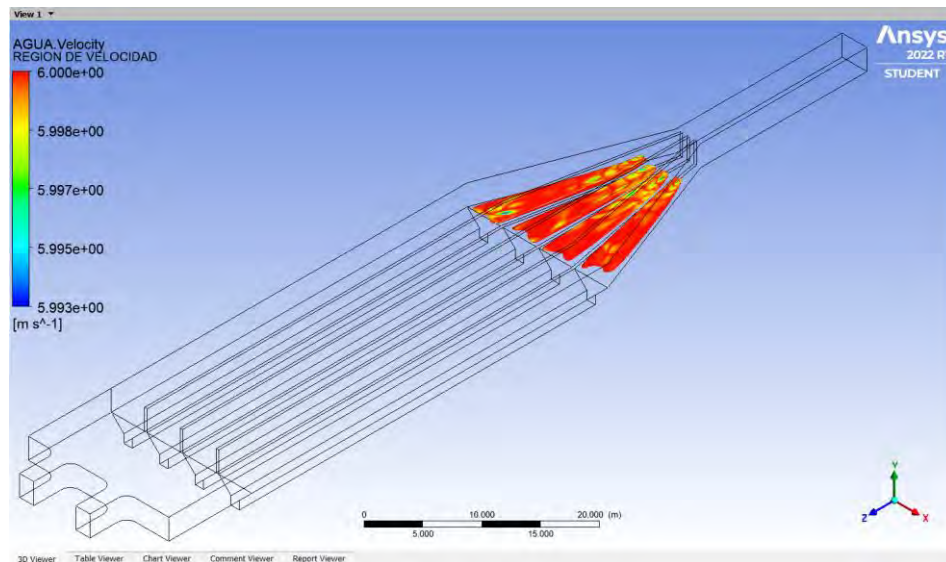


Se observa una velocidad máxima de 1 m/s en la transición de entrada y el desarenador, en el ingreso de las naves y en la salida; y una velocidad mínima de 0.06985 m/s.

Se observa máximas velocidades en la transición de entrada del desarenador (ver figura 261):

**Figura 261**

*Región de velocidad del modelo físico original a escala del desarenador de Majes para una velocidad de 6 m/s.*



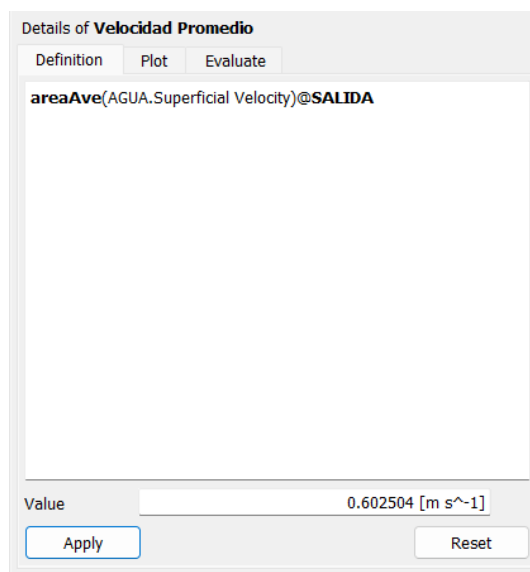
### 5.3.9 Cálculo de velocidad promedio en la salida del desarenador

Los pasos para el cálculo de la velocidad promedio se describen en el Capítulo 04.

Se observa que la velocidad promedio a la salida del desarenador es de 0.6025 m/s (ver figura 262):

**Figura 262**

*Cálculo de la velocidad promedio en la salida del desarenador.*



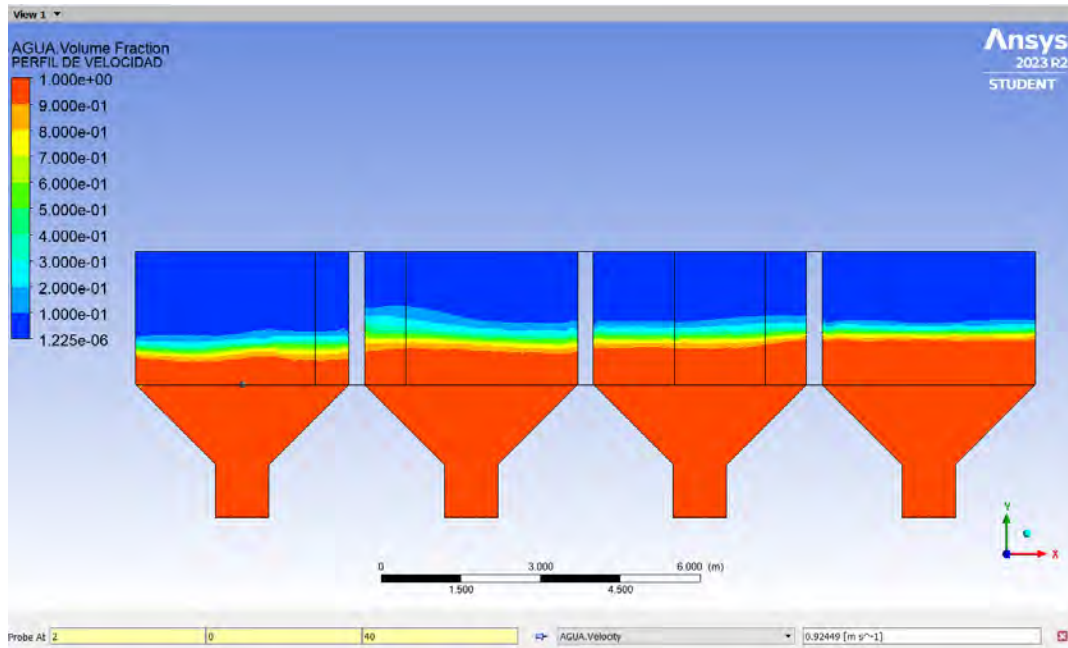
### 5.3.10 Cálculo de velocidad en las naves del desarenador

Los pasos para el cálculo de la velocidad promedio se describen en el Capítulo 04.

#### 5.3.10.1 Velocidad en la nave 1:

**Figura 263**

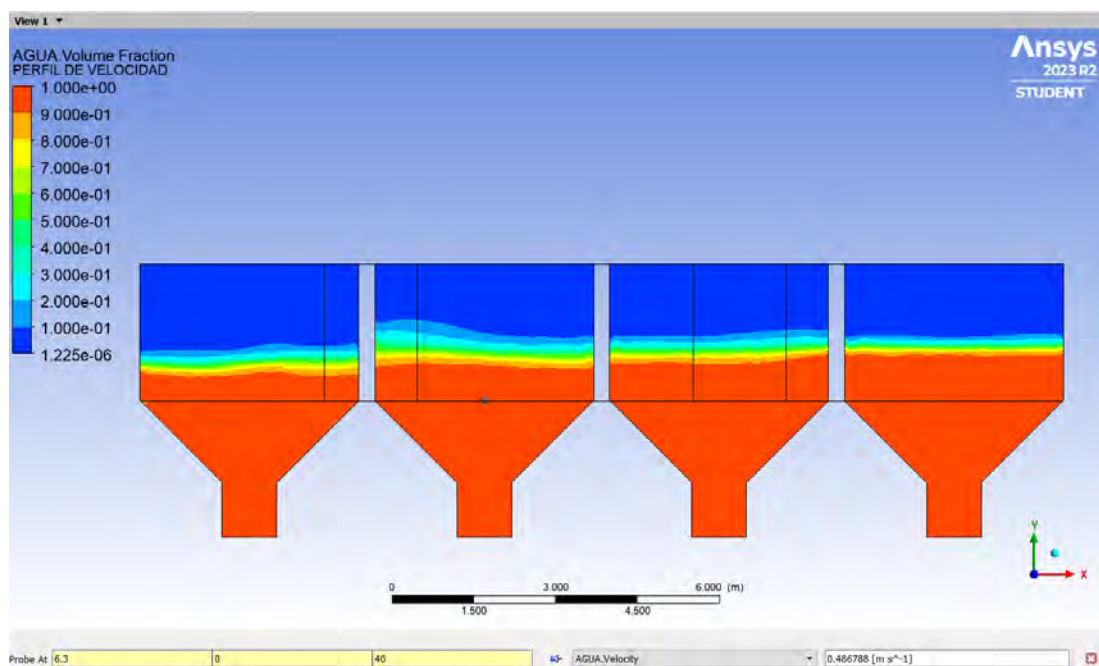
*Cálculo de la velocidad en la nave 1.*



#### 5.3.10.2 Velocidad en la nave 2:

**Figura 264**

*Cálculo de la velocidad en la nave 2.*

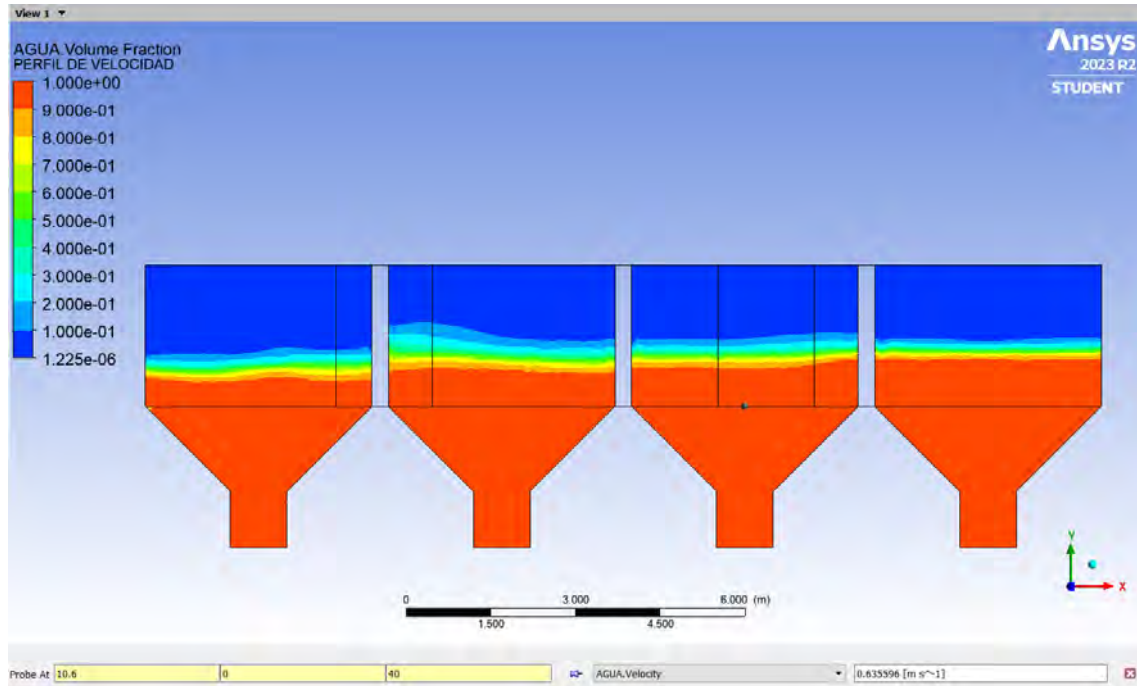




### 5.3.10.3 Velocidad promedio en la nave 3:

**Figura 265**

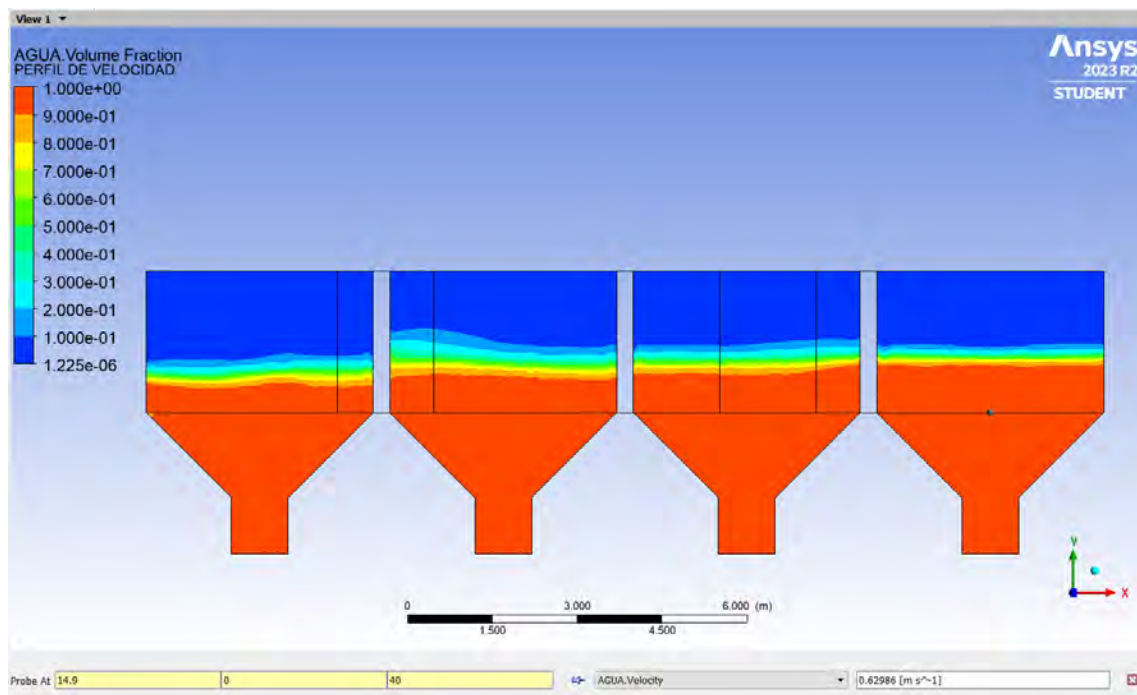
*Cálculo de la velocidad en la nave 3.*



### 5.3.10.4 Velocidad promedio en la nave 4:

**Figura 266**

*Cálculo de la velocidad en la nave 4.*





## 5.4 Análisis de resultados

### a) Vectores de velocidad:

- Se observa relativamente bajas velocidades en el canal aguas arriba.
- Se observa que la velocidad disminuye al ingreso de las naves, se estabilizan a lo largo de estas y en la salida de las mismas: esto va a garantizar que las partículas sólidas se sedimenten en las naves del desarenador, y que a la salida de estas no se resuspendan.

### b) Líneas de corriente:

- Se observa líneas de corriente paralelas en el canal aguas arriba y en la transición de entrada del desarenador: esto va a garantizar que los sedimentos sean arrastrados hasta las naves.
- Se observa líneas de corriente paralelas a lo largo de las naves del desarenador: esto va a evitar que se produzca turbulencia, permitiendo que las partículas sólidas se decanten correctamente en las naves.
- Se observa líneas de corriente paralelas a la salida del desarenador: esto va a evitar que se produzca turbulencia a la salida y que los sedimentos decantados en las naves se resuspendan.
- No se produce el flujo de retorno, debido al alargamiento de las naves hasta el canal aguas arriba, que permite una mejor captación y distribución uniforme del recurso hídrico a través de las naves del desarenador.

## 5.5 Comparación de resultados con el modelo físico final

### a) Canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador:

**Tabla 20**

*Comparación 1: modelo físico final.*

Modelo físico final	Simulación numérica
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa que no se produce flujo turbulento en la transición de entrada del desarenador (ver figura 267).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa bajas velocidades en el canal aguas arriba. En la transición de entrada el flujo se distribuye uniformemente en cada nave, debido a que este es captado desde el final del canal.</li> <li>- Se observa líneas de corriente paralelas en la transición de entrada del desarenador, esto y las altas velocidades va a garantizar que los sedimentos sean arrastrados hasta las naves (ver figura 268).</li> </ul>

**Figura 267**

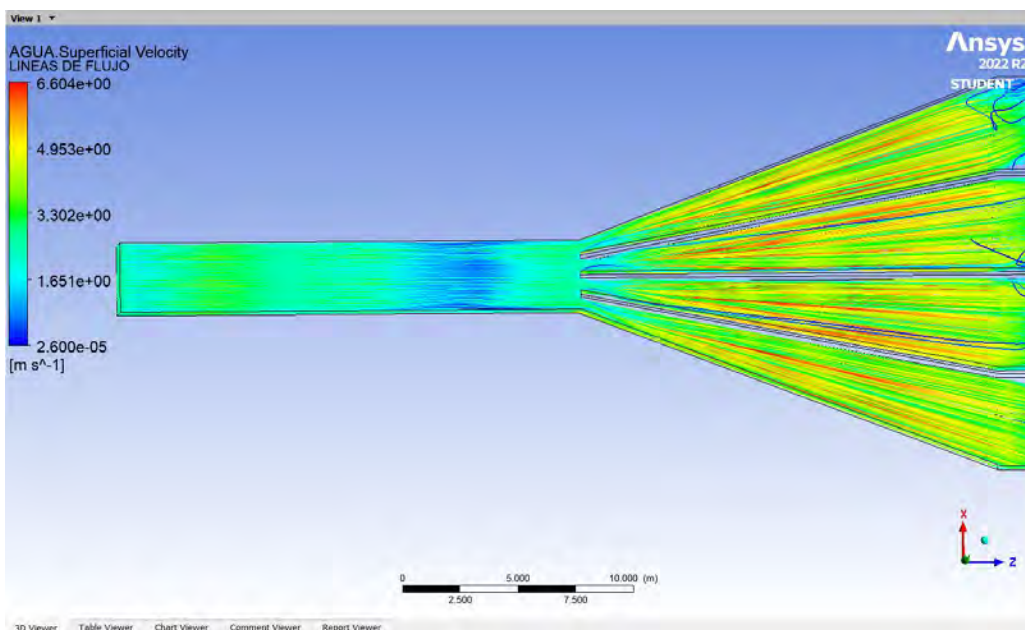
*Modelo físico final: canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 268**

*Simulación numérica del modelo físico final: canal aguas arriba y transición de entrada del desarenador.*



**b) Naves del desarenador:**

**Tabla 21**

*Comparación 2: modelo físico final.*

Modelo físico final	Simulación numérica
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa flujo uniforme y disminución de la velocidad en las naves del desarenador (ver figura 269).</li> <li>- Se observa que las partículas sólidas se han decantado en las naves del desarenador (ver figura 270).</li> <li>- Se observa que ya no hay caudal de retorno en una de las naves.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa que la velocidad disminuye al ingreso de las naves, se estabilizan a lo largo de estas y en la salida de las mismas: esto va a garantizar que las partículas sólidas se sedimenten en las naves del desarenador (ver figura 271).</li> <li>- Se observa líneas de corriente paralelas a lo largo de las naves del desarenador: esto va a evitar que se produzca turbulencia, permitiendo que las partículas sólidas se decanten correctamente en las naves (ver figura 271).</li> <li>- Se calculó la velocidad en las naves, los valores indican una distribución más o menos uniforme del caudal en cada una de ellas, ya que esta vez funcionan de manera óptimas las 4 naves (ver tabla 22).</li> <li>- Ya no se observa caudal de retorno en la nave 4.</li> </ul>

**Figura 269**

*Modelo físico final: naves del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 270**

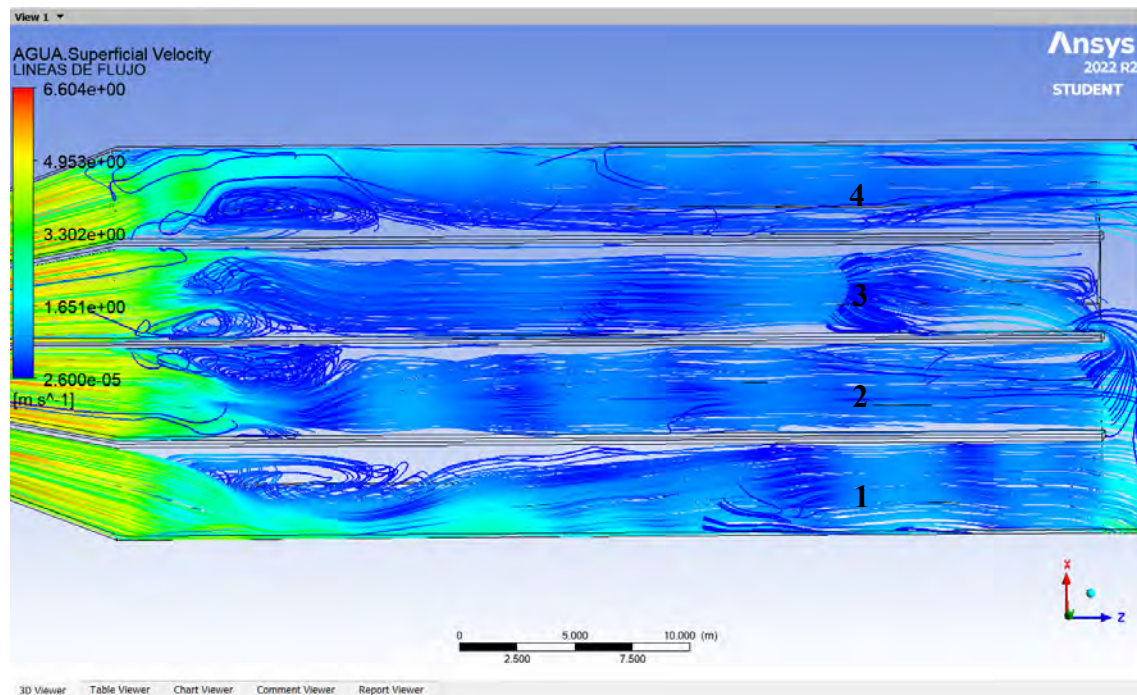
*Modelo físico final: naves del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 271**

*Simulación numérica del modelo físico final: naves del desarenador.*

**Tabla 22**

*Velocidad promedio en las naves del desarenador del modelo físico final.*

Velocidad en las naves	Nave 1	Nave 2	Nave 3	Nave 4
Velocidad (m/s)	0.92	0.49	0.64	0.63

Las velocidades y caudales en cada una de las naves del modelo final son menores al del modelo original, esto es por las modificaciones en la geometría del desarenador al alargar las naves, que permite una mejor captación del recurso hídrico desde el final del canal.



**c) Salida del desarenador:**

**Tabla 23**

*Comparación 3: modelo físico final.*

Modelo físico final	Simulación numérica
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa disminución de partículas sólidas sedimentadas en la salida del desarenador (ver figura 272).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se observa la disminución de la velocidad del flujo en la salida del desarenador: esto va a garantizar que las partículas sólidas sedimentadas en las naves no se resuspendan en la salida de las mismas (ver figura 273).</li> <li>- Se observa líneas de corriente paralelas a la salida del desarenador: esto va a evitar que se produzca turbulencia a la salida y que los sedimentos decantados en las naves se resuspendan (ver figura 273).</li> </ul>

**Figura 272**

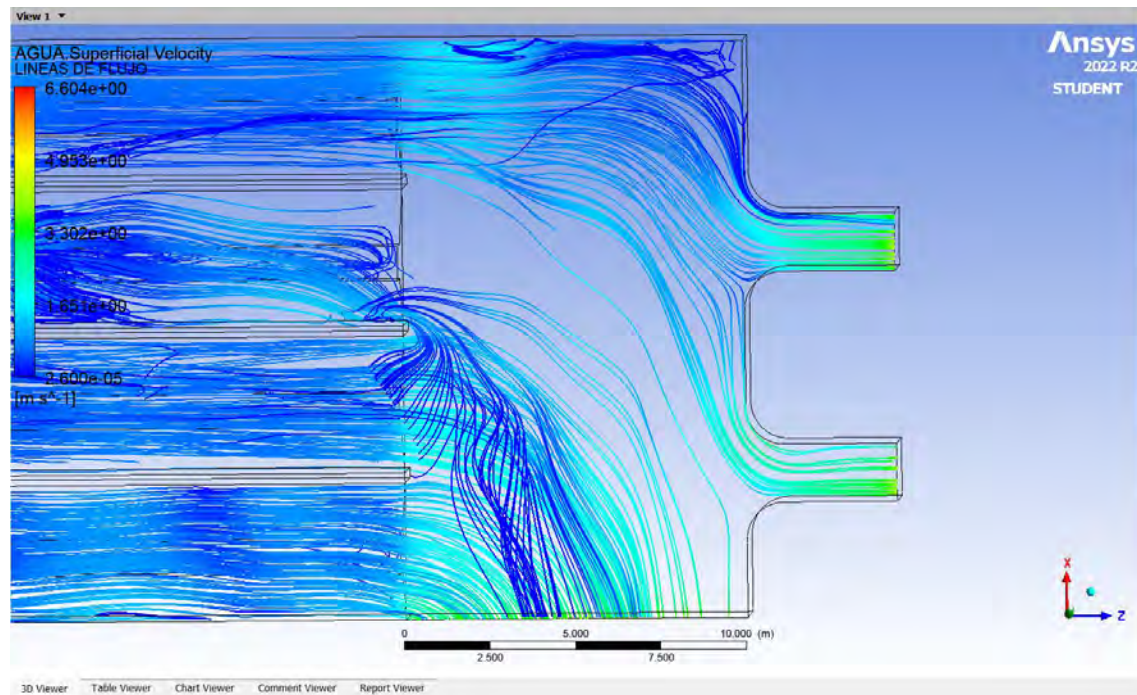
*Modelo físico final: salida del desarenador.*



*Nota.* Adaptado de (Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura, 2020)

**Figura 273**

*Simulación numérica del modelo físico final: salida del desarenador.*



## Conclusiones

Se observa que ANSYS CFX modeló correctamente el comportamiento hidráulico del desarenador de Majes, ya que los resultados obtenidos son similares al modelo físico.

En la simulación numérica del modelo físico original se observó líneas de corriente paralelas en la transición de entrada del desarenador, por lo que se concluye que este comportamiento hará que cierta cantidad de partículas sólidas se decanten en esta zona.

De las altas velocidades y líneas de corriente no uniformes en el ingreso de las naves del desarenador se concluye que producirán resalto hidráulico, formación de vórtices y flujo turbulento a lo largo de las naves, como consecuencia los sedimentos no se decantarán en su totalidad en esta zona, sino que serán arrastrados hasta la salida del desarenador.

De las altas velocidades y líneas de corriente paralelas en la salida del desarenador, se concluye que este comportamiento hará que los sedimentos arrastrados por la mala sedimentación debido al flujo no uniforme en las naves, se sedimenten aquí.

De las líneas de flujo, se concluye que indican caudal de retorno en la nave 4, el cálculo de las velocidades en las naves muestra que la nave 4 presenta la velocidad más baja y por lo tanto menor caudal fluyendo a través de ella, tal como ocurre con el modelo físico original y una de las naves, la 4 que presenta flujo de retorno debido al impacto frontal en la salida con un muro.

De las condiciones de velocidad y líneas de corriente observadas en la simulación numérica del modelo físico original a escala del desarenador de Majes se concluye que es el mismo comportamiento hidráulico observado durante la modelación física.

En la modelación física el diseño original del desarenador de Majes presenta problemas de sedimentación al ingreso de las naves y en la salida, además de que las condiciones del flujo no son uniformes, presenta turbulencia y la formación de vórtices al ingreso de las naves, razón por la cual los sedimentos no se decantan correctamente en las cámaras de sedimentación, debido a estos problemas identificados durante la modelación física se optó por modificar el diseño. Estas condiciones fueron también observadas en la simulación numérica.

En la simulación numérica del modelo físico final se observó velocidades y líneas de corriente paralelas en la transición de entrada del desarenador, por lo que se concluye que este comportamiento garantizará que no se produzca turbulencia y que los sedimentos no se decanten en esta zona, sino que serán arrastrados hasta las naves.

De la disminución de la velocidad en el ingreso de las naves del desarenador, y que estas se estabilicen a lo largo de las mismas, se concluye que este comportamiento garantizará que los sedimentos arrastrados se decanten en las naves.

De las bajas velocidades y las líneas de corriente paralelas en la salida del desarenador, se concluye que este comportamiento garantizará que las partículas sólidas decantadas en las naves no se resuspendan y no sean arrastradas hasta la salida de las mismas.

De las condiciones de velocidad y líneas corriente observadas en la simulación numérica del modelo físico final a escala del desarenador de Majes se concluye que es el mismo comportamiento hidráulico observado durante la modelación física.

La modelación física del diseño final del desarenador de Majes mostró que se solucionaron los problemas identificados en el diseño original, por lo que se observa que el flujo es uniforme en el ingreso del desarenador, en las naves y en la salida de este, como resultado se produce la correcta sedimentación de las partículas sólidas en las cámaras del desarenador, lo que permite realizar un adecuado sistema de purga de los sedimentos.

En el modelo original se tenía una nave con flujo de retorno, por lo tanto, solamente trabajaban 3 de las 4 naves y se obtenía valores de velocidades mayores que en la situación de funcionamiento de las 4 naves, donde el caudal se distribuye en mayor área.

El alargamiento de las naves desde el canal de ingreso, permite una mejor captación del flujo, y su distribución uniforme a través de las naves, solucionando el problema del flujo de retorno, y teniendo así un funcionamiento óptimo del desarenador.



### Recomendaciones

En esta investigación se realizó la modelación numérica del desarenador de Majes eligiendo como modelo de turbulencia *k-epsilon*, por lo que se recomienda realizar una nueva simulación eligiendo los otros modelos de turbulencia que presenta ANSYS CFX (*Shear Stress Transport*, *BSL Reynold Stress* y *SSG Reynolds Stress*) de tal manera que se pueda analizar, verificar y comparar el comportamiento del flujo del modelo numérico con el modelo físico en base a los resultados que se obtengan (ver figura 70).

Se recomienda también realizar la simulación numérica teniendo en cuenta la condición sedimentológica del desarenador de Majes, tanto del modelo físico original como final.





## Referencias

- Albuja, C., Pinos, C., & Samaniego, J. (2013). Uso de desarenadores en abastecimiento de agua potable. *Galileo*, 23, 122–127. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30010>
- ANSYS Inc. (2013). *Theory Guide*.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *MECÁNICA DE FLUIDOS FUNDAMENTOS Y APLICACIONES* (S. A. D. C. V. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, Ed.; 1ra Edición). 2006.
- Desarenador Vortex*. (2017, June 28). SPENA GROUP. <https://spenagroup.com/dsarenador-vortex/>
- ESSS. (2016, June 24). *DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL: ¿QUÉ ES?* <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>.
- Froelich, D. (1998). *FESWMS-2DH Finite Element Surface-Water Modeling System: Two-Dimensional Flow in a Horizontal Plane*.
- García Mendivelso, D. A. (2017). *Comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D*.
- Gonzales Naquiche, S. S. (2020). *Verificación del comportamiento hidráulico del Desarenador de la Central Hidroeléctrica Quiroz mediante Ansys CFX* [Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil]. UNIVERSIDAD DE PIURA.
- Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura. (1990). *INVESTIGACION SOBRE EL MODELO HIDRAULICO DEL DESARENADOR TERMINAL DE MAJES. INFORME FINAL: MODIFICACIONES MINIMAS NECESARIAS*.
- Instituto de Hidráulica - Universidad de Piura. (2020). *Fotografías y Planos del Modelo Físico del Desarenador de Majes*.
- Lumley, J. L. (1978). *Computational Modelling of Turbulent Flows*, *Adv. Appl. Mech.* (Vol. 18).
- Mendoza, B. (2022). *Simulación del flujo del salto de esquí y de la poza de disipación debido a un mal funcionamiento en la disipación de energía ocasionado por un obstáculo frontal al Reservorio Poechos utilizando el programa Ansys CFX*. Universidad de Piura.
- Menter, F. (1994). *Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Model for Engineering Applications* (AIAA J, Ed.; Vol. 32). AIAA J.
- Menter, F. (1997). *Eddy-viscosity Transport Equations and their Relation to the  $k-\epsilon$  Model*, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.* (Vol. 119).
- Menter, F. R. (1992a). Improved Two-equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *NASA Technical Memorandum TM-103975*, NASA Ames, CA.
- Menter, F. R. (1992b). *Performance of Popular Turbulence Models for Attached and Separated Adverse Pressure Gradient Flow* (AIAA J., Ed.; Vol. 30). AIAA J.

- Mirlisenna, G. (2016, January 22). *Método de los elementos finitos: ¿Qué es?* Blog ESSS. <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- Montalvan Portero, X. F. (2021). *Modelación numérica del flujo y comportamiento del Sifón Piura utilizando Ansys* [Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil]. UNIVERSIDAD DE PIURA.
- Mora, J. (2017). *Modelación hidrodinámica Bi y Tridimensional de dos canales con dissipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería utilizando ANSYS FLUENT* [Tesis de Maestría]. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Noblecilla Palomino, A. L. (2019). *Modelación numérica para determinar la orientación de una bifurcación en el Tramo B del Río Piura* [Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil]. UNIVERSIDAD DE PIURA.
- NTP OS.090, Plantas de tratamiento de aguas residuales (2009).
- Núñez, U. (n.d.). *Desarenador en Tratamiento de Aguas Residuales*. Retrieved August 29, 2022, from <https://metodosdeseparaciondemezclas.com/desarenador-en-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). GUÍA PARA EL DISEÑO DE DESARENADORES Y SEDIMENTADORES. *Organización Panamericana de La Salud*, 1–34.
- Osses, J. (2016, December 12). *El método de volúmenes finitos*. <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
- PERÚ21. (2014). Perú es el segundo país de la región con más centrales hidroeléctricas. *PERÚ21*. <https://peru21.pe/economia/peru-segundo-pais-region-centrales-hidroelectricas-156044-noticia/>
- Reyes Salazar, J. (2019a). *Apuntes de la Maestría de Recursos Hídricos: Ansys-CFX Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)*.
- Reyes Salazar, J. (2019b). *Apuntes de la Maestría de Recursos Hídricos: Ansys-CFX Geometría, Malla*.
- Speziale, C. G. (1987). *On Non-linear  $k-l$  and  $k-\epsilon$  Models of Turbulence*, *J. Fluid Mech.* (Vol. 178).
- Vásquez Ojeda, J. A. (2003). *Modelación Numérica en Hidráulica*. [www.geocities.com/PepeVasquez2003](http://www.geocities.com/PepeVasquez2003)
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics THE FINITE VOLUMEN METHOD* (PEARSON EDUCATION LIMITED, Ed.; SECOND EDITION). 2007. [www.pearsoned.co.uk/versteeg](http://www.pearsoned.co.uk/versteeg)
- Villón Béjar, M. (2005). *Diseño de Estructuras Hidráulicas* (Editorial Villón, Ed.; Segunda Edición). MaxSoft.

- Wilcox, D. C. (1988). *Reassessment of the Scale-determining Equation for Advanced Turbulence Models* (11th ed., Vol. 26). AIAA J.
- Wilcox, D. C. (1993). *Comparison of Two-equation Turbulence Models for Boundary Layers with Pressure Gradients* (AIAA J., Ed.; 8th ed., Vol. 31). AIAA J.
- Wilcox, D. C. (1994). *Simulating Transition with a Two-equation Turbulence Model* (AIAA, Ed.; Vol. 32). AIAA J.
- Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence Modelling for CFD* (DCW Industries, Ed.; Tercera).

