



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Verificación del comportamiento hidráulico del
Desarenador de la Central Hidroeléctrica Quiroz mediante
Ansys CFX**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Shirley Sthefani Gonzales Naquiche

**Asesor:
Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar**

Piura, noviembre de 2020

A Dios por colmarme todos los días de dicha.

A mis padres, Vilma y Manuel por su cariño,
comprensión y apoyo incondicional.



Resumen Analítico-Informativo

Verificación del comportamiento hidráulico del Desarenador de la Central Hidroeléctrica Quiroz mediante Ansys CFX

Shirley Sthefani Gonzales Naquiche

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

Tesis.

Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, noviembre 2020

Palabras claves: desarenador /modelación numérica /prototipo /Ansys CFD /patrón de flujo /caudal /tirantes /velocidades.

Introducción: Inicialmente la modelación física a escala reducida era la única herramienta para el estudio y diseño adecuado en estructuras hidráulicas. Sin embargo, ahora dicha modelación física se complementa con la modelación numérica debido a la capacidad, velocidad de las computadoras y mejoras en los algoritmos computacionales. En la presente tesis se ha analizado y comparado, los valores de velocidades de flujo y patrón de flujo conseguidos de la simulación numérica con los resultados obtenidos en el prototipo. En la simulación se utilizó el caudal de diseño del desarenador de la Central Hidroeléctrica del Quiroz ($2.8\text{m}^3/\text{s}$) para la condición de nave operando con el conducto de by pass cerrado y compuerta de purga cerrada.

Metodología: Se llevó a cabo una visita de campo al prototipo del desarenador de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz con la finalidad de verificar las dimensiones de la estructura hidráulica y tomar velocidades, tirantes, cuadro de flujo y caudal. Posteriormente se realizó el modelo numérico usando el programa Ansys para simular el comportamiento de la estructura hidráulica. Finalmente se comparó y analizó el comportamiento hidráulico de la modelación numérica y el prototipo del desarenador.

Resultados: Se comparó y analizó el comportamiento hidráulico en seis secciones transversales del desarenador. Se verificó que el caudal de ingreso y salida de la nave son muy similares. Se comprobó que la presencia de rejillas tranquilizadoras produce un flujo ordenado en toda la zona longitudinal de la nave.

Conclusiones: La presencia de rejillas tranquilizadoras en la entrada de la nave del desarenador funcionó como se esperaba, reflejó una distribución uniforme del flujo, tanto en la modelación numérica como en el prototipo. En la zona de transición de salida de la nave del desarenador se observaron velocidades similares, por lo tanto, se puede afirmar que el patrón del flujo es simétrico. Se comprobó que ANSYS CFX simuló correctamente las velocidades y el patrón de flujo en el desarenador, considerando los resultados aceptables y de gran utilidad durante un estudio real.

Fecha de elaboración del resumen: 13 de octubre de 2020

Analytical-Informative Summary

Verificación del comportamiento hidráulico del Desarenador de la Central Hidroeléctrica Quiroz mediante Ansys CFX

Shirley Sthefani Gonzales Naquiche

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

Tesis.

Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, noviembre 2020

Keywords: desilter /numerical modeling /prototype /Ansys CFD /flow pattern /flow /water depth /velocities.

Introduction: Initially the physical modeling on a reduced scale was the only tool for the study and adequate design of hydraulic structures. However, now such physical modeling is complemented by numerical modeling due to the capacity, speed of computers and improvements in computational algorithms. In the thesis, the flow velocity and flow pattern values obtained from the numerical simulation have been analyzed and compared with the results obtained in the prototype. In the simulation carried out, the design flow of the desilter at the Quiroz Hydroelectric Power Plant ($2.8\text{m}^3/\text{s}$) was used for the condition of the unit operating closed bypass duct and closed purge gate.

Methodology: A field visit was carried out to the prototype of the desilter at the Maria Auxiliadora Hydroelectric Power Plant of the Quiroz in order to verify the dimensions of the hydraulic structure and take velocities, water depth, flow chart and flow. Subsequently, the numerical model was carried out using the Ansys program to simulate the behavior of the hydraulic structure. Finally, the hydraulic behavior of the numerical modeling and the prototype of the desilter was compared and analyzed.

Results: The hydraulic behavior in six cross sections of the desilter was compared and analyzed. It was verified that the inlet and outlet flow of the shed are very similar. The presence of reassuring gratings was proved to produce an orderly flow the longitudinal area of the shed.

Conclusions: The presence of reassuring grating at the inlet of the desilter shed worked as expected, it reflecting a uniform flow distribution, both in the numerical modeling and in the prototype. Similar velocities were observed in the outlet transition zone of the desilter shed, therefore, it can affirm that the flow pattern is symmetrical. It was proven that Ansys CFX correctly simulated the velocities and flow pattern of the desilter, considering to be acceptable and very useful results during a real study.

Summary date: October 13th, 2020

Prólogo

Inicialmente la modelación física a escala reducida era la única herramienta para el estudio y diseño adecuado en estructuras hidráulicas. Sin embargo, ahora dicha modelación física se complementa con la modelación numérica debido a la capacidad, velocidad de las computadoras y mejoras en los algoritmos computacionales.

De manera particular, en proyectos de aprovechamientos hidroeléctricos, la función del desarenador es de separar y eliminar las partículas sólidas que son transportadas en el escurrimiento del agua e impedir que se transporten sedimentos hacia la conducción, porque causaría abrasión y desgaste prematuro de las turbinas, ocasionando, la reducción de su vida útil. Por este motivo, se considera necesario el desarrollo de la modelación numérica para representar la hidrodinámica y predecir el comportamiento bajo un entorno real y tomar decisiones en procedimientos de operación.

El desarenador de la central hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz, es una estructura hidráulica de tipo Dufour de una nave y en la mayor parte del año funciona con purga intermitente. Se ha observado una enorme cantidad de sólidos que ingresan al Canal de Derivación desde el río Quiroz.

En base a lo mencionado, la presente tesis, se enfocará en medir velocidades, tirantes, cuadro de flujo y caudal para realizar el diagnóstico de la estructura hidráulica.

El desarrollo de la tesis implica hacer uso del programa ANSYS CFD (Computational Fluids Dynamics) para realizar por medio del método de volúmenes finitos (método numérico) la simulación del comportamiento de la estructura hidráulica, funcionando una nave y teniendo la compuerta de purga cerrada; con dicha información se realizará un análisis hidráulico del desarenador para el mejoramiento de ésta.

Se agradece al Dr. Jorge Demetrio Reyes Salazar, por la dirección de este trabajo, por el interés y por todo el tiempo brindado para aumentar la calidad en la investigación. Al ingeniero Paul Jaramillo Mejía, investigador del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria, por su apoyo en la modelación numérica.



Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1 Desarenadores.....	3
1.1. Definición	3
1.2. Importancia del funcionamiento	3
1.3. Clasificación de desarenadores.....	4
1.3.1. En función de su operación de limpieza	4
1.3.1.1. Desarenador de lavado continuo	4
1.3.1.2. Desarenador de lavado discontinuo (intermitente).....	4
1.3.1.3. Desarenador mixto, continuo-discontinuo.....	5
1.3.2. En función de la velocidad de escurrimiento	5
1.3.2.1. De baja velocidad $v < 0.6$ m/s	5
1.3.2.2. De alta velocidad $v > 1.0$ m/s	6
1.3.3. Por la disposición de los desarenadores.....	6
1.3.3.1. En serie	6
1.3.3.2. En paralelo.....	6
1.3.3.3. Disposición mixta.....	6
1.4. Elementos del desarenador	7
1.4.1. Transición de entrada.....	7
1.4.2. Cámara de sedimentación	8
1.4.3. Vertedero	8
1.4.4. Compuerta de lavado	9
1.4.5. Canal directo	9
1.4.6. Transición de salida	9

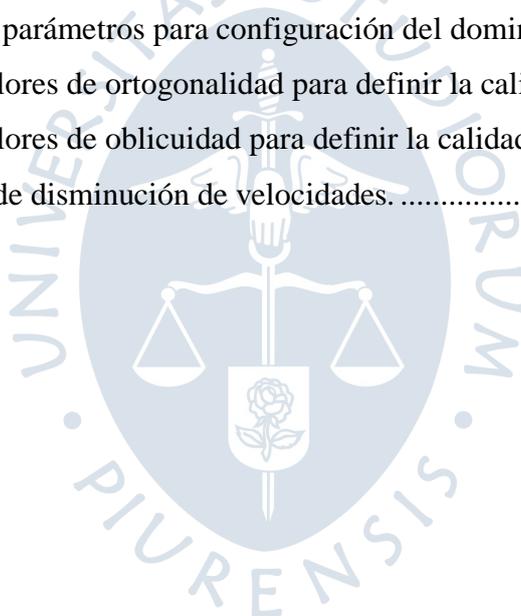
1.5. Principios de diseño	9
1.5.1. Hidráulico.....	9
1.5.2. Sedimentológico.....	10
Capítulo 2 Modelos numéricos	11
2.1. Forma integral de las ecuaciones de Navier Stokes	11
2.1.1. Ecuación de continuidad. Ecuación de conservación de la masa	11
2.1.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.....	12
2.1.3. Ecuación de conservación de la energía	19
2.2. Aproximaciones y simplificaciones de las ecuaciones de Navier Stokes.....	21
2.2.1. Fenómenos estacionarios	22
2.2.2. Flujos incompresibles	22
2.3. Modelos de turbulencia.....	23
2.3.1. Simulación numérica Directa (DNS)	24
2.3.2. Simulación de vórtices grandes (LES).....	24
2.3.3. Modelo de Reynolds- Promediado Navier- Stokes (RANS)	25
2.3.3.1. Ecuaciones de RANS	26
2.3.3.2. Ecuaciones RANS en flujos incompresibles	30
2.3.3.3. Modelos de viscosidad artificial (EVM)	32
Capítulo 3 Características generales del proyecto	39
3.1. Funcionamiento del desarenador de la Central Hidroeléctrica del Quiroz	39
3.2. Ubicación.....	40
3.3. Accesibilidad	41
3.4. Clima.....	42
3.5. Sismicidad.....	43
3.6. Diagnóstico de obras civiles	44
3.6.1. Bocatoma44	
3.6.1.1. Aliviadero fijo de mampostería	45
3.6.1.2. Bocal.....	45
3.6.1.3. Compuertas de regulación	45
3.6.1.4. Compuerta de limpia o purga	45
3.6.1.5. Compuerta inflable tipo Obermeyer	45
3.6.2. Desarenador	46

3.6.3. Canal de conducción a la cámara de carga	48
3.6.4. Cámara de carga y aliviadero de excedencias.....	48
3.6.5. Casa de máquinas.....	49
3.6.6. Canal de descarga.....	50
Capítulo 4 Modelación numérica.....	51
4.1. Sistemas continuos y discretos	51
4.2. Métodos numéricos de discretización.....	52
4.2.1. Modelación numérica de diferencias finitas	53
4.2.2. Modelación numérica de elementos finitos	53
4.2.3. Modelación numérica de volúmenes finitos	53
4.3. Malla de cómputo	54
4.3.1. Malla no estructurada.....	54
4.3.2. Malla estructurada.....	55
4.4. Clasificación de la modelación numérica.....	55
4.4.1. Hidrodinámica tridimensional- 3D	55
4.4.1.1. <i>Ansys CFX</i>	56
4.4.1.2. FIDAP.....	56
4.4.1.3. Telemac 3D	56
4.4.1.4. SSIIM	58
4.4.1.5. STAR- CD.....	58
4.4.1.6. FLOW 3D.....	59
4.5. Elección de programa a utilizar – ANSYS CFX	59
4.5.1. Etapas de procesamiento.....	59
4.5.1.1. Pre- procesamiento	59
4.5.1.2. Procesamiento.....	60
4.5.1.3. Post – procesamiento.....	60
4.6. Ventajas de CFD.....	60
4.7. Limitaciones de CFD	61
4.8. Aplicaciones de CFD	61
Capítulo 5 Simulación numérica del desarenador con presencia de rejillas	63
5.1. Creación de la geometría	63
5.1.1. Generación de la geometría en <i>DesignModeler</i>	65

5.2. Mallado del dominio de estudio.....	69
5.2.1. Creación del dominio	70
5.2.2. Parámetros iniciales, físicos y numéricos de la modelación en Ansys CFX	71
5.2.3. Parámetros de calidad	75
5.2.3.1. Calidad del elemento	75
5.2.3.2. Aspecto del elemento	76
5.2.3.3. Ortogonalidad	77
5.2.3.4. Oblicuidad	79
5.3. Calibración del desarenador en el modelo numérico.....	80
5.3.1. Condiciones de borde.....	84
5.3.2. Configuración del control del solucionador.....	86
5.4. Parámetros hidráulicos.....	88
5.4.1. Resolución numérica.....	89
5.5. Visualización de los resultados CFD- Post procesamiento	99
5.6. Análisis y comparación de resultados del prototipo y el modelo numérico	100
5.6.1. Puntos de comparación entre velocidades medidas y simuladas	101
5.6.2. Discusión de resultados.....	103
Conclusiones	113
Recomendaciones	115
Referencias bibliográficas.....	117
Anexos	121
Anexo A. Creación de la geometría Ansys.....	123

Lista de tablas

Tabla 1.	Valores de los coeficientes.....	37
Tabla 2.	Vías de acceso vía terrestre	41
Tabla 3.	Características de clima	42
Tabla 4.	Número de nodos y elementos del mallado realizado.....	74
Tabla 5.	Resumen de parámetros para configuración del dominio.	74
Tabla 6.	Rango de valores de ortogonalidad para definir la calidad del mallado.	78
Tabla 7.	Rango de valores de oblicuidad para definir la calidad del mallado.	79
Tabla 8.	Porcentajes de disminución de velocidades.	107



Lista de figuras

Figura 1.	Desarenador de lavado continuo	4
Figura 2.	Desarenador de lavado discontinuo o intermitente.	5
Figura 3.	Desarenador mixto.	5
Figura 4.	Desarenador con cámara en paralelo.	7
Figura 5.	Volumen de control.....	14
Figura 6.	Sistemas no estacionarios.....	22
Figura 7.	Descripción del proceso de la turbulencia	24
Figura 8.	Izquierda: representación esquemática del movimiento turbulento Derecha: dependencia temporal de un componente de velocidad en un punto.....	25
Figura 9.	Las variables del problema se descomponen en un valor medio y otro fluctuante debido a la turbulencia.	28
Figura 10.	Elemento de control en el que se representa la velocidad a través de una de sus caras.	31
Figura 11.	Ubicación de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.	41
Figura 12.	Plano georreferenciado de ubicación de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.....	42
Figura 13.	Zonificación Sísmica del Perú.	43
Figura 14.	Bocatoma de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.....	44
Figura 15.	Disposición de represamiento y captación.....	44
Figura 16.	Planta del desarenador	46
Figura 17.	Compuerta de nave del desarenador accionada manualmente.....	47
Figura 18.	Desarenador de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.....	47
Figura 19.	Fisuras y erosión en canal.	48
Figura 20.	Presencia de piedras y fisuras en el canal.	48
Figura 21.	Ubicación de cámara de carga.	49
Figura 22.	Casa de máquinas.....	50

Figura 23.	Canal de descarga.....	50
Figura 24.	Sistemas discretos.	51
Figura 25.	Representación esquemática de un domino global y su subdivisión en dominios locales a) Sistema continuo, b) modelo discreto, c) elemento finito.....	53
Figura 26.	Dominio con malla no estructurada.	54
Figura 27.	Dominio con malla estructurada.	55
Figura 28.	Resultados de un modelo numérico 3D de un desarenador usando SIIM.....	58
Figura 29.	Vista de planta del desarenador de la central hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz (Versión digital).....	64
Figura 30.	Plano de planta de transición de entrada del desarenador CHMA (Versión digital).....	64
Figura 31.	Plano de perfil de transición de entrada del desarenador CHMA (Versión digital).....	64
Figura 32.	Plano de planta de transición de entrada del desarenador CHMA (Versión digital).....	65
Figura 33.	Plano de planta de transición de salida del desarenador CHMA (Versión digital).....	65
Figura 34.	Distribución del espacio de trabajo del sketching.....	66
Figura 35.	Distribución del espacio de trabajo.....	67
Figura 36.	Distribución del espacio de trabajo del modeling.....	67
Figura 37.	Detalle de la creación de la geometría de la nave del desarenador.....	68
Figura 38.	Geometría de la entrada de transición y presencia de rejillas. Sin compuerta de entrada.	68
Figura 39.	Geometría de la nave del desarenador y vertedero. Sin compuerta de salida.	69
Figura 40.	Geometría de todo el desarenador. Sin compuertas.....	69
Figura 41.	Zona de interés: inlet o entrada de agua.....	70
Figura 42.	Superficie de frontera (top).....	71
Figura 43.	Superficie de frontera de salida (outlet).....	71
Figura 44.	Detalle de la malla en Ansys CFX.....	72
Figura 45.	Refinamiento de la malla computacional. a) Sin usar herramienta face meshing b) Usando herramienta face meshing.....	73
Figura 46.	Herramientas usadas para la creación de la malla mixta.	73

Figura 47.	Malla estructurada del desarenador.....	74
Figura 48.	Estadística de la calidad del elemento.....	75
Figura 49.	Gráfica de barras correspondiente a la calidad del elemento.....	76
Figura 50.	Relación de aspecto en triángulos y cuadriláteros.	76
Figura 51.	Estadísticas del aspecto del elemento-	77
Figura 52.	Gráfica de barras correspondiente al aspecto de radio del elemento.	77
Figura 53.	Estadística de la ortogonalidad del elemento.....	78
Figura 54.	Gráfica de barras correspondiente a la ortogonalidad del elemento.	78
Figura 55.	Estadística de oblicuidad del elemento	79
Figura 56.	Gráfica de barras correspondiente a la oblicuidad del elemento.	79
Figura 57.	Configuración básica de las propiedades del fluido de trabajo (agua).	80
Figura 58.	Configuración básica de las propiedades del fluido de trabajo (agua).	80
Figura 59.	Configuración básica de las propiedades del fluido de trabajo (aire).	81
Figura 60.	Configuración básica de las propiedades del fluido de trabajo (aire).	81
Figura 61.	Tipo de análisis del fluido de trabajo.....	82
Figura 62.	Configuración básica del dominio, característica de los fluidos, presión, flotabilidad y densidad de referencia.	82
Figura 63.	Configuración de modelo multifásico y modelo de turbulencia.	83
Figura 64.	Configuración de interacción entre fluidos.....	83
Figura 65.	Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera, caudal promedio y tirante de 0.96 m en la entrada del desarenador (Inlet).....	84
Figura 66.	Configuración de los valores de fluidos en la entrada del desarenador (Inlet).....	84
Figura 67.	Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y presión relativa en la salida del desarenador (Outlet).....	85
Figura 68.	Configuración de los valores de fluidos en la salida del desarenador (Outlet).....	85
Figura 69.	Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y presión relativa con la zona superior del desarenador. (Top).....	85
Figura 70.	Configuración de los valores de fluidos en la zona superior del desarenador (Top).....	86
Figura 71.	Representación gráfica de vectores normales resultado de los datos ingresados.....	86
Figura 72.	Configuración de Solver Control.	88

Figura 73.	Configuración de Solution para iniciar la simulación.....	89
Figura 74.	Configuración de Solution para una nueva simulación.	89
Figura 75.	Curva de convergencia del CFX- Solver Manager del desarenador.....	90
Figura 76.	Gráfica del imbalance del desarenador.	90
Figura 77.	Variaciones de una solución con diferentes iteraciones.....	91
Figura 78.	Nombres de gráficas para posteriores análisis en CFX -Solver Manager.....	91
Figura 79.	Job information at start of run.....	92
Figura 80.	Memory allocated for run.	92
Figura 81.	Initial average scales.	93
Figura 82.	Solved Equations.....	93
Figura 83.	Convergence history.	94
Figura 84.	Fuerza de arrastre sobre una pared.....	95
Figura 85.	Fuerzas y momentos calculados sobre las paredes del desarenador.	96
Figura 86.	Maximum residual statistics del desarenador.	97
Figura 87.	False transient information del desarenador.	97
Figura 88.	Average scale information.....	98
Figura 89.	Variable range information.	98
Figura 90.	Requerimiento del CPU.....	99
Figura 91.	Información final de la simulación.	99
Figura 92.	Interfaz del espacio de trabajo de CFD- Post.....	100
Figura 93.	Distribución del espacio de trabajo CFX- Pre.....	100
Figura 94.	Correntómetro N°108542 y hélice N°1-108882.	101
Figura 95.	Malla para medición de velocidades en el canal.....	102
Figura 96.	Distribución de distancias en las secciones del canal y la nave del desarenador.	102
Figura 97.	Vista de planta del modelo del desarenador CH. María Auxiliadora del Quiroz.....	103
Figura 98.	Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador (transición de entrada).....	104
Figura 99.	Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador (transición de entrada- antes de las rejillas tranquilizadoras).	105
Figura 100.	Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador (después de las rejillas tranquilizadoras).	106
Figura 101.	Vectores del flujo del agua en ANSYS CFX.....	107

Figura 102. Vectores del flujo del agua en la nave del desarenador usando ANSYS CFX.....	107
Figura 103. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador.	108
Figura 104. Flujo del agua a) En el prototipo b) En la simulación.	108
Figura 105. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador. (Sección 5-5).....	109
Figura 106. Flujo del agua a) En el prototipo b) En la simulación	110
Figura 107. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador. (Sección 6-6).....	110
Figura 108. Flujo del agua a) En el prototipo b) En la simulación	111



Introducción

La presente tesis analizará y comparará de manera cualitativa los resultados de velocidades del flujo y el patrón de flujo del desarenador de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del río Quiroz obtenidos de la simulación numérica y el prototipo. La simulación numérica de la estructura hidráulica se modeló en 3D utilizando el programa ANSYS CFX.

En el primer capítulo se referencia la importancia de esta obra hidráulica y se menciona la clasificación, elementos y sus principios de diseño tanto hidráulico y sedimentológico.

En el segundo capítulo se explican los criterios y la información característica de la modelación matemática, el desarrollo de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido y los modelos de turbulencia más importantes en la actualidad.

En el tercer capítulo se describen las características generales del proyecto indicando su ubicación, accesibilidad, clima y sismicidad. También se realiza un diagnóstico de las obras civiles involucradas detallando su situación actual.

En el cuarto capítulo se indica la elección del programa a utilizar, las ventajas, limitaciones y aplicaciones del software escogido. Además, se mencionan softwares de modelación numérica tridimensional.

En el quinto capítulo se describe la etapa del procesamiento como la geometría, superficie de frontera, mallado; además, se realiza la calibración del desarenador en el modelo numérico para posteriormente presentar y comparar los resultados de velocidades y patrón de flujo del prototipo y de la simulación en el modelo numérico.

Capítulo 1

Desarenadores

1.1. Definición

El desarenador se puede definir como un “componente destinado a la remoción de las arenas y sólidos que están en suspensión en el agua, mediante un proceso de sedimentación” (Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente, 2005).

La disgregación de las partículas sólidas retenidas se lleva a cabo antes de que el agua ingrese a la línea principal, para evitar que los sedimentos ingresen a la línea principal y cause un desgaste excesivo del equipo electromecánico. (Coronado, El Desarenador, 1998)

El desarenador es una obra hidráulica útil para separar (decantar) y transportar (evacuar) las partículas sólidas suspendidas en el agua. Las partículas están en suspensión debido a que tienen una alta velocidad cuando entran por la bocatoma, lo cual es suficiente para impulsar las partículas sólidas. Esto ocurre particularmente cuando se producen inundaciones en los ríos y una gran cantidad de sedimento ingresa a la central hidroeléctrica.

1.2. Importancia del funcionamiento

Un desarenador es una estructura hidráulica, cuya función principal es separar y eliminar partículas sólidas antes de que el agua ingrese a la línea principal y evitar que los sedimentos ingresen a la línea principal. Sin embargo, el daño que producen es el desgaste prematuro y acelerado de las turbinas de las centrales hidroeléctricas, cuanto mayor es el daño por desgaste, mayor es la degradación del rendimiento y requerirá un reemplazo costoso para el proyecto.

Un correcto diseño de un desarenador evita el ingreso de arenas en tuberías de presión, canales y estructuras situadas aguas abajo del desarenador, asimismo, evita la obstrucción de sistemas de riego tecnificado y disminuye los costos de tratamiento del agua.

Un desarenador con un mal funcionamiento cambiará la sección transversal de la nave, reduciendo su capacidad debido a la presencia de sedimentos en el agua. Trae consigo consecuencias como reposiciones frecuentes, mayores costos de mantenimiento anual y servicios de canales con inconvenientes interrupciones.

1.3. Clasificación de desarenadores

1.3.1. En función de su operación de limpieza

Hay desarenadores de lavado continuo, discontinuo (intermitente) y mixto. Estos desarenadores se clasifican según su limpieza en la eliminación de sedimentos.

1.3.1.1. Desarenador de lavado continuo

En este tipo de desarenadores las partículas sólidas se eliminan continuamente, es por eso que la sedimentación y descarga de sedimentos son dos procesos simultáneos. Esto requiere que el caudal de diseño sea menor al disponible.

La operación del lavado continuo implica dividir el agua que ingresa al desarenador en dos capas, la primera capa se encuentra ubicada en la parte inferior, la cual contiene sedimentos más pesados y que forma una galería longitudinal de reducida sección, y la segunda capa se encuentra sobre la capa inferior. Ver Figura 1.

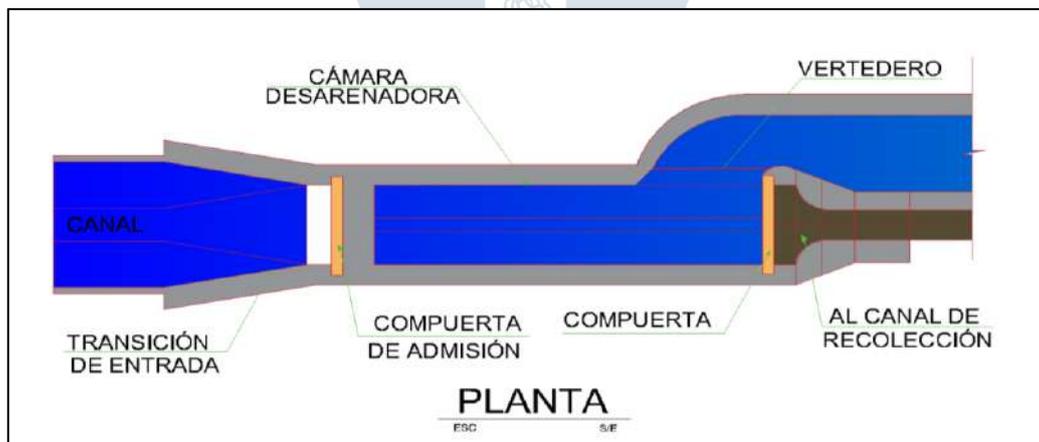


Figura 1. Desarenador de lavado continuo
Fuente: (Coronado, El Desarenador, 1998)

1.3.1.2. Desarenador de lavado discontinuo (intermitente)

El desarenador acumulará los sedimentos en suspensión y estos se depositarán en el fondo del canal. Los sedimentos se evacuarán a través del canal para completar la limpieza en el menor tiempo posible, o en todo caso se construirá 2 o más cámaras desarenadoras, o un

canal by pass. Se recomienda colocar esta estructura inmediatamente después de la captación, detrás de un canal para conseguir una velocidad de conducción uniforme. (Coronado, El Desarenador, 1998)

Son el tipo más común y tratan de realizar operaciones de lavado en el menor tiempo posible para minimizar la pérdida de agua. Ver Figura 2

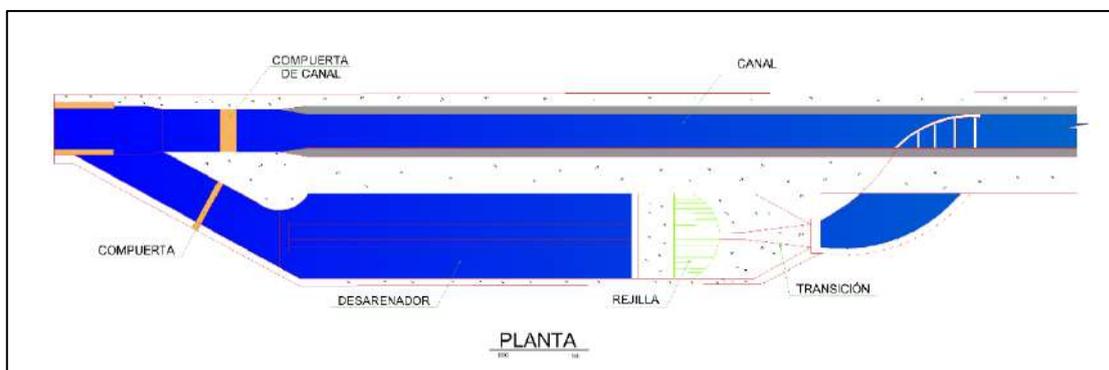


Figura 2. Desarenador de lavado discontinuo o intermitente.
Fuente: (Coronado, El Desarenador, 1998)

1.3.1.3. Desarenador mixto, continuo-discontinuo

Son aquellos en donde el ingreso de materiales sólidos es muy variable. Son desarenadores continuos con visibles cambios, en determinados casos pueden acumular y descargar los sedimentos a través de dos operaciones paralelas o no paralelas. Ver Figura 3

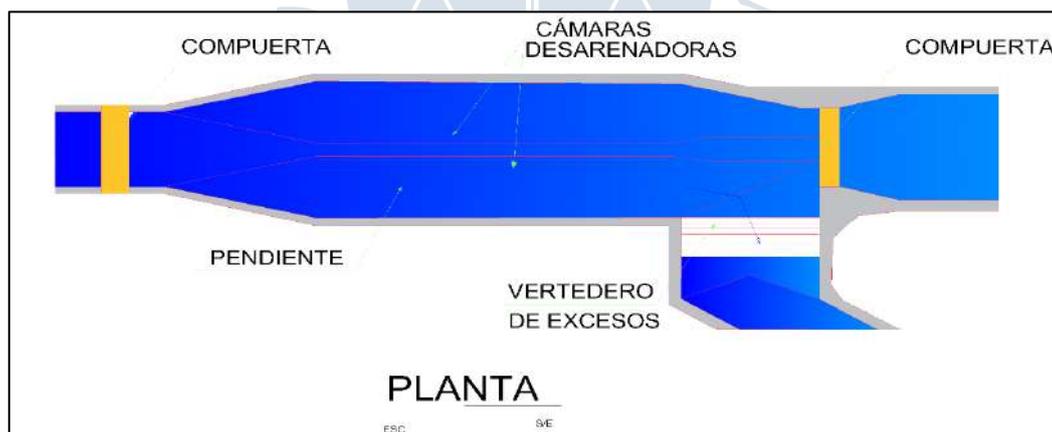


Figura 3. Desarenador mixto.
Fuente: (Coronado, El Desarenador, 1998)

1.3.2. En función de la velocidad de escurrimiento

1.3.2.1. De baja velocidad $v < 0.6$ m/s

Cuando la velocidad promedio del flujo de agua en el desarenador está entre 0.20 m/s y 0.60 m/s. Puede garantizar la eliminación de partículas finas de diámetro 0.15 mm, su particularidad es que la forma de tolva tiene una gran pendiente de sección transversal y la

separación de sus orificios de purga es de 1m a 2m, mientras que la sección transversal agua abajo decrece. Debido a que tiene un área de evacuación auxiliar y de aislamiento, pueden realizar la limpieza de los tanques y se puede aprovechar como trampa de gravas el área de gran dimensión ubicado aguas arriba. Por lo general, la cantidad de agua utilizada para la purga varía del 5 % al 10 % del gasto producido. Estos desarenadores aseguran la eliminación de partículas finas.

1.3.2.2. De alta velocidad $v > 1.0$ m/s

Cuando la velocidad promedio del flujo de agua en el desarenador está entre 1.00 m/s y 1.50 m/s. Esta velocidad es suficiente para arrastrar el material depositado en el orificio de purga localizado en el extremo aguas debajo de la estructura. El consumo de agua estimado es del 2 % y el 10 % del gasto derivado.

Dado que su límite inferior es de aproximadamente 1m/s, generalmente es difícil elegir la velocidad de dimensionamiento, ya que su límite inferior reduce la eliminación de partículas cuyo diámetro es inferior a 0.50 mm, y a velocidades más bajas se podrá producir la decantación. Por lo tanto, estos desarenadores solo pueden garantizar la eliminación de partículas de material medio o grueso.

1.3.3. Por la disposición de los desarenadores

1.3.3.1. En serie

Son desarenadores formados por dos o más cámaras construidas una tras otra.

1.3.3.2. En paralelo

Consiste en dos o más cámaras dispuestas y diseñadas en paralelo para que en la central hidroeléctrica opere cada una de ellas con una parte del caudal total derivado. Ver Figura 4.

1.3.3.3. Disposición mixta

Es una combinación de dos o más desarenadores construidos en serie paralelamente y la capacidad está dividida en partes del gasto derivado.

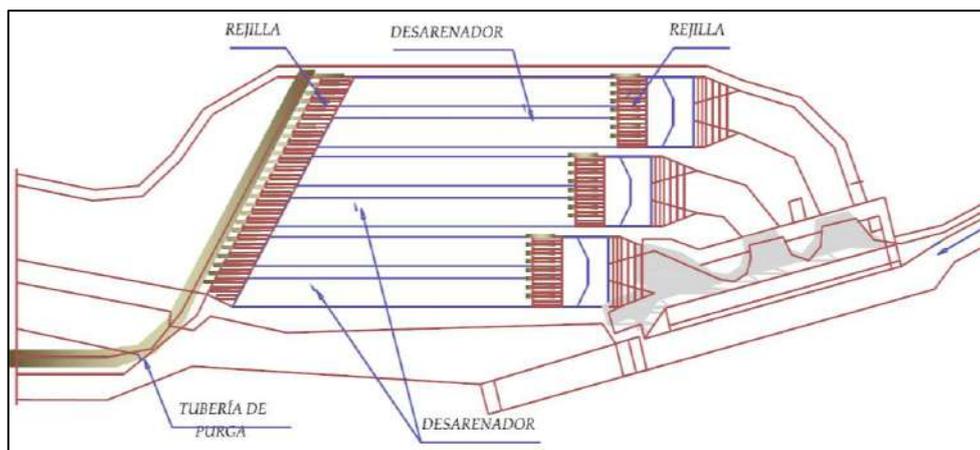


Figura 4. Desarenador con cámara en paralelo.
Fuente: Coronado del Águila (1998)

1.4. Elementos del desarenador

A continuación, se explicarán los elementos de un desarenador para que este realice su función (Villón, 2005):

1.4.1. Transición de entrada

Es la estructura responsable de conectar correctamente el canal y el desarenador, por lo que no causará grandes pérdidas de energía, asimismo debe garantizar uniformidad de la velocidad en la entrada para minimizar la turbulencia.

Dado que la eficiencia de la sedimentación depende de la uniformidad de la velocidad en la sección transversal, la transición debe proyectarse de la mejor forma. Se sugiere orientar un ángulo en relación al canal de entrada, de divergencia suave menor o igual a $12,5^\circ$. En tal sentido, la longitud requerida de la transición puede determinarse mediante la siguiente fórmula:

$$L_T = \frac{B_{des} - B_{can}}{2 \tan 12,5^\circ} \quad (1.1)$$

Donde:

L_T - Longitud de transición

B_{des} - ancho del desarenador a nivel de superficie libre

B_{can} - ancho del canal a nivel de superficie libre

1.4.2. Cámara de sedimentación

La cámara de sedimentación o nave desarenadora es la parte principal de la estructura, en ellas las partículas sólidas por efecto de la gravedad caen al fondo, debido a la disminución de la velocidad por el aumento de la sección transversal.

El número de naves está relacionado a:

- La limpieza hidráulica del desarenador
- La continuidad del servicio que se pretenda tener
- Razones económicas
- Normas básicas de operación
- Disponibilidad en el mercado de las compuertas y de su técnica de izaje.

Cualquier forma puede optar la sección transversal, sin embargo, normalmente se elige una sección trapezoidal simple o compuesta o una rectangular. La primera sección es hidráulicamente más eficiente y económica puesto que las paredes se pueden usar como un revestimiento simple. Para facilitar el lavado, es conveniente que las partículas se concentren hacia el centro y el fondo no sea horizontal, sino que tenga una pendiente hacia el centro. La caída transversal regularmente elegida es de 1:5 a 1:8. La segunda sección simplifica enormemente la construcción, sin embargo, debido a que las paredes deben soportar la presión ejercida por el suelo externo y al ser diseñados como muros de sostenimiento, resulta costoso.

1.4.3. Vertedero

Al final de la cámara hay un vertedero, en el cual el agua limpia ingresa al canal. Las capas superiores son las que se limpian primero es por eso que el agua se drena desde el desarenador a través del vertedero, este deberá funcionar con descarga libre.

Del mismo modo, cuanto más baja es la velocidad que pasa por el vertedero, menor es la turbulencia que provoca en el desarenador y a su vez arrastra menos materiales en suspensión. La velocidad máxima puede llegar a 1m/s, es por eso que la carga en el vertedero no debe ser mayor de 25 cm. Si se obtiene una mayor velocidad de descarga o una mayor altura de carga, esto puede deberse al elevado caudal en la nave del desarenador, por lo tanto, se recomienda aumentar el número de naves para distribuir mejor el flujo en múltiples naves.

1.4.4. Compuerta de lavado

Se utiliza para descargar el material depositado en el fondo del desarenador hacia al río. Para permitir el movimiento de los sedimentos hacia la purga, la pendiente del fondo del desarenador varía entre el 2 % y el 6 %, que es igual o mayor que la pendiente del fondo de la nave del desarenador. Esto es con la finalidad de no ocasionar remanso y a lo largo de la operación reducir la capacidad de transporte del canal.

Para realizar el lavado de forma rápida y eficaz, se considera que la velocidad de descarga debe estar entre el rango de 3 m/s y 5 m/s.

1.4.5. Canal directo

También conocido como by pass, el canal directo permite mantener la operación durante la limpieza o mantenimiento de la nave del desarenador. Por lo general el desarenador se limpia en un corto periodo de tiempo, pero si es necesario vaciarla por completo con fines de inspección o mantenimiento, el canal directo o by pass evita que se interrumpa la operación de la central hidroeléctrica. Es por eso que se han colocado dos compuertas, la primera en la entrada del desarenador y la segunda en el by pass.

No sería necesario el uso del by pass, si el desarenador estuviera conformado por dos o más naves. En este caso una de las naves trabaja, temporalmente, con el flujo total mientras las otras están fuera de servicio.

1.4.6. Transición de salida

Se utiliza para conducir el agua desde la nave del desarenador hasta el canal de salida. Su finalidad es evitar la conformación de turbulencia en la salida del desarenador, que pueda resuspender los sedimentos decantados.

1.5. Principios de diseño

Para que un desarenador funcione eficientemente, se deben cumplir los siguientes principios de funcionamiento:

1.5.1. Hidráulico

- El caudal en las naves desarenadoras se distribuye uniformemente.
- No hay presencia de vórtices de eje vertical u horizontal, por esta razón las líneas de corriente son paralelas.

- No provocar remanso en el canal aguas arriba.
- Distribución uniforme del caudal en cada nave, lo cual es esencial en la etapa de limpieza de la nave.

1.5.2. Sedimentológico

- Sedimentación de los materiales en suspensión que hacen daño a la central hidroeléctrica.
- Descarga hacia el exterior de los depósitos de sedimentos.
- Purga uniformemente de las naves desarenadoras.
- Evitar sectores imposibles de limpiar en las naves.
- Transición de entrada sin sedimentación.
- Eficiencia adecuada (entre 90 % y 100 % para partículas de 0,4 mm de diámetro).



Capítulo 2

Modelos numéricos

2.1. Forma integral de las ecuaciones de Navier Stokes

2.1.1. Ecuación de continuidad. Ecuación de conservación de la masa

Para volúmenes de control, el principio de continuidad estipula que la masa no se crea ni se destruye, para un fluido general la expresión tridimensional no estacionaria en un punto es:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = m'_{ent} - m'_{sal} \quad (2.1)$$

Es decir, la masa neta que fluye dentro o fuera del volumen de control (VC) en un intervalo de tiempo es igual al cambio de masa total dentro del límite del volumen,

$$m_{sist} = cte \text{ ó } \frac{dm_{sist}}{dt} = 0$$

Según (Cengel & Cimbala, 2006), el gasto diferencial de masa de fluido que fluye a través de un elemento pequeño con un área dA en la sección transversal, es proporcional a dA , a la densidad del fluido y a la componente de velocidad del flujo normal a dA .

La forma integral de la ecuación de continuidad, definida en la forma del teorema de transporte de Reynolds es:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (2.2)$$

Donde

ρ : Densidad

\forall : Volumen del fluido

\vec{V} : Vector velocidad

\vec{n} : Vector unidad normal para la superficie de control

t: Tiempo

VC: Volumen de control

SC: Superficie del volumen de control.

La ecuación anterior representa que la razón de cambio respecto del tiempo de la masa que está dentro del volumen de control sumando la razón neta de flujo de masa a través de la superficie de control es igual a cero.

La ecuación diferencial de la conservación de masa se expresa como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.3)$$

Donde

∇ : Operador gradiente

\vec{V} : Vector velocidad

La ecuación (2.3) se deriva de la ecuación (2.2), aplicando el teorema de divergencia de Friedrich Gauss en el segundo término, para cambiar el diferencial de área de la superficie de control por el diferencial de volumen del volumen de control. Para fluidos incompresibles, la densidad del fluido no cambiará ni transitoriamente ni espacialmente en el dominio, por lo que la divergencia de la velocidad $\nabla \cdot \vec{V} = 0$.

2.1.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Para obtener la ecuación del momento, se debe hacer memoria de la forma particular de la segunda ley de Newton, que establece que la variación del momento es el resultado de la suma de todas las fuerzas que ejercen sobre un elemento. Empleando esta ley en el teorema del transporte de Reynolds (Sánchez, 2004):

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) muestra que la sumatoria de las fuerzas aplicadas en el sistema es igual a la suma de la tasa de cambio de tiempo del momento acumulado en el volumen de control y el flujo neto de impulso a través de las superficies de control.

Para un flujo de canal abierto, existen cinco diferentes fuerzas que actúan sobre el volumen de control:

1. La fuerza de gravedad a lo largo del canal debido al peso del agua (F_g)
2. La fuerza de presión (F_p)
3. La fuerza de fricción a lo largo del fondo y los lados de la canal (F_f)
4. La fuerza de contracción / expansión debido a los cambios repentinos en la sección transversal del canal (F_e)
5. La fuerza de corte del viento (F_w)

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_p + \vec{F}_f + \vec{F}_e + \vec{F}_w \quad (2.4)$$

Fuerza de gravedad

La fuerza de gravedad que actúa sobre el volumen de control mostrado en la figura es una función del volumen del fluido que actúa sobre el volumen de control se puede escribir como:

$$\vec{F}_g = \rho g A dx S_0 \quad (2.5)$$

Donde S_0 : es la pendiente que puede tener en la estructura.

Fuerza de presión

La fuerza de presión es la resultante de la fuerza hidrostática en el lado izquierdo del volumen de control (F_{pl}), la fuerza hidrostática en el lado derecho del volumen de control (F_{pr}).

$$F_p = \rho g \frac{\partial y}{\partial x} A dx \quad (2.6)$$

Se muestra en la Figura 5, la presión ejercida por la superficie de contacto inferior en el volumen de control (F_{pb}) como se puede ver en:

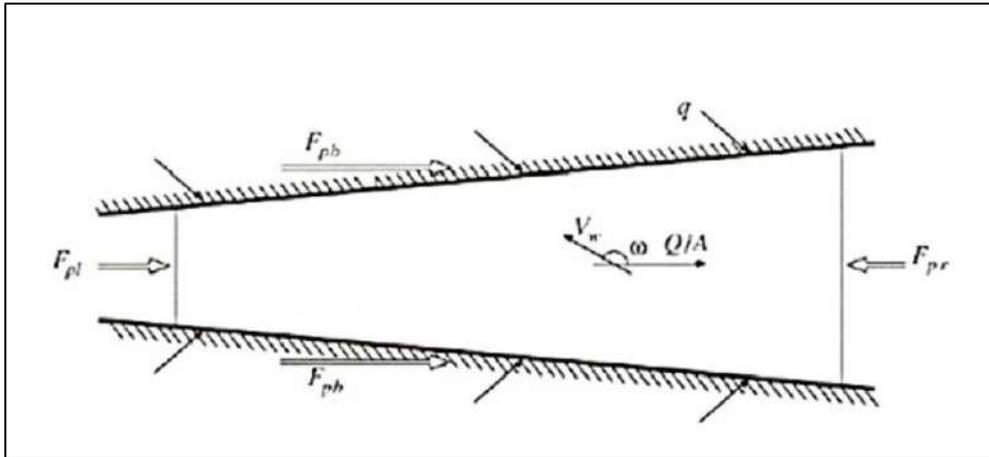


Figura 5. Volumen de control
Fuente: (Sánchez, 2004)

La fuerza de presión resultante que actúa sobre el volumen de control se puede escribir como:

$$F_p = F_{pl} - F_{pr} + F_{pb} \quad (2.7)$$

Fuerza de fricción

La fricción generada por el esfuerzo cortante a lo largo de la parte inferior y lateral del volumen de control puede definirse por el esfuerzo de corte del lecho y se puede escribir como $-\tau_0 P dx$, donde P es el perímetro mojado. El esfuerzo cortante del lecho se puede definir de acuerdo a la fórmula de flujo uniforme constante (Sánchez, 2004):

$$\tau_0 = \rho g R S_f = \rho g (A/P) S_f \quad (2.8)$$

Donde

R: el radio hidráulico definido por la relación del área de flujo y el perímetro mojado (A/P).

A: el área del flujo

P: el perímetro mojado

S_f : a pendiente de fricción, que se deriva de la ecuación de Manning y dada como:

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{\mu^2 R^{4/3}} \quad (2.9)$$

n : es el coeficiente de rugosidad de Manning,

V : la velocidad de flujo

μ : Una constante, que es igual a 1,49 en unidades británicas y 1,0 en unidades SI.

Basado en la definición de esfuerzo de corte de lecho dado en la ecuación anterior, la fuerza de fricción que actúa sobre el volumen de control toma la forma final como se muestra a continuación:

$$F_f = -\rho g A S_f dx \quad (2.10)$$

Fuerza de contracción / expansión

La contracción o expansión repentina del canal causa la pérdida de energía a través de la turbulencia. Se puede considerar que estas pérdidas son similares. Se puede considerar que estas pérdidas son similares a las de un sistema de tuberías. La magnitud de estas pérdidas es una función del cambio de velocidad en toda la longitud del canal, $V^2 / 2g = (Q/A)^2 / 2g$. Las fuerzas asociadas con estas pérdidas turbulentas pueden definirse, así como la fuerza de fricción, excepto el término S_f que se sustituye por S_e , que es la pendiente de pérdida de Foucault¹ que representa la pérdida de energía debido a una contracción o expansión brusca.

$$S_e = \frac{K_{ec}}{2g} \frac{\partial(Q/A)^2}{\partial x} \quad (2.11)$$

Donde K_{ec} es el coeficiente de la expansión o contracción adimensional que se define como negativo para la expansión del canal y positivo para la contracción canal. Por lo tanto, el término de la fuerza de contracción / expansión se convierte en:

$$F_e = -\rho g A S_e dx \quad (2.12)$$

Fuerza de corte de viento. La fuerza de corte del viento es ocasionada por la resistencia a la fricción del viento contra el agua en una superficie libre del. Se puede definir como una función de esfuerzo de corte del viento, τ_w , y se escribe como $\tau_w B dx$. El esfuerzo de corte

¹ Las corrientes de Foucault son corrientes tensiones inducidas debido a las variaciones de flujo magnético a que se someten núcleos de bobinas y transformadores. Estas tensiones inducidas provocan la formación de corrientes parásitas en el núcleo, Las corrientes parasitas generan pérdidas de energía a través del efecto Joule. Las corrientes convierten formas útiles de energía (como la cinética,) en exceso de calor. Fuente: (Bernal, 2010).

del viento se define como el producto de un factor de corte del viento, W_f y la densidad del fluido:

$$\tau_w = -\rho W_f \quad (2.13)$$

$$W_f = \frac{C_f |V_r| V_r}{2} \quad (2.14)$$

C_f : un coeficiente de esfuerzo de corte

V_r : velocidad del fluido en relación con el límite del volumen de control.

El V_r puede ser escrito como:

$$V_r = \frac{Q}{A} - V_w \cos \omega \quad (2.15)$$

V_w : un coeficiente de esfuerzo de corte

ω : es el ángulo que la dirección del viento forma con la dirección de la velocidad media del fluido, (Q/A) .

De acuerdo con la definición de esfuerzo de corte del viento dada en la ecuación anterior, la fuerza de corte del viento que actúa sobre el volumen de control toma la forma final que se muestra a continuación:

$$F_w = -\rho W_f B dx \quad (2.16)$$

Finalmente, la suma de las cinco fuerzas define la fuerza total sobre el lado izquierdo de la ecuación de momento:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_p + \vec{F}_f + \vec{F}_e + \vec{F}_w \quad (2.17)$$

$$\sum F = \rho g A dx S_o + \rho g \frac{\partial y}{\partial x} A dx - \rho g A S_f dx - \rho g A S_e dx - \rho W_f B dx$$

En la ecuación (2.2), los dos términos de momento en el lado derecho representan la velocidad de cambio de almacenamiento de cantidad de movimiento en el volumen de control y la salida neta de momento a través de la superficie de control, respectivamente.

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.18)$$

La salida neta de momento es la suma del flujo de salida de momento menos el flujo de entrada de momento en el volumen de control. La tasa de flujo de entrada de masa del volumen de control es la suma de ambas flujo de corriente de entrada corriente y el flujo de entrada lateral y se define como $-\rho(Q + qdx)$.

El flujo de entrada de momento para el volumen de control se calcula con la multiplicación de las dos tasas de flujo de entrada de masa por sus respectivas velocidades y una componente de corrección de momento, β :

$$\iint_{\text{entrada}} \vec{V} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = -\rho(\beta BQ + \beta v_x qdx) \quad (2.19)$$

v_x : es la velocidad media de flujo de entrada lateral en la dirección del flujo del canal principal.

El coeficiente de impulso, β , representa la distribución no uniforme de la velocidad en una sección transversal del canal específico.

$$\beta = \frac{1}{V^2 A} \iint v^2 dA \quad (2.20)$$

Donde v es la velocidad del fluido en una pequeña zona elemental dA en la sección transversal del canal. En general, el valor del coeficiente de momento varía entre 1.01 para los canales prismáticos rectos a 1.33 por valles fluviales con llanuras de inundación.

El flujo de salida de momento del volumen de control es también una función del flujo de salida de masa del volumen de control, que puede ser definido como las series de Taylor de expansión de flujo de entrada de masa. Por lo tanto, la salida de momento del volumen de control se calcula como:

$$\iint_{\text{salida}} \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \rho (\beta V Q + \frac{\partial(\beta V Q)}{\partial x} dx) \quad (2.21)$$

Por lo tanto, la salida neta de momento en la superficie de control es:

$$\begin{aligned} \int_{sc} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA &= -\rho (\beta B Q + \beta v_x q dx) + \rho \left(\beta V Q + \frac{\partial(\beta V Q)}{\partial x} dx \right) \\ &= -\rho \left(\beta v_x q - \frac{\partial(\beta V Q)}{\partial x} dx \right) \end{aligned} \quad (2.22)$$

La tasa de tiempo de cambio de cantidad de movimiento acumulada en el volumen de control se escribe como una función del volumen de la longitud del canal elemental, dx . El momento asociado con este volumen elemental se puede escribir como $\rho V A dx$, o $\rho V Q dx$ y la tasa de tiempo de cambio de momento se da como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \vec{V} \rho d\forall = \rho \frac{\partial Q}{\partial t} dx \quad (2.23)$$

Cuando todos los términos se combinan y se sustituyen en la ecuación de momento:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho d\forall + \int_{sc} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.2)$$

$$\rho g A dx S_o + \rho g \frac{\partial y}{\partial x} A dx - \rho g A S_f dx - \rho g A S_e dx - \rho W_f B dx = -\rho \left(\beta v_x q - \frac{\partial(\beta V Q)}{\partial x} dx \right) + \rho \frac{\partial Q}{\partial t} dx \quad (2.24)$$

Esta ecuación se simplifica y se reordena a la siguiente forma, si todos los términos se dividen por ρdx y V se sustituye por Q/A :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + g A \left(\frac{\partial y}{\partial x} - S_o + S_f + S_e \right) - \beta v_x q + W_f B = 0 \quad (2.25)$$

El término de profundidad de agua en esta ecuación se puede ser reemplazado por la elevación de superficie del agua, h , utilizando la igualdad:

$$h = y + zx \quad (2.26)$$

Donde z es el fondo del canal sobre un punto de referencia (como el nivel medio del mar). La derivada de esta con respecto a x se escribe como:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \quad (2.27)$$

Sin embargo, el término $\partial z / \partial x$ es igual a la pendiente negativa del canal, por lo que la ecuación también se puede escribir como:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} - S_o \quad (2.28)$$

La ecuación de momento puede expresarse en términos de h por:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - \beta v_x q + W_f B = 0 \quad (2.29)$$

2.1.3. Ecuación de conservación de la energía

El principio en el que se basa la ecuación de la energía es el primer principio de la termodinámica. Si este principio se aplica a un volumen de control, significa que el cambio de tiempo de la energía total en el volumen de control es igual al aumento de trabajo de las fuerzas que actúan sobre el volumen y el flujo neto de calor por medio del contorno del dominio

La energía total por unidad de masa, E , de un fluido se obtiene sumando a la energía por unidad de masa, e , un término relativo a la energía cinética por unidad de masa, $|\vec{v}|^2/2$. De esta manera, podemos escribir la energía total como:

$$E = e + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = e + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \quad (2.30)$$

En este caso, la magnitud que se mantiene es la energía total por unidad de volumen, es decir, ρE . Este cambio en el volumen Ω conduce a:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega \quad (2.31)$$

Siguiendo la línea de la ecuación general de conservación, se puede manifestar la contribución a la del término convectivo como:

$$- \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (2.32)$$

A diferencia de la ecuación de continuidad y de la ecuación de cantidad de movimiento, hay flujo de difusivo. Como podemos ver, esto es proporcional al gradiente de magnitud de la conservación de la unidad de masa (Ley de Fick). El flujo difusivo, \vec{F}_D , se define para un fluido estacionario, solo la energía interna se muestra en la expresión.

$$\vec{F}_D = -\gamma \rho k \nabla e \quad (2.33)$$

En esta expresión, $\gamma = C_p/C_v$ se muestra la relación de calores específicos donde el coeficiente de difusividad térmica es representado por k . El flujo difusivo representa una parte del flujo de calor en el volumen de control, llamado difusión de calor debido a la conductividad térmica intermolecular (transferencia de calor a través del gradiente de temperaturas), Sin embargo, la ecuación (2.17) se puede expresar en la forma general de la ley de Fourier de la transferencia de calor como:

$$\vec{F}_D = -k \nabla T \quad (2.34)$$

Donde el coeficiente de conductividad térmica es k y la temperatura estática absoluta es T . La otra parte del flujo de calor neto es la cantidad de calor por unidad de volumen causada por absorción, emisión, radiación, o a reacciones químicas. La fuente de calor se puede expresar (cambio del flujo de calor por unidad de masa) como \dot{q}_h , que junto a la variación de trabajo realizado por las fuerzas de volumen \vec{f}_e , se contienen en la ecuación del momento, abarcan todas las fuerzas de volumen:

$$Q_V = \rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h \quad (2.35)$$

Finalmente, las fuerzas de superficie, Q_S , también forman parte de la ecuación de conservación de la energía. Estas fuerzas incluyen el trabajo realizado, tanto por las fuerzas de presión, esfuerzos normales y tangenciales en el elemento fluido. Al reorganizar todas las contribuciones a la ecuación de la energía, obtenemos la siguiente ecuación de conservación (Sánchez, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho E (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} k (\nabla T \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{T} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} dS \quad (2.36)$$

2.2. Aproximaciones y simplificaciones de las ecuaciones de Navier Stokes

El comportamiento dinámico de fluidos se rige por las ecuaciones de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía.

En el caso más general, las ecuaciones completas de Navier-Stokes tienen las siguientes características:

- Son dependientes del tiempo
- Tridimensionales
- Incluye esfuerzos viscosos
- Considera la compresibilidad del fluido
- Son ecuaciones en derivadas parciales elípticas y altamente no lineales
- Se encuentran acopladas entre sí.
- Sin embargo, en la mayoría de los casos pueden simplificar el análisis y simplificar las ecuaciones de la siguiente manera:
 - Por imposición de condiciones de contorno que no cambian con el tiempo (estacionarios).
 - La reducción de dimensiones (problemas estacionarios, bidimensionales o axisimétricos).
 - Aproximando el comportamiento del fluido (incompresible, no viscoso).
 - Simplificando las fuerzas que actúan sobre el fluido (hidrostático, potencial).
 - Aproximaciones basadas en valores medios (Reynolds medio, profundidad media (*Depth-averaged*)).

2.2.1. Fenómenos estacionarios

Se dice que un fluido es estacionario cuando lo son sus condiciones de contorno. Sin embargo, existen muchos dominios fluidos que dependen del tiempo, como las olas, mareas, etc. En cambio, hay ocasiones en donde las condiciones de contorno estacionarias, el flujo depende del tiempo debido a la inestabilidad, tales como las estelas turbulentas y los vórtices. alternos Ver Figura 6.

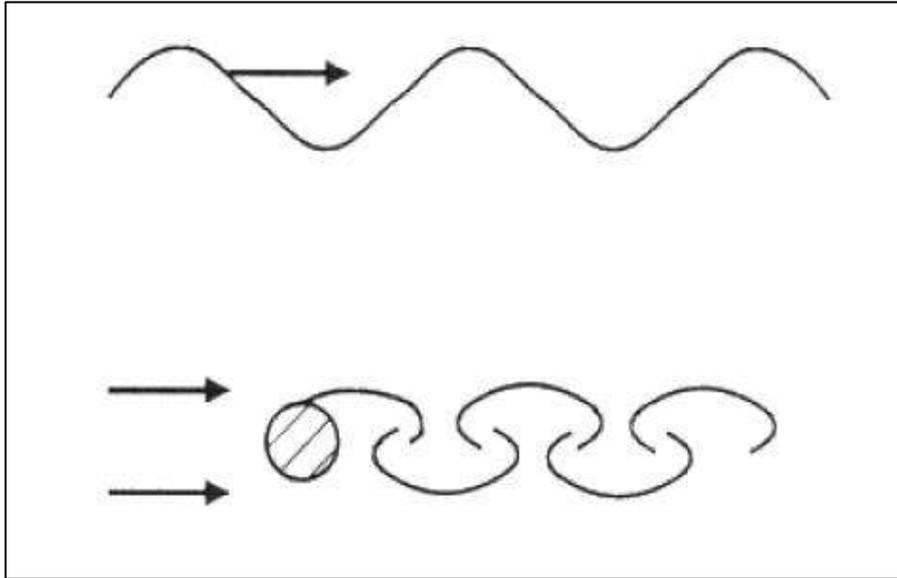


Figura 6. Sistemas no estacionarios.
Fuente: (Sánchez, 2004)

Sin embargo, muchas soluciones se basan en un método dependiente del tiempo para lograr soluciones de estado estacionario. Matemáticamente hablando, un fenómeno estacionario conlleva que la variación de tiempo de cualquier variable del problema sea igual a cero, es otros términos:

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (2.37)$$

2.2.2. Flujos incompresibles

Normalmente, los fluidos son compresibles en mayor o menor grado. Sin embargo, las variaciones de densidad motivadas por cambios de presión pueden ser despreciados si:

- El número de Mach, $Ma = u/c \ll 1$

En donde:

u = velocidad del flujo

c = velocidad del sonido dentro del flujo

Se utiliza para encontrar los efectos de compresibilidad en un flujo unidimensional.

- Los cambios de temperatura son menores.

Cabe señalar que el término incompresible, no significa que la densidad es constante; de hecho, en muchos casos, la densidad es la causa del movimiento de los fluidos. Por ejemplo: los cambios de salinidad en los océanos o los cambios de temperatura en la atmósfera.

Los resultados numéricos de los flujos compresibles e incompresibles son:

Flujos compresibles:

- Ecuaciones de transporte para la densidad y la energía interna (o entalpía).
- Adquirir presión a través de una relación termodinámica.
- Solución mediante un método basado en la densidad.

Flujos incompresibles:

- La energía interna es intrascendente (las ecuaciones no están acopladas).
- La conservación de la masa lleva implícita una ecuación para la presión.
- La solución utiliza un enfoque basado en la presión.

2.3. Modelos de turbulencia

Su uso depende del fenómeno a estudiarse y el grado de exactitud que se requiere en las soluciones. Según las escalas de turbulencia a resolver, o en función de la cantidad de energía cinética turbulenta a transbordarse en las ecuaciones continuas (Fernández, 2012).

En el caso de flujos laminares o no viscosos, resolver las ecuaciones que controlan el comportamiento del fluido no traerá consigo grandes dificultades. En contraste, la simulación de los flujos turbulentos tiene serios problemas. En la Figura 7 se resume la clasificación de los principales modelos de turbulencia existentes en la literatura, donde se organizan de acuerdo al coste computacional asociado a su función (Sánchez, 2004).

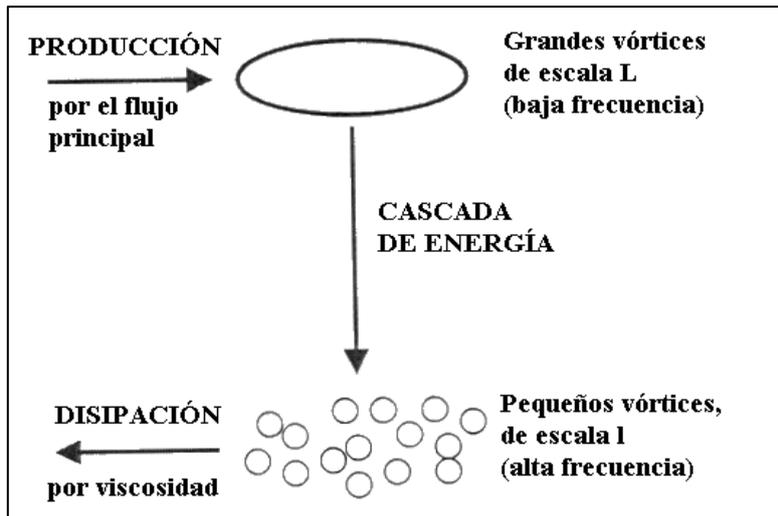


Figura 7. Descripción del proceso de la turbulencia
Fuente: (Sánchez, 2004)

2.3.1. Simulación numérica Directa (DNS)

Utiliza mallas extremadamente finas, es decir, resuelve desde macroescalas hasta escalas disipativas de Kolmogorov.

Teniendo en cuenta que, para números de Reynolds elevados las escalas de disipación de Kolmogorov son más pequeñas y utilizando las ecuaciones de escalas, se puede estimar el número de nodos necesarios para la simulación 3D.

Teniendo en cuenta que la distancia entre nodos no puede ser mayor que el tamaño de las escalas más pequeñas. Siendo así, se concluye que la duración de la simulación es directamente proporcional al número de Reynolds, en otros términos, la simulación numérica directa se aplica a formas geométricas simples de bajo Re (hasta 10^3), en este caso no es necesario el uso de una computadora de gran capacidad (Fernández, 2012).

2.3.2. Simulación de vórtices grandes (LES)

La simulación completa de un flujo turbulento, ligado del tiempo y a superiores números de Reynolds, es básicamente irrealizable por la finura de la discretización que se necesita; el volumen de los elementos debe ser menor que la escala de movimiento mínima. Por lo tanto, LES es una opción más económica que el DNS.

El avance del LES se apoya en la siguiente observación: las escalas de turbulencia pequeñas tienen características más generales que las escalas de turbulencia grandes. Entonces, Por ello, la idea es solventar solo las grandes escalas de la turbulencia y aproximar el impacto de la turbulencia a pequeña escala (por esta razón, LES requiere una discretización menos fina que el DNS).

Después de usar este método y filtrar las ecuaciones, se reconstruye la velocidad instantánea (media + turbulenta) que tienen la posibilidad de ser capturadas por la malla y el efecto de la disipación viscosa se modela para las escalas inferiores, que no tienen la posibilidad de solucionar apropiadamente la malla usada. A escalas inferiores, se espera que los movimientos turbulentos dependan menos del problema y logren modelar de manera más general (Sánchez, 2004).

Los flujos turbulentos tienen una gran extensión de escalas de longitud y tiempo. El rango de tamaños de remolino que pueden encontrarse en un flujo se muestra esquematizado en la Figura 8. En el lado derecho de la figura se muestra un componente típico de velocidad en un punto del flujo; el rango de escalas es obvio.

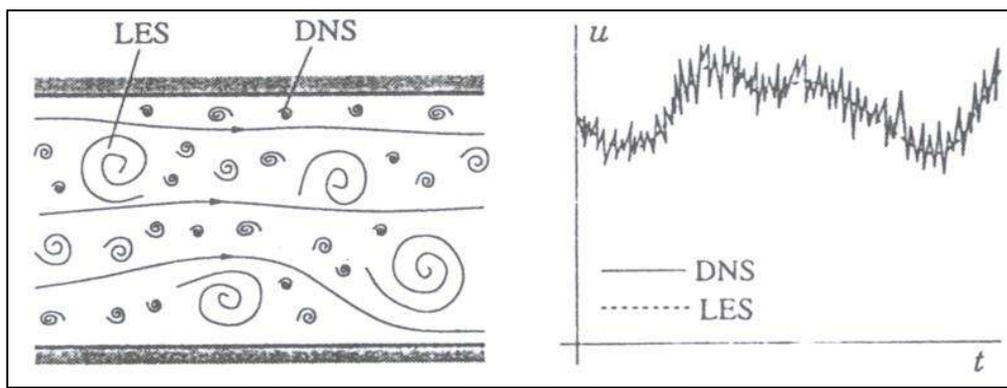


Figura 8. Izquierda: representación esquemática del movimiento turbulento
Derecha: dependencia temporal de un componente de velocidad en un punto.
Fuente: Atoche (2013)

Para las escalas pequeñas, hay distintos procedimientos de proximidad, los métodos más simples son: el de longitud de mezcla, proporcional al tamaño de la malla y el modelo de Smagorinsky.

2.3.3. Modelo de Reynolds- Promediado Navier- Stokes (RANS)

Utilizando modelos de turbulencia se modelan todas las escalas, intentando encontrar el accionar estadístico de las variables del flujo usando el promedio de tiempo en las ecuaciones de transporte. Las variables se descomponen en un valor medio y su parte fluctuante, esta parte fluctuante da inicio a las nombradas Tensiones de Reynolds.

La expresión general del tensor de Reynolds es:

$$\tau_{ij} = -\rho \mu'_i \mu'_j \quad (2.38)$$

La ecuación (2.38) comprende las oscilaciones de velocidades en todas las direcciones. El producto es un momento de orden superior, está en funcionalidad de las velocidades medias y sus derivadas. La semisuma de la diagonal primordial del tensor se llama “energía cinética turbulenta” (Casa, 2016).

Las tensiones pueden ser reemplazadas por modelos algebraicos simples como: modelo de longitud de mezcla; modelo con introducción de viscosidad artificial, modelo k-épsilon; o inclusive pueden ser sustituidas por modelos completamente cerrados, en el que las ecuaciones de transporte se definen para cada componente de las tensiones de Reynolds.

El tiempo del promedio tendrá que ser más grande al tiempo característico de las oscilaciones de la escala integral, para que la separación del valor medio y la parte fluctuante tenga una interpretación estadística y física. Este procedimiento es muy adecuado en la práctica de ingeniería, ya que el flujo promedio es más grande que en las oscilaciones.

Se tienen algunos procedimientos para calcular los promedios, entre ellos: promedios temporales continuos, promedios muestrales discretos, promedios espaciales o máxicos (Fernández, 2012).

2.3.3.1. Ecuaciones de RANS

Las ecuaciones Navier-Stokes utilizará la notación con subíndices para expresar su forma diferencial. Para fluidos newtonianos compresibles, en ausencia de términos fuente, las ecuaciones de Navier-Stokes se denotan como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_{ij}} \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j H) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_j} (u_j \tau_{ij}) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_{ij}} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (2.41)$$

μ_i : representa la componente de la velocidad en la dirección x_i ($i=1,2,3$).

Respecto de la formulación anterior, simplemente se ha renombrado las componentes de la velocidad (u, v, w) por (u_1, u_2, u_3) .

Los subíndices repetidos indican la suma para dicho índice. Los elementos del tensor de esfuerzos viscosos, τ_{ij} se definen como:

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} + \lambda \frac{\partial \mu_k}{\partial x_k} \delta_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(\frac{2\mu}{3} \right) \frac{\partial \mu_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2.42)$$

Cuando utilizamos las hipótesis de Stokes. Para flujos incompresibles, el segundo término $\partial \mu_k / \partial x_k$ de la ecuación (2.42) corresponde al término de la divergencia de la velocidad, desaparece. Las componentes del tensor de deformaciones están dadas por:

$$\delta_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.43)$$

Además, el tensor de rotación (parte antisimétrica del tensor variación de la velocidad) se determina como:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.44)$$

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

$$E = e + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (2.45)$$

$$H = h + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (2.46)$$

Para flujos incompresibles (ρ constante), tenemos la posibilidad de simplificar las ecuaciones de la siguiente forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \mu_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = k \nabla^2 T \quad (2.49)$$

con $\nu = \mu/\rho$ la viscosidad cinemática y ∇^2 el operador de Laplace.

Reynolds en 1895 presenta el primer método para estudiar los flujos en régimen turbulento. El método se basa en descomponer las variables del flujo en su valor medio más la fluctuación, como se observa en la Figura 9. Las ecuaciones de Navier-Stokes se solucionan entonces para los valores medios, que son los más interesantes para muchas aplicaciones. Por lo tanto, si se consideran flujos incompresibles, las componentes de la velocidad y la presión en las ecuaciones (2.47), (2.48) y (2.49) se reemplazan por:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.50)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (2.51)$$

Los valores medios están representados por una barra sobre la variable y los turbulentos por una prima. El valor medio se obtiene aplicando uno de los siguientes métodos, según el tipo de problema:

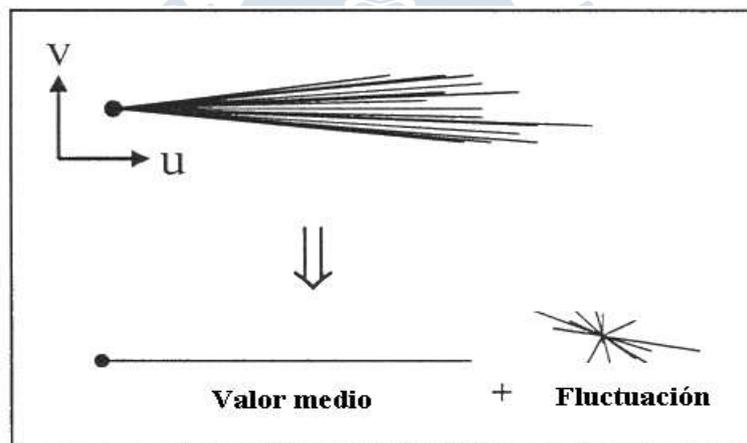


Figura 9. Las variables del problema se descomponen en un valor medio y otro fluctuante debido a la turbulencia.

Fuente: (Sánchez, 2004)

A. Promedio temporal

Este es un método adecuado para flujos turbulentos estacionarios. El valor medio de la variable no cambia con el tiempo, sólo en el espacio. De hecho, $T \rightarrow \infty$ significa que el período de tiempo debe ser superior a el tiempo habitual de las escalas de oscilaciones turbulentas.

$$\bar{u}_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i dt \quad (2.52)$$

B. Promedio espacial

Es adecuado para turbulencias homogéneas. En esta situación, $\bar{\mu}_1$ es uniforme en el espacio, pero cambiará con el tiempo.

$$\bar{u}_i = \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} u_i d\Omega \quad (2.53)$$

Características generales del operador promedio

El operador promedio tiene las siguientes características importantes:

1. Según definición, el valor promedio de un término fluctuante es cero, por ejemplo, para la velocidad $\bar{u}_i = 0$.
2. Si las magnitudes están correlacionadas, el producto de dos proporciones fluctuantes no es cero. Entonces, $\overline{u'_i u'_j} \neq 0$ y, como observaremos, ello implica un transporte neto de momento.

C. Promedio de Favre

En el caso de que la densidad no sea constante, se puede aplicar una densidad promedio. Por otro lado, debido a las correlaciones adicionales provocadas por las oscilaciones de densidad, las ecuaciones gubernamentales promediadas se vuelven algo complicadas. El método más apropiado es usar el promedio de Reynolds para la densidad y la presión, y el promedio de Favre para las otras variables como los elementos de la velocidad.

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{\bar{\rho}} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \rho u_i dt \quad (2.54)$$

La densidad promedio de Reynolds es representada por $\bar{\rho}$. Por esta razón, la descomposición de Favre queda:

$$u_i = \tilde{u}_i + u''_i \quad (2.55)$$

\tilde{u}_i : representa el valor medio.

u''_i : representa el término oscilante de la velocidad u_i .

Características del promedio de Favre

Se cumple que $\overline{v''_i v''_j} \neq 0$, pero es opuesto de lo que sucede con el promedio de Reynolds, el valor medio del término oscilante de la velocidad no es cero, es decir, $\overline{u''_i} \neq 0$. Cumpliéndose además la igualdad $\overline{\rho u''_i} = 0$.

Por último, se puede conseguir la siguiente relación entre los promedios de Favre y Reynolds:

$$\overline{\rho u_i} = \overline{\rho} \overline{u_i} \quad (2.56)$$

2.3.3.2. Ecuaciones RANS en flujos incompresibles

Sustituyendo la descomposición de la ecuación (2.50) y (2.55) en las ecuaciones de Navier-Stokes en el flujo compresible y teniendo en cuenta las propiedades del operador promedio, se consiguen las siguientes relaciones para la conservación de la masa y la cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \rho \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau_{ij}} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2.58)$$

Que son las ecuaciones RANS para flujo compresible, con

$$\overline{\tau_{ij}} = \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (2.59)$$

Se puede comprobar que las ecuaciones (2.57) y (2.59) son idénticas a las ecuaciones originales de Navier-Stokes, a excepción del término:

$$\overline{\tau_{ij}^R} = \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2.60)$$

Que es lo que se conoce como el tensor de esfuerzos de Reynolds; y representa la transferencia de momento causada por las oscilaciones turbulentas.

Efecto de la turbulencia sobre el flujo principal

Para argumentar el efecto de la turbulencia en el flujo, verificaremos la forma integral de las ecuaciones para cualquier volumen suponiendo la densidad constante. Ver Figura 10.

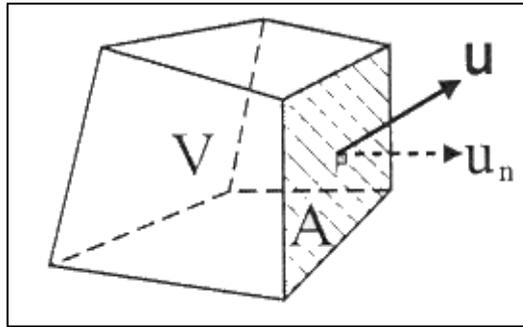


Figura 10. Elemento de control en el que se representa la velocidad a través de una de sus caras.
Fuente: (Sánchez, 2004)

A. Conservación de la masa

La ecuación de la conservación de la masa expresada en variables medias e instantáneas son:

- Instantáneas:

$$\sum \rho u_n A = 0 \quad (2.61)$$

donde el sumatorio se extiende a lo largo de las caras del elemento.

- Medias:

$$\sum \rho \bar{u}_n A = 0 \quad (2.62)$$

Como puede ver, simplemente reemplace la velocidad media, \bar{u} , por la instantánea, u . Entonces, tenemos la posibilidad de asegurar que la velocidad media satisface la misma ecuación de continuidad que la velocidad instantánea.

B. Conservación del momento cinético

Las ecuaciones de conservación del momento expresadas en términos del flujo instantáneo y medio son:

- Instantáneo:

$$\frac{d}{dt}(\rho V u) + \sum (\rho u_n A) u = \text{fuerzas} \quad (2.63)$$

- Medio:

$$\frac{d}{dt}(\rho V \bar{u}) + \sum \rho A (\bar{u}_n \bar{u} + \overline{u'_n u'}) = \overline{\text{fuerzas}} \quad (2.64)$$

- Y reorganizando la expresión:

$$\frac{d}{dt}(\rho V \bar{u}) + \sum (\rho A \bar{u}_n) \bar{u} = \overline{\text{fuerzas}} + \sum (-\rho \overline{u'_n u'}) A \quad (2.65)$$

La expresión instantánea es exactamente la misma que la ecuación promediada del momento cinético, excepto el término adicional que aparece en la ecuación como un esfuerzo adicional denominado esfuerzo de Reynolds.

Resumiendo, la velocidad media satisface la misma ecuación del momento cinético que la velocidad instantánea, agregando unos esfuerzos ficticios denominados esfuerzos de Reynolds.

C. Conservación de magnitudes escalares

En la ecuación de flujo por convección de alguna magnitud escalar ϕ , generalmente para cambiar las variables instantáneas a las promediadas, solo necesitamos aumentar un flujo escalar extra.

$$\overline{\rho u \phi} = \rho \bar{u} \bar{\phi} + \overline{\rho u' \phi'} \quad (2.66)$$

2.3.3.3. Modelos de viscosidad artificial (EVM)

Estos modelos asignan una expresión a la viscosidad turbulenta que es dependiente de alguna ecuación de transporte extra. Se han creado distintos modelos de una o dos ecuaciones, entre ellos:

Modelo K-épsilon (k - ϵ)

En la investigación realizada “Calibración hidráulica del desarenador San Gabán analizando modelos de turbulencia con Telemac -3D”, se concluyó que el modelo de turbulencia k -épsilon consiguió que los resultados de valores teóricos del modelo físico se asemejen a los resultados del modelo k -épsilon. El modelo numérico k -épsilon logró representar las condiciones hidráulicas y sedimentológicas del desarenador San Gabán II comparando el cálculo de eficiencia de los valores teóricos del modelo físico con los resultados del modelo k -épsilon (Ruiz, 2016).

Es un modelo semiempírico conformado por dos ecuaciones, se considera el modelo más completo entre los modelos simples para representar turbulencia en I-CFD (Launder and Spalding, 1974).

Éste es, probablemente, el modelo de turbulencia más utilizado actualmente en aplicaciones industriales. Consiste en dos expresiones, que son ecuaciones para la viscosidad turbulenta:

$$u_t = C_u \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.67)$$

C_u : es una constante.

k : es la energía cinética turbulenta

ε : es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta.

Para determinar k y ε se utilizan las ecuaciones de transporte, que se escriben:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i k - \Gamma^{(k)} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = \rho (P^{(k)} - \varepsilon) \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i \varepsilon - \Gamma^{(\varepsilon)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \rho (C_{\varepsilon 1} P^{(k)} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.69)$$

Las difusividades de k y ε están basadas en las viscosidades moleculares y turbulentas:

$$\Gamma^{(k)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.70)$$

$$\Gamma^{(\varepsilon)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (2.71)$$

y en el modelo estándar (Launder and Spalding, 1974), las constantes son:

$$C_\mu = 0,09, C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1,3$$

Nótese que en el concepto de fuentes en la ecuación de k es un balance entre la producción $P^{(k)}$ y la disipación ε . La tasa de cambio de la producción (por unidad de masa) $P^{(k)}$ viene dado por:

$$P^{(k)} = v_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 \quad (2.72)$$

Sin embargo, la expresión general para flujos arbitrarios es más complicada. Bajo los supuestos del modelo, siempre es positivo y proporcional al cuadrado del gradiente de velocidad.

El flujo con $P(k) = \varepsilon$ (producción = disipación) se considera localmente en equilibrio. Para un esfuerzo constante con una capa límite equilibrado que tiene una distribución de velocidades logarítmicas y con números de Reynolds superiores (μ despreciable) la ecuación 2.73 se transforma en:

$$(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}\varepsilon)\sigma_{\varepsilon}\sqrt{C_{\mu}} = k^2 \quad (2.73)$$

Modelo K-omega (k - ω)

Este es el primer modelo completo de turbulencia, ya que además de contar con una ecuación para modelar k , también tiene un parámetro; que se ajusta a “la tasa de disipación de energía por unidad de volumen y tiempo”. Las ecuaciones para el modelo k - ω son (Wilcox, 1998):

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G_k - Y_k \quad (2.74)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}\omega)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v}\omega)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + G_{\omega} - Y_{\omega} \quad (2.75)$$

Donde:

G_k : representa la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad

G_{ω} : es la generación de ω

Γ_k y Γ_{ω} : representan la difusividad efectiva de k y ω , respectivamente.

Las difusividades efectivas para el modelo k y ω son:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.76)$$

$$\Gamma_{\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \quad (2.77)$$

Donde:

σ_k y σ_{ω} : son los números de Prandtl turbulentos para k y ω respectivamente.

La viscosidad turbulenta se calcula de la siguiente forma:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (2.78)$$

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right) \quad (2.79)$$

Donde:

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (2.80)$$

$$R_k = 6 \quad (2.81)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (2.82)$$

$$\beta_i = 0.072 \quad (2.83)$$

El término G_k representa la formación de la energía cinética turbulenta donde:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (2.84)$$

Y la producción de ω está dada por:

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{K} G_k \quad (2.85)$$

El coeficiente α es se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + Re_t/R_\omega}{1 + Re_t/R_\omega} \right) \quad (2.86)$$

El término para la disipación de k está dado por:

$$Y_k = \rho \beta^* f_\beta^* k \omega \quad (2.87)$$

Donde:

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \lambda_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680\lambda_k^2}{1 + 400\lambda_k^2} & \lambda_k > 0 \end{cases} \quad (2.88)$$

$$\lambda_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.89)$$

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \xi^* F(M_t)] \quad (2.90)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/15 + (Re_t/R_\beta)^4}{1 + (Re_t/R_\beta)^4} \right) \quad (2.91)$$

El término para la disipación de ω está dado por:

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (2.92)$$

Donde:

$$f_{\beta^*} = \frac{1 + 70\lambda_\omega}{1 + 80\lambda_\omega} \quad (2.93)$$

$$\lambda_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_\infty^* \omega)^3} \right| \quad (2.94)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.95)$$

$$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \xi^* F(M_t) \right] \quad (2.96)$$

$$\xi^* = 1.5 \quad (2.97)$$

La función de compresibilidad está dada por:

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases} \quad (2.98)$$

Donde:

$$M_t^2 = \frac{2K}{a^2} \quad (2.99)$$

$$M_{t0} = 0.25 \quad (2.100)$$

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.101)$$

Tabla 1. Valores de los coeficientes.

$\alpha_\infty^* = 1$	$\alpha_\infty = 0.52$	$\alpha_0 = \frac{1}{9}$	$\beta_\infty^* = 0.09$	$\beta_i = 0.072$
$R_\beta = 8$	$R_k = 6$	$R_\omega = 2.95$	$\sigma_k = 2.0$	$\sigma_\omega = 2.0$

Fuente: (Wilcox, 1998)

Capítulo 3

Características generales del proyecto

3.1. Funcionamiento del desarenador de la Central Hidroeléctrica del Quiroz

Originalmente el desarenador se ha diseñado, y construido, como una estructura tipo Dufour, de una nave con el canal techado de purga continua en su fondo. Para los fines de mantenimiento el Desarenador se ha equipado con un canal *by pass* ubicado a su margen derecha. Para los fines de controlar los flujos en la nave del Desarenador su salida y entrada se han equipado con tableros de cierre de madera, que también se han considerado para los fines semejantes en la entrada del canal *by pass*.

Desde el inicio de la operación del canal de derivación y de la Central Hidroeléctrica. María Auxiliadora del Quiroz, en el año 1995, el desarenador ha mostrado funcionamiento deficiente, especialmente en la temporada de avenidas. Pues, debido a la enorme cantidad de sólidos que ingresan al canal de derivación desde el río Quiroz, nunca se pudo lograr la operación continua del desarenador, sino que se tuvo que acceder a su funcionamiento intermitente, con los cierres periódicos de su nave para la limpieza y lavado de sólidos precipitados, desviando durante esta operación el flujo de agua, cargada con todo el sólido en suspensión y de arrastre de fondo, por el canal *by pass*.

Referente al funcionamiento del Desarenador en el período antes del año 2000, el Estudio de Factibilidad de Mejoramiento de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz; se indica lo siguiente:

Durante el aforo de caudales en el canal de derivación aguas abajo del desarenador, llevado a cabo en el mes de abril del año 2002, se constató presencia de arena precipitada en el fondo del canal de un espesor de unos 8.00cm, aproximadamente. Considerándose que las velocidades de agua diseñadas para el desarenador son significativamente menores que aquellas en el canal, esta arena debió haberse depositado en el desarenador, lo que no había ocurrido. Este hecho induce a concluir que arena depositada en el canal pudo llegar allí de modo siguiente:

- Por el canal de desvío (o by pass) durante su operación en el transcurso del lavado de la nave del desarenador de los sólidos precipitados.
- Por el mismo desarenador, cuando este se encontraba lleno de sólidos precipitados hasta el nivel de la losa de salida de la nave, y por ende dejaba de funcionar adecuadamente.

Para los fines de mejorar la operación del desarenador, el Estudio de Factibilidad de Mejoramiento de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz, ha considerado lo siguiente (Miloradovic, 2010):

- Instalar compuertas planas deslizantes en la entrada y salida de la nave del desarenador, y también en la entrada del canal by pass, con los fines de recortar el tiempo del lavado de sólidos precipitados, y consecuentemente de la operación del canal by pass.
- Añadir en la terminación de la nave, antes del inicio de su transición de salida, un vertedero con la cresta en la cota 493.7m.s.n.m., 1.073m más alto que el nivel de la losa de fondo al final de la transición mencionada.

Las modificaciones indicadas del desarenador se han ejecutado en los años 2002 y 2003, junto con otras obras de mejoramiento de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.

El funcionamiento actual del desarenador es intermitente, pese a que su válvula de purga se mantiene abierta continuamente, pero sólo con fines de evitarse su colmatación. Además, para los fines de facilitar el lavado de la nave del desarenador se han quitado las losetas con orificio de concreto armado que techaban el canal de purga.

3.2. Ubicación

El desarenador se encuentra ubicado en la Región Piura, Provincia de Ayabaca, Distrito de Paimas en el valle del río Quiroz, cercano al Caserío de Zamba.

El desarenador se ha ubicado entre los Kms. 0+ 360.10 y 0+456.00 del Canal de derivación de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.

La altitud de la zona del proyecto varía entre las elevaciones 404.5 y 500.00 m, en el sistema arbitrario, adoptado para su construcción. Según los mapas de IGN, la altitud de la zona del barraje es de 800 m.s.n.m., existiendo por lo tanto una diferencia de aproximadamente 300 metros entre las elevaciones reales y arbitrarias.

3.3. Accesibilidad

Para el acceso al Proyecto, se debe tomar la carretera asfaltada Piura – Sullana – Las Lomas hasta llegar al desvío Ayabaca – Suyo, que lleva al distrito de Paimas. El acceso en este tramo es por carretera asfaltada; de Paimas al Proyecto hay un aproximado de 15 Km también por carretera afirmada. A continuación, en la Tabla 2 se presenta un cuadro de la ruta de acceso a la zona de estudio:

Tabla 2. Vías de acceso vía terrestre

De	A	Distancia	Tiempo	Vía
Lima	Piura	975 km	14h 00' 00"	Asfaltado
Piura	Paimas	160 km	02h 00' 00"	Asfaltado
Paimas	C.H. María Auxiliadora	15 km	00h 15' 00"	Afirmado

Fuente: (ELECTRONOROESTE S.A., 2013)

Vía aérea puede accederse, como sigue:

Vuelos diarios Lima - Piura (1,029 km) con duración de viaje de 1 hora 30 minutos. Ver Figura 11 y Figura 12.



Figura 11. Ubicación de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.

Fuente: (ELECTRONOROESTE S.A., 2013)

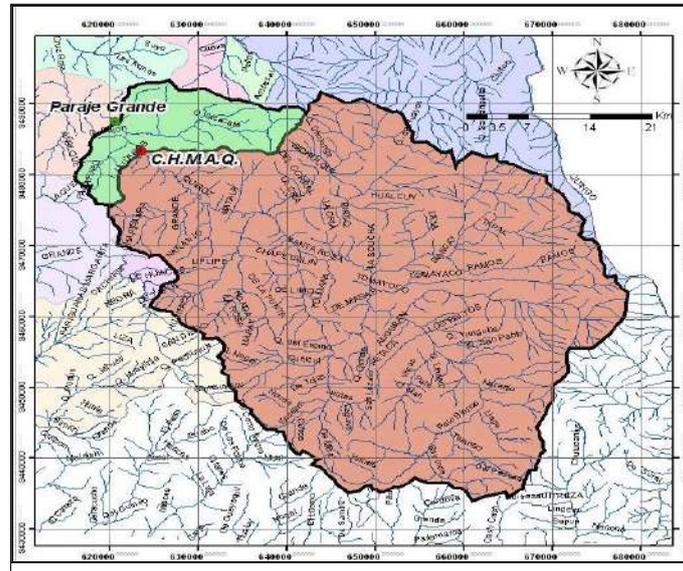


Figura 12. Plano georreferenciado de ubicación de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.
Fuente: (ELECTRONOROESTE S.A., 2013)

3.4. Clima

Debido a que se encuentra cerca del límite ecuatorial, las temperaturas mínimas son de 14°C y la máxima es de 32°C y la temperatura promedio es de 20°C . El clima es templado y húmedo porque se encuentra en las laderas de la región sierra. Las temperaturas más bajas ocurren en la época de invierno y las más altas ocurren entre enero y marzo.

En la Tabla 3, se grafica las características climáticas de la zona del proyecto de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.

Tabla 3. Características de clima

N°	Parámetro	Data
1	Atmósfera	<ul style="list-style-type: none"> • Aire puro sin contaminación de residuos industriales. • Contaminación de polvo que se levanta de la carretera Paimas-Ayabaca, por tránsito de vehículos.
2	Temperaturas Ambiente <ul style="list-style-type: none"> • Promedio en invierno • Promedio en verano • Promedio anual 	16°C 35°C 27°C
3	Humedad relativa <ul style="list-style-type: none"> • Promedio en invierno • Promedio en verano • Promedio anual 	80% 50% 70%
4	Precipitaciones <ul style="list-style-type: none"> • Total anual: Promedio plurianual 	670 mm
5	Velocidad del viento <ul style="list-style-type: none"> • Promedio: • Velocidad del viento para diseño 	5.00 km/h 60.00 km/h

3.5. Sismicidad

Desde la perspectiva sísmica, el territorio peruano, forma parte del Círculo Circumpacífico, que contiene las áreas más sísmicamente activas del mundo y por lo que a menudo experimenta frecuentemente movimientos telúricos. Sin embargo, dentro del territorio nacional, hay varias zonas que se diferencian por su superior o inferior frecuencia de estos movimientos. La norma Sismo resistente del Reglamento Nacional de Construcciones, divide al país en tres zonas:

- Zona 1.- Incluye la ciudad de Iquitos, parte del departamento de Iquitos, parte del Departamento de Ucayali y Madre de Dios; en esta zona la sismicidad es baja.
- Zona 2.- Incluye las regiones selváticas restantes, Puno, Madre de Dios, parte del departamento de Ayacucho y todas las provincias de Cusco. Los sismos en estas regiones ocurren con frecuencia, pero no son percibidos por la gente en la mayor parte de las ocasiones. En esta zona la sismicidad es moderada.
- Zona 3.- Cubre toda la costa peruana desde Tumbes hasta Tacna, la sierra norteña y central y parte de ceja de selva. Es la zona más afectada por los fenómenos telúricos y de más alta sismicidad.

De acuerdo con el mapa de zonificación sísmica del Perú y la Carta de intensidades publicadas por el Instituto de Defensa Civil; se concluye que el área en estudio se encuentra dentro de la zona de Alta Sismicidad (Zona 3), existiendo la posibilidad de que ocurran sismos de intensidades de VIII en la escala Mercalli Modificada. Asimismo, en el Mapa de isoaceleraciones del territorio peruano (con 10% de excedencia en 50 años), donde se obtiene para el área de estudio una aceleración horizontal máxima de 0.34g (ELECTRONOROESTE S.A., 2013). Ver Figura 13.



Figura 13. Zonificación Sísmica del Perú.
Fuente: (Norma técnica E.030 Diseño Sismoresistente, 2014)

3.6. Diagnóstico de obras civiles

3.6.1. Bocatoma

Localizada a 50 metros aguas arriba de la quebrada. Jacopa y a 40 m de la zona donde se emplazaba la antigua bocatoma de la C.H María Auxiliadora del Quiroz como se muestra en la Figura 14. En la Figura 15 se muestran las estructuras que conforman la bocatoma.



Figura 14. Bocatoma de la C.H María Auxiliadora del Quiroz.
Fuente: Elaboración propia (2018)

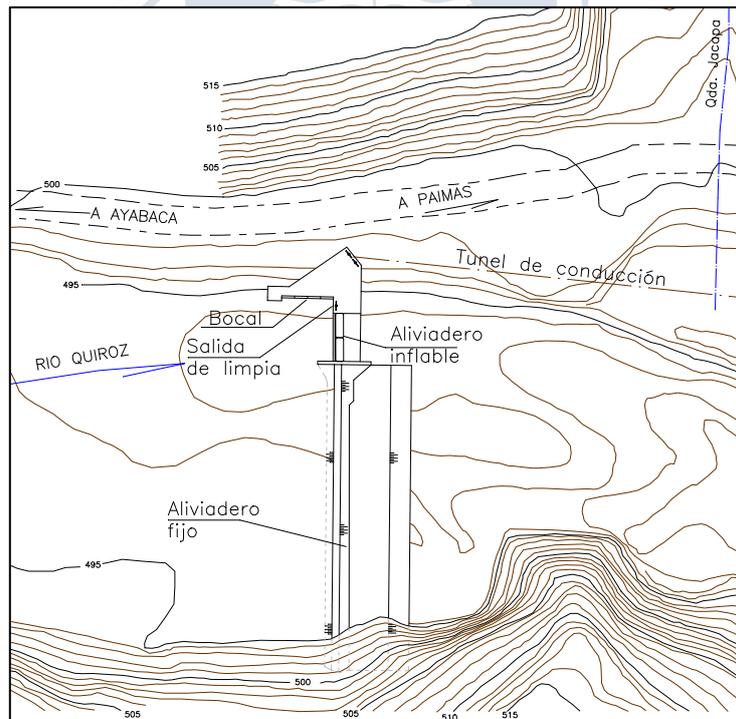


Figura 15. Disposición de represamiento y captación.
Fuente: (Universidad de Piura, 2002)

Ubicada en la margen derecha del río, capta hasta $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua, la cual es transferida al desgravador por medio de 2 tuberías de acero.

3.6.1.1. Aliviadero fijo de mampostería

Tiene una longitud de 38 metros aproximadamente que cierra el perfil del cauce a partir del muro derecho del aliviadero móvil hasta el macizo rocoso en la margen derecha del río. Tiene un nivel de coronación de 495.75 msnm, por encima del cual rebosará el agua cuando los caudales en el río Quiroz sean mayores de los que pueden descargarse a través del bocal.

3.6.1.2. Bocal

Ubicado en la margen derecha del cauce del río Quiroz con 4 aberturas provistas de rejilla de protección, cuenta además con un equipo hidromecánico para la limpieza del material flotante.

Este bocal se encuentra bastante erosionado, el mismo que debe ser reparado a la brevedad, antes de la siguiente avenida.

3.6.1.3. Compuertas de regulación

Son dos compuertas planas ubicadas a continuación del bocal, que se operan manualmente y permiten regular el ingreso de agua al canal de aducción a través de dos tubos de acero ubicados inmediatamente aguas abajo.

3.6.1.4. Compuerta de limpia o purga

Ubicada entre la compuerta inflable Obermeyer y el bocal. Tiene 1 metro de ancho.

3.6.1.5. Compuerta inflable tipo Obermeyer

Su base se encuentra en la cota 494.00 msnm. Está conformada por dos paneles metálicos que forman una placa de 2m de alto x8m de largo la cual gira en torno al eje fijo ubicado en la base.

La compuerta es elevada desde aguas abajo por 2 bladders que se inflan con aire comprimido.

3.6.2. Desarenador

Estructura ubicada entre las progresivas Km. 0+390.10 al Km. 0+456.00. Es una estructura hidráulica tipo Dufour de una nave, con purga continua, observar Figura 16.

Consta de:

- Nave con el canal de purga en el fondo
- Canal by pass ubicado a la izquierda de la nave
- Conducto de purga de sedimentos (tubería de acero) controla aguas abajo en la descarga por una válvula de compuerta.

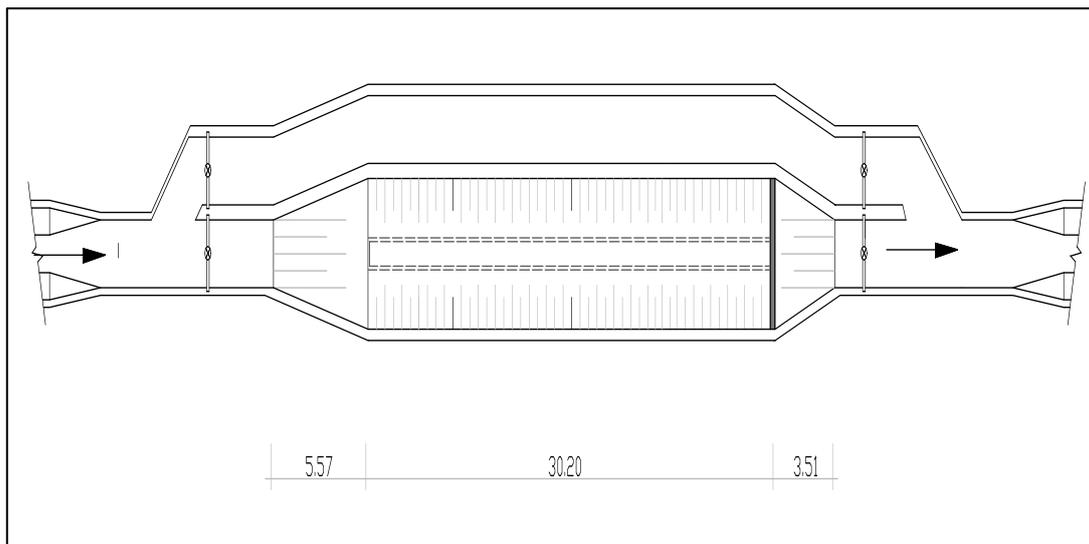


Figura 16. Planta del desarenador
Fuente: (Universidad de Piura, 2002)

El desarenador es de una nave, no tiene la capacidad ni eficiencia aceptable, sobre todo en épocas de lluvias, ver Figura 18. Por otra parte, las compuertas son accionadas manualmente, como se muestra en la Figura 17 y para ello es necesario 2 personas. Sería conveniente que tanto la compuerta de ingreso a la nave del desarenador como la compuerta del *by pass* se adecuen para que el accionamiento sea en forma eléctrica. También se requiere un rediseño o construcción de un nuevo desarenador, que estaría ubicado cerca de la cámara de carga (ELECTRONOROESTE S.A., 2013).



Figura 17. Compuerta de nave del desarenador accionada manualmente.
Fuente: Elaboración propia (2018)



Figura 18. Desarenador de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz.
Fuente: Elaboración propia (2018)

3.6.3. Canal de conducción a la cámara de carga

El canal de la CH Quiroz es de mampostería de piedra, de forma trapezoidal, con una longitud de 5 Km.

Presenta fisuras y erosión a lo largo de todo el recorrido (5 Km.) por tanto requiere reparación, también hay zonas con continuo ingreso de piedras y tierra al canal. Es necesario cubrir el canal con losas de concreto – tapas. A continuación, se observa la situación actual en la Figura 19 y Figura 20.



Figura 19. Fisuras y erosión en canal.
Fuente: Elaboración propia (2018)



Figura 20. Presencia de piedras y fisuras en el canal.
Fuente: Elaboración propia (2018)

3.6.4. Cámara de carga y aliviadero de excedencias

Se encuentra al final del canal de aducción. En su lado derecho la cámara tiene el vertedero libre que permite evacuar los excedentes de agua hacia el río por intermedio del

canal de excedencias, además cuenta con una compuerta deslizante de accionamiento manual para eliminación de sedimentos y rejillas en los ingresos a la tubería de presión.

Se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento. En la Figura 21 se observa la localización de la cámara de carga.

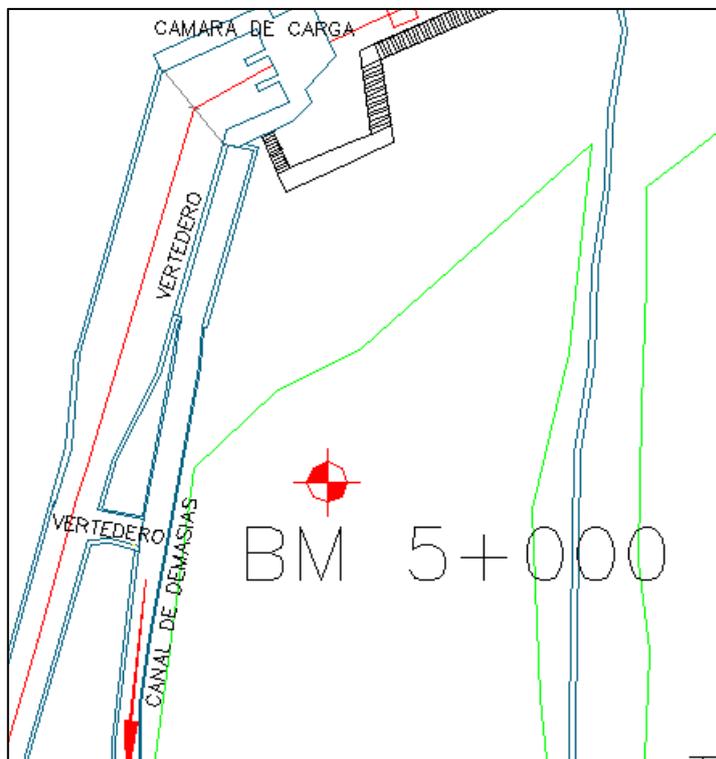


Figura 21. Ubicación de cámara de carga.
Fuente: (ELECTRONOROESTE S.A., 2013)

3.6.5. Casa de máquinas

La casa de máquinas es un edificio construido de concreto armado, que aloja dos grupos turbogeneradores con su equipo auxiliar, así como el equipo eléctrico de control de trabajo de los grupos y de salida de los generadores.

El equipo mecánico instalado en la casa de máquinas comprende dos turbinas tipo Francis de eje horizontal ($1.19 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal nominal, 80 m de salto nominal, 849 Kw de potencia nominal, 1200 rpm) y sus equipos auxiliares de regulación, lubricación y refrigeración. Asimismo, está instalada un puente grúa de 5 toneladas de capacidad de accionamiento manual. El agua turbinada se conduce hacia un Canal de descarga común que la lleva al río.

En la Figura 22 se observa la casa de máquina se encuentra en buen estado de conservación.



Figura 22. Casa de máquinas.
Fuente: (ELECTRONOROESTE S.A., 2013)

3.6.6. Canal de descarga

Debajo de la casa de máquinas están ubicados los conductos de descarga de las turbinas, que se unen en un canal de descarga común, el cual conduce el agua turbinada hasta el río. El canal de descarga es pequeño y se encuentra en buen estado de conservación, se observa en la Figura 23.



Figura 23. Canal de descarga.
Fuente: Elaboración propia (2018)

Capítulo 4

Modelación numérica

4.1. Sistemas continuos y discretos

En la simulación de sistemas continuos se supone que la naturaleza del sistema permite cambios de estado continuo, determinados por cambios continuos en los valores de las variables que representan el estado del sistema, mientras que en la simulación de sistemas discretos los cambios solo pueden tener lugar en instantes discretos en el tiempo (Barceló, 1996).

En un sistema continuo, las variables de estado cambian continuamente en el tiempo, mientras que, en un sistema discreto cambian instantáneamente de valor en ciertos intervalos de tiempo. En un sistema con cierto grado de complejidad, puede existir al mismo tiempo variables de estado continua y discreto (García, 2006).

Los sistemas discretos están compuestos por elementos como cables, tubos, vigas, columnas, etc, pero conectado en nodos. Como se observa en la Figura 24.

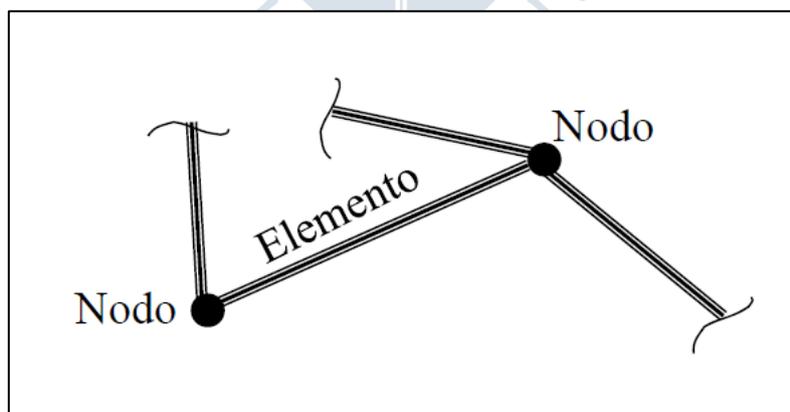


Figura 24. Sistemas discretos.
Fuente: (Vásquez, 2003)

Los sistemas continuos no están compuestos por elementos discretos distinguibles. Las variables de interés cambian con el tiempo y el espacio. Las ecuaciones físicas que los

describen son diferenciales, no algebraicas. Además, no tienen la posibilidad de resolverse directamente y primero deben discretizarse en elementos.

4.2. Métodos numéricos de discretización

Para facilitar el análisis del fluido se opta por la división del mismo en pequeños elementos de tamaño finito, estos son más prácticos y la memoria de las computadoras son capaces de manejarlas.

Para flujos simples de una dimensión, la técnica de discretización se lleva a cabo por niveles en las secciones transversales y el método de cálculo se da por etapas. En caso de existir dificultades de convergencia en algunas de las secciones, se asume un valor de tirante crítico y se continua con el proceso hasta finalizar. Por este motivo, para flujos unidimensionales los programas son robustos, rápidos y numéricamente confiables. Para flujos de mayor complejidad, tanto en 2D y 3D, es necesario resolver ecuaciones diferenciales, por lo que se requiere usar mallas para lograr un proceso de discretización más fino.

Los métodos principales de discretización son el método de diferencias finitas, de método de elementos finitos y el de volúmenes finitos, estos métodos emplean un conjunto finito de puntos discretos presentes en un dominio continuo para dar solución a las ecuaciones de dicho dominio. Cuando se encuentran los valores deseados en los puntos discretos, se puede utilizar la interpolación para hallar solución en cualquier otro punto.

Estos modelos numéricos muestran gran facilidad para usar datos de condiciones iniciales y de frontera compleja, con mucho detalle y precisión, en muchos problemas, en los cuales no existen soluciones analíticas. No obstante, la mayoría de estos procedimientos necesitan la solución de todos los nodos del dominio simultáneamente, lo que aumenta la carga computacional haciendo que el procesamiento se vuelva retardado.

También para este tipo de métodos, pueden presentarse dificultades con respecto a la convergencia numérica, que puede conducir a soluciones inexistentes y poco realistas, es por esta razón que el programador debe tener buen discernimiento al proponer soluciones.

Los tres métodos mencionados anteriormente son buenos para distintos problemas en específico; en general, para geometrías simples el método de diferencias finitas es una buena opción puesto que es muy rápido y simple. Para geometrías complejas se requieren mallas más complejas, que se pueden modelan mejor utilizando métodos de elementos finitos o volúmenes finitos (Vásquez, 2003).

4.2.1. Modelación numérica de diferencias finitas

Este método numérico es el más antiguo y simple. Su mayor restricción es la necesidad de usar mallas estructuradas por lo tanto reemplaza las derivadas en las ecuaciones diferenciales por diferencias finitas algebraicas evaluadas en los nodos de una malla estructurada. Es un método de discretización puramente matemático, no hay garantía que las propiedades físicas de conservación se preserven.

4.2.2. Modelación numérica de elementos finitos

Es una técnica general para aproximar problemas continuos, de la siguiente manera (Frías, 2004):

El medio continuo se divide en un número finito de elementos y su comportamiento está especificado por parámetros finitos asociados a ciertos nodos, que son los puntos de conexión entre elemento finito y sus adyacentes como se muestra en la Figura 25.

La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo está formado por los elementos ensamblados.

Las incógnitas del problema no son funciones matemáticas, sino el valor de estas funciones en los nodos.

Definir el comportamiento dentro de cada elemento de acuerdo con el comportamiento de los nodos a través de las funciones de interpolación o funciones de forma.

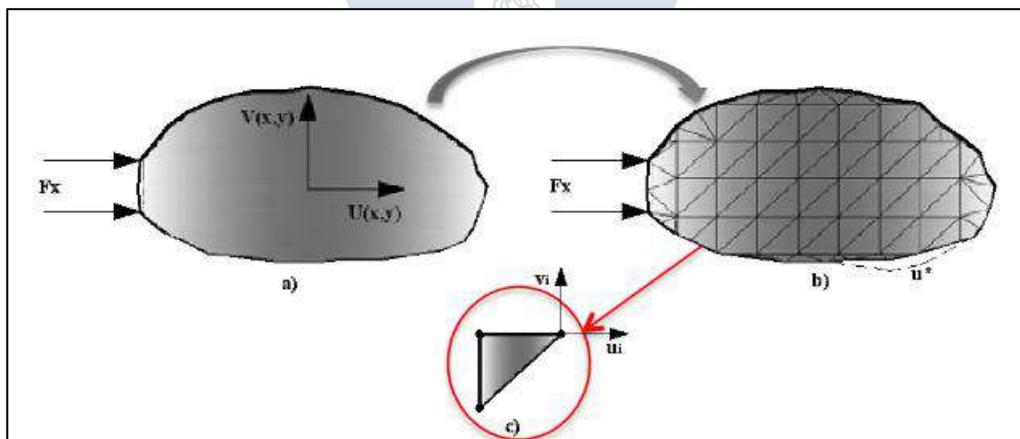


Figura 25. Representación esquemática de un dominio global y su subdivisión en dominios locales
a) Sistema continuo, b) modelo discreto, c) elemento finito.

Fuente: (Herrera, 2011)

4.2.3. Modelación numérica de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos es en código libre como en códigos comerciales el más usado en la investigación de fluidos: *Fluent*, *Adapco*, *CFX*. El dominio se discretiza en

volúmenes de control finitos y condiciones de contorno, se asume y se resuelven las ecuaciones de conservación y de turbulencia en cada volumen.

Las ecuaciones son linealizadas para obtener un sistema algebraico de ecuaciones y resueltas numéricamente de forma iterativa. No siempre se resolverán todas las ecuaciones, por ejemplo, si la variable no es necesaria en el problema no se resolverá la transferencia de calor.

Un beneficio de usar este método es que, para mejorar la precisión de resultados en la ubicación deseada, se puede refinar la malla alrededor del punto de interés, haciendo los cálculos en ese punto sea más detallados (Fernández, 2012).

4.3. Malla de cómputo

La discretización en un modelo numérico se efectúa por medio del mallado, que divide el dominio en un número finito de elementos, puntos, volúmenes de control.

Según el tipo de conectividad que existe entre los puntos o celdas de la malla se dividen en: mallas estructuradas y mallas no estructuradas (Fernández, 2012).

4.3.1. Malla no estructurada

Se caracterizan por una conectividad irregular, que permite que las celdas tetraédricas se cubran y se adapten a cualquier dominio tridimensional, lo que proporciona flexibilidad en el caso de formas geometrías complejas, como se observa en la Figura 26.

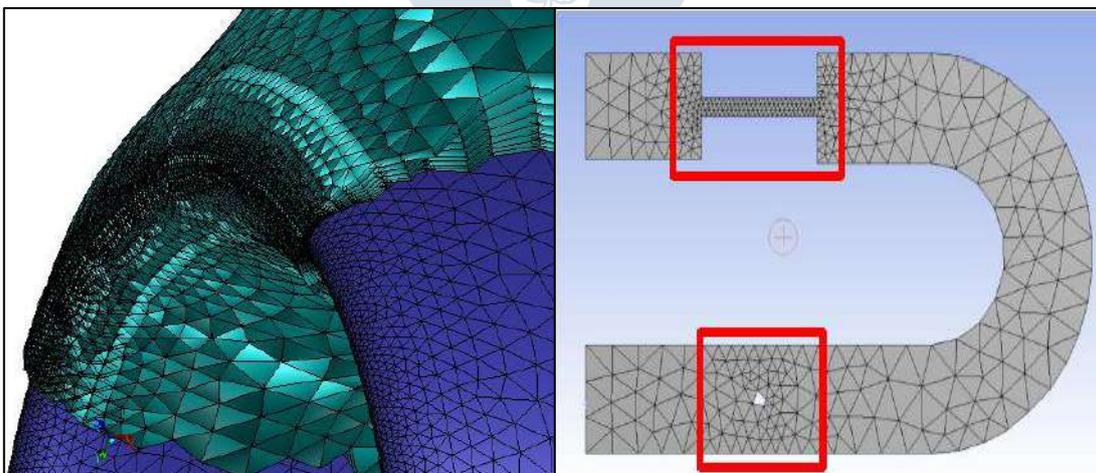


Figura 26. Dominio con malla no estructurada.
Fuente: (Ansys CFX 17.2, 2017)

4.3.2. Malla estructurada

Por lo general están alineadas con las direcciones principales de la malla. En cierto sentido las líneas de la malla siguen a las líneas de corriente y se alinean con los contornos sólidos del dominio. En el caso bidimensional las mallas serán cuadriláteros y para la investigación tridimensional se tendrá un mallado hexaédrico, como se muestra en la Figura 27.

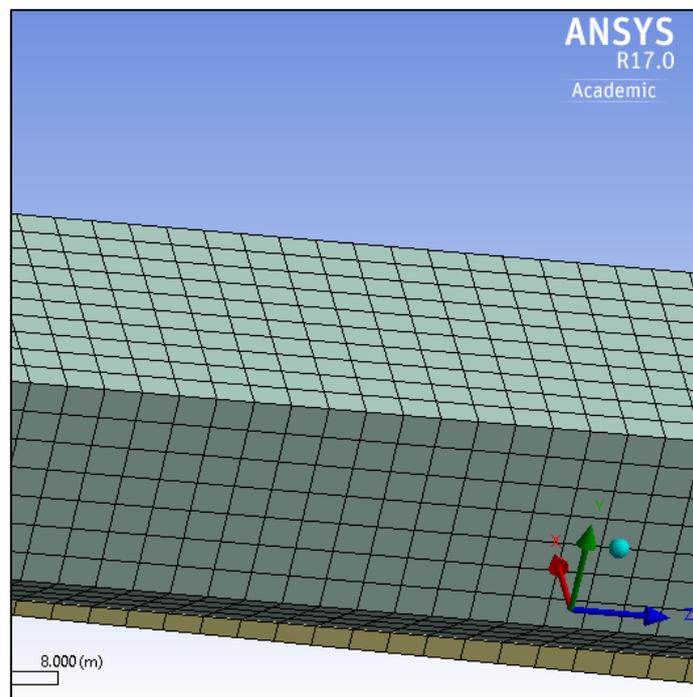


Figura 27. Dominio con malla estructurada.
Fuente: Elaboración propia

4.4. Clasificación de la modelación numérica

4.4.1. Hidrodinámica tridimensional- 3D

El agua es un medio continuo compuesto por innumerables partículas, por lo que diagnosticar las propiedades físicas de cada partícula resulta virtualmente utópico. Por lo tanto, el análisis de la dinámica del agua es muy compleja para varias estructuras hidráulicas de importancia práctica para el ingeniero civil (Maza, 1984).

Los modelos tridimensionales (3D) representan el estado más cercano de la modelación. Estos modelos pueden calcular las tres componentes espaciales de la velocidad, por eso son aplicables a cualquier situación práctica.

A continuación, se muestra algunos de los softwares más utilizados en el estudio de la hidrodinámica:

4.4.1.1. *Ansys CFX*

El software ANSYS CFX es un programa de alto rendimiento de la dinámica de fluidos (CFD) que ha sido aplicado para dar soluciones a un amplio rango de problemas de flujos de fluido durante más de 20 años. ANSYS CFX combina tecnología avanzada de solución para obtener soluciones confiables y precisas. El solucionador, moderno y altamente paralelizado, es la base para una amplia cantidad de modelos físicos para capturar prácticamente cualquier tipo de fenómeno relacionado con los fluidos y su flujo (Arteaga, 2017).

Ansys tiene una interfaz de trabajo *Workbench*, para el usuario es muy fácil de usar. Ahí están los distintos códigos que contiene ANSYS, como herramientas para crear geometrías y mallas, antes de la configuración CFX.

El programa de simulación numérica Ansys CFX usa el método de los volúmenes finitos, la cual consiste en discretizar una región en pequeñas sub-regiones llamadas volúmenes de control. Cada volumen de control es resuelto iterativamente, obteniéndose un resultado que, al unir todos los volúmenes, se obtiene el comportamiento del flujo (Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng & Kresta, 2004).

4.4.1.2. **FIDAP**

Es un paquete comercial de elementos finitos paralelos para la dinámica de fluidos computacional. FIDAP ofrece numerosos modelos físicos y numéricos para simulaciones que van desde flujos laminares altamente viscosos hasta flujos totalmente turbulentos.

FIDAP es un software comercial producido por *Fluent Inc.* Es un conjunto integrado de software de modelado de fluidos con capacidades completas para cada paso de la simulación de flujo de fluidos: creación de modelos, generación de mallas, entrada de datos, resolución y post-procesamiento.

Se describe FIDAP como un código de elementos finitos de propósito general para simular flujos de fluidos incompresibles en estado estacionario o transitorios bidimensionales, axi-simétricos o tridimensionales en geometrías complejas, en caso de ser necesario incluye los efectos de la transferencia de calor. Muchos problemas son susceptibles al análisis, incluidos los flujos isotérmicos newtonianos y no newtonianos, así como problemas de convección naturales y / o forzados y los flujos atmosféricos (Engelman, 1978).

4.4.1.3. **Telemac 3D**

TELEMAC-MASCARET es un conjunto integrado de solucionadores usado en el campo de flujo de superficie libre. Después de haber sido utilizado en el contexto de muchos

estudios en todo el mundo, se ha convertido en uno de los principales estándares en su campo. (HR Wallingford, 2016).

Telemac es un conjunto de ecuaciones de flujo a superficie libre derivadas por Barré de Saint-Venant en 1871, considerando un tirante promedio. Los principales resultados de calcular cada nodo de la malla computacional son el tirante o profundidad del agua y la velocidad promedio en la vertical. La principal aplicación del Telemac está en las superficies de aguas marinas o ríos. Además, el modelo puede resolver los siguientes fenómenos:

- Propagación de ondas largas, incluidos los efectos no lineales.
- La fricción en el lecho.
- El efecto de la fuerza de Coriolis.
- La influencia de fenómenos meteorológicos, como la presión atmosférica y el viento.
- Turbulencia.
- Flujos supercríticos y subcríticos.
- Influencia de la temperatura y gradientes de salinidad horizontales sobre la densidad.
- Coordenadas cartesianas o esféricas de grandes dominios.
- Zonas secas en el campo computacional: planos de marea y llanuras de inundación.
- Arrastre y difusión de un trazador por las corrientes, incluidos términos de creación y desintegración.
- Seguimiento de partículas y el cálculo de las derivas de Lagrange.
- El tratamiento de singularidades: presas, diques, alcantarillas, etc.
- Saltos fuera del dique.
- La inclusión de las fuerzas de arrastre creadas por estructuras verticales.
- La inclusión de los fenómenos de porosidad.
- La inclusión de las corrientes inducidas por las olas (por vínculos transversales con los módulos de ARTEMIS y TOMAWAC).
- Acoplamiento con el transporte de sedimentos.
- Acoplamiento con herramientas de calidad del agua.

El software tiene muchos campos de aplicación. En el campo marítimo, es especialmente necesario mencionar el tamaño de las estructuras de puertos, la investigación sobre el impacto de la construcción de diques sumergibles o dragado, el impacto de los residuos altamente activos de un emisario de la costa o la investigación de los penachos térmicos. En los ríos, también se puede mencionar la investigación relacionada con el impacto

de los proyectos de construcción (puentes, presas, espigones), roturas de presas, inundaciones o transporte de sedimentos.

Aunque es superficialmente complejo, proporciona un soporte de muy alta calidad para las evaluaciones hidráulicas en términos de análisis de los resultados y comprensión de los fenómenos hidráulicos en áreas de flujo complejas.

4.4.1.4. SSIIM

Es la abreviación de *Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option*, este *software* ha sido creado para aplicarse en ingeniería hidráulica y de sedimentación. Está basado en la aproximación del volumen de control con una malla tridimensional no-ortogonal. Las ecuaciones de Navier-Stokes se determinan para obtener las velocidades y la ecuación de convección-difusión para el transporte de sedimentos.

SSIIM se ha utilizado en investigaciones relacionadas con el flujo de agua y el transporte de sedimentos en ríos y estructuras hidráulicas, ver Figura 28. Esto incluye: eficiencia en reservorios, erosión local, descarga en vertederos, etc. (Atoche, 2003).

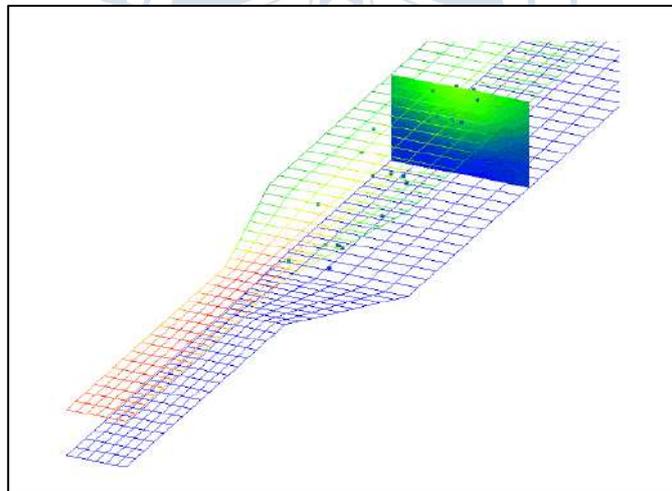


Figura 28. Resultados de un modelo numérico 3D de un desarenador usando SIIM.
Fuente: (Vásquez, 2003)

4.4.1.5. STAR- CD

Es una plataforma informática utilizada para simulaciones CFD, proporciona soluciones a problemas complejos relacionados con la mecánica de fluidos. La última versión puede usar nuevos métodos con la tecnología CFD para utilizar nuevos métodos de optimización de cálculos y análisis estructural, es un modelo basado en el método de los volúmenes finitos y admite la aplicación de mallas no estructuradas.

Es el primer programa de volumen finito elabora simulaciones mecánicas continuas. Los cálculos de fluidos y sólidos se realizan en paralelo en un solo mallado numérico creada

por el proceso numérico de mallado propio de CD-adapco, el mallado puede ser creado por hexaedros, tetraedros o poliedros arbitrarios y representa la interfaz entre áreas de material sólido o fluido, donde se determine el tamaño de la solución sin ningún mapeo o interpolación.

Este método es muy interesante para aplicaciones que requieren análisis de transferencia de calor y cálculo de tensiones, interacción entre el fluido y estructura o fusión y solidificación (cambio de fase de sólido a líquido). Puede simular problemas de ingeniería como turbulencia, combustión, transferencia de calor (radiación a transferir), reacción de flujos y física multifásica como cavitación, ebullición y condensación.

Puede encontrar mayor información en la siguiente dirección:
<https://mdx.plm.automation.siemens.com/star-cd>

4.4.1.6. FLOW 3D

Es una potente herramienta para resolver complejos problemas hidráulicos relacionados con la planificación, diseño y operación de nuestros sistemas hidráulicos, así como estudios asociados al medio ambiente (Sydor, 2016).

El programa informático FLOW 3D fue creado por *FlowScience*, se utiliza para la simulación computacional de fluidos CFD. El programa utiliza una malla tridimensional ortogonal. Hay muchas opciones y posibilidades para bloquear celdas o parte de ellas. El programa tiene una muy buena selección multifase y se usa específicamente para calcular el flujo tiempo-dependiente con superficie libre.

4.5. Elección de programa a utilizar – ANSYS CFX

ANSYS-CFX es más que un poderoso código de CFD. La integración del ANSYS *DesignModeler* y ANSYS *Meshing* a la plataforma de trabajo permiten una gran facilidad de modificación de la geometría a gran alcance, incluyendo conexiones bidireccionales superiores a la de los sistemas CAD (Ansys CFX 17.2, 2017) .

4.5.1. Etapas de procesamiento

4.5.1.1. Pre- procesamiento

Permite:

- Crear geometría

- Generar mallas en toda la geometría
- Identificar claramente el fenómeno físico y la propiedad del fluido a simular.
- Configurar condiciones iniciales y la condición de borde compatible para la simulación numérica
- Elegir el modelo de turbulencia, tiempo de simulación y configuración de los resultados requeridos.

4.5.1.2. Procesamiento

Permite:

- Ejecutar la simulación y esperar que el programa resuelva las ecuaciones que describen iterativamente el fenómeno físico.
- Dependiendo de los modelos a resolver, del tamaño del mallado y de los ordenadores utilizados para la simulación, estos cálculos pueden durar desde minutos hasta varias semanas.

4.5.1.3. Post – procesamiento

Permite:

- Analizar los resultados de los cálculos del solucionador. Los análisis proporcionados por el programa ANSYS se pueden llevar a cabo utilizando textos, gráficas de las variables del fluido unidimensional, bidimensional y tridimensional, dibujos vectoriales, animaciones, etc.

4.6. Ventajas de CFD

En las últimas décadas, CFD ha enriquecido el proceso de diseño al permitir a los ingenieros simular el funcionamiento de configuraciones alternativas, descartando conjeturas que se usan comúnmente para determinar la geometría del equipo y las condiciones del proceso. El uso de esta herramienta proporciona las mejores soluciones para problemas geométricos de alta complejidad y condiciones de contorno. Además, es muy interesante para la industria y la investigación, se tiene muchas virtudes como las siguientes (Park, 2009) :

- La mayoría de los códigos CFD tienen la capacidad de realizar cálculos en paralelo, de modo que los problemas se puedan realizar en tiempos cortos, dividiendo así los cálculos y la memoria necesaria entre varios equipos. Las simulaciones son relativamente económicas y a medida que las computadoras se vuelven más rápidas, el costo tiende a disminuir.

- La metodología CFD ofrece la posibilidad de estudiar los sistemas físicos de fluidos. En comparación con los procedimientos experimentales, CFD proporciona una gran cantidad de datos, tiene mayores beneficios, flexibilidad y velocidad. En el caso que se realice modelación numérica en flujos unidimensionales, flujos subcríticos y sin presencia de sedimentos, los métodos numéricos llevan una gran ventaja cuando la estructura no es compleja.
- Esta herramienta tiene la capacidad para simular teóricamente cualquier condición física, pero cuando hay presencia de flujo tridimensional, flujo supercrítico ó flujo tridimensional y con sedimentos la modelación numérica se vuelve más compleja que el método experimental. La modelación física es más sencilla que la modelación numérica.
- Proporciona una amplia variedad de información debido a que permite investigar una gran cantidad de lugares en el área de interés. De lo contrario, solo se puede extraer una cantidad limitada de datos en la región de interés en ensayos experimentales.
- En cuanto a la fiabilidad de CFD, los resultados obtenidos pueden verificarse mediante pruebas experimentales, gráficos numéricos y métodos en los que está basado. Se han producido mejoras rápidas, por esta razón, los resultados son cada vez más confiables.

4.7. Limitaciones de CFD

- Aunque CFD tiene considerables ventajas y aplicaciones, tiene algunas restricciones. Algunas de estas son (Bakker, 2002):
- Las soluciones se basan en modelos físicos de procesos del mundo real, como turbulencias, reacciones químicas, flujo multifásico, etc. Los resultados que proporciona solo pueden ser tan precisos como los modelos físicos en lo que se basan.
- La resolución de ecuaciones por computadora siempre causará errores numéricos. Pueden ocurrir errores de redondeo o truncamiento, este último causado por las aproximaciones de los modelos matemáticos.
- No siempre es posible conseguir resultados suficientemente precisos. La precisión de los resultados depende en gran dimensión de las condiciones iniciales y límites esperados en el modelo matemáticos.

4.8. Aplicaciones de CFD

CFD se puede utilizar en diversas aplicaciones industrial y no industrial. Su aplicación primordial es proporcionar un método de ingeniería de datos para resolver problemas

concretos en el mundo físico. Existen muchos tipos de aplicaciones, como se describe continuación(Bakker, 2002):

- En la industria de procesos químicos. Es provechoso para diseñar equipos que ayudan a estudiar el flujo, y el rendimiento de equipos de procesos de producción: tanque agitador, reactores de lecho fluidizado, separadores, sistemas de combustión, intercambiadores de calor, polímeros y procesamiento de materiales y equipos de manipulación.
- Diseño aerodinámico eficiente para vehículos terrestres, aviones y misiles.
- La ingeniería biomédica es un campo de rápido desarrollo que utiliza CFD para investigar los sistemas circulatorios, respiratorios, y el flujo sanguíneo en arterias y las venas.
- Utilizado para estudiar el flujo y la transferencia de calor en los sistemas de generación de energía como calderas, equipos de combustión, bombas, ventiladores, tuberías, etc.
- Con respecto a arquitectura, como la simulación del aire interior y exterior (alrededor del edificio), condiciones ambientales, ventilación, calefacción, flujos de refrigeración en el edificio y la carga del viento.
- En la industria de semiconductores, en equipos de refrigeración, incluidos los microcircuitos. Los resultados que proporcione pueden ayudar en gran medida a reducir la cantidad de experimentos necesarios para diseñar distintos equipos de fabricación de chips. Algunas industrias de semiconductores han comenzado a utilizar esta herramienta para ayudar a sus ingenieros de diseño.
- Utilizado para diseño relacionado con turbomáquinas como difusores, compresores y turbinas.

Capítulo 5

Simulación numérica del desarenador con presencia de rejillas

El presente capítulo desarrolla la simulación numérica tridimensional del cuerpo del fluido del desarenador de la central hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz con la ayuda del programa Ansys CFX. El modelo numérico se realiza con las dimensiones del prototipo del desarenador construido por la compañía británica *Beatty Engineering* en 1985 (Universidad de Piura, 1994).

Con el uso de este programa se busca tener como resultados los valores de velocidades de flujo y el patrón del flujo para posteriormente verificar los principios de funcionamiento hidráulico en el desarenador.

La modelación numérica desarrolla un proceso de tres pasos, primero el pre-procesamiento en donde se requiere disponer de la geometría del desarenador, generación del mallado y el ingreso de datos, segundo la solución en la cual se genera el análisis del sistema y por último el post- procesamiento que permite la visualización de gráficos interactivos para la interpretación de los resultados.

5.1. Creación de la geometría

Para empezar con el primer paso, es necesario tener los datos necesarios para facilitar la creación de la geometría del desarenador de la CHMAQ.

Desde la Figura 29 hasta la Figura 33, se muestran los planos de interés de estudio realizados en el 2001 por la empresa Cesar Wiese y Cia S.R. Ltda., encargada de la construcción de las obras civiles para el mejoramiento de la CHMAQ además se ha usado un plano del informe final de 1994 realizado por la Universidad de Piura, encargada de la investigación en modelo hidráulico del desarenador para la C.H en el río Quiroz. Los planos anteriormente mencionados fueron revisados y digitalizados en el programa AutoCAD para facilitar su uso durante el manejo del programa ANSYS CFX.

lugar donde se realizan los dibujos, los cuales son las representaciones planas de los cuerpos geométricos o sólidos a los cuales se les aplica las transformaciones de *extrude*, *revolve*, *sweep*, etc para llevar a cabo el segundo espacio mencionado.

En la Figura 34 se puede observar el espacio de trabajo o *sketching*, el cual muestra las tres mencionadas anteriormente: la caja de herramientas (*sketching toolbox*), espacio donde están todos los elementos necesarios para crear los sketches; la vista de detalles (*details view*), zona donde se aprecia los detalles, dimensiones y bordes del sketch creado; y el gráfico (*graphics*), que es el espacio donde se realizan los sketches.

En esta misma Figura 34, se observa el inicio de la creación del desarenador generando un cuadrado de 2.79m base y 1.8m de altura.

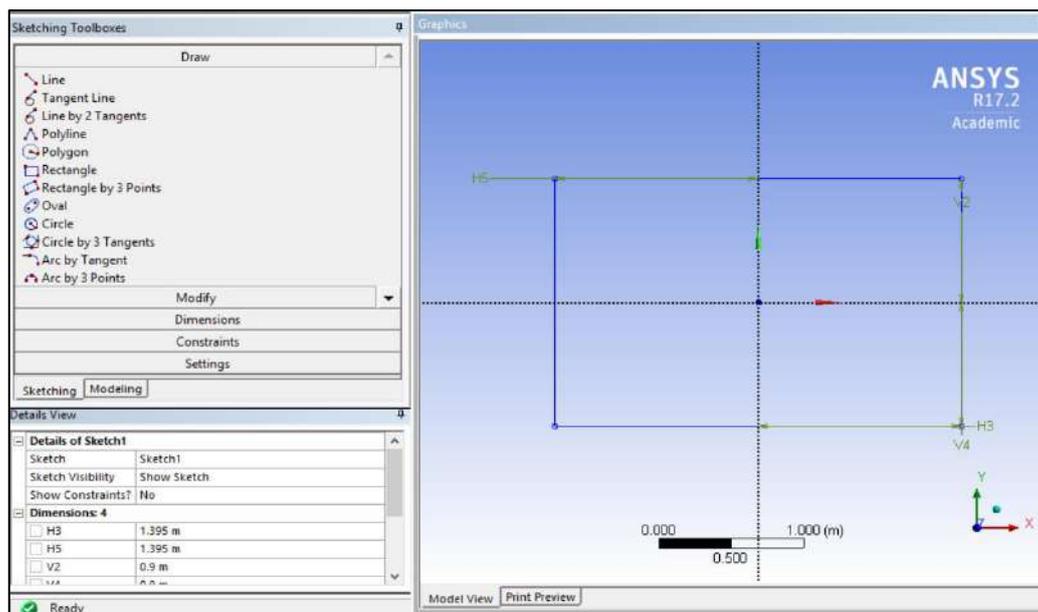


Figura 34. Distribución del espacio de trabajo del sketching.

Fuente: Elaboración propia

El *modeling*, está dividido en tres regiones: el esquema (*tree outline*), espacio de trabajo donde se presentan los planos y cuerpos desde el momento que son generados los sketches además coinciden con la secuencia lógica de los pasos de simulación; la vista de detalles (*details view*) y el gráfico (*graphics*), los cuales tienen las mismas propiedades mencionadas anteriormente.

En la Figura 35 se puede observar uno de los primeros pasos de la creación de la geometría de la nave del desarenador, una de las herramientas usadas son: *extrude*, *slice* y *facesplit*, el cual permite generar un cuerpo sólido y con ayuda de los planos de referencia se van realizando cortes con divisiones de caras para seguir generando un cuerpo a continuación del otro.

En el espacio de trabajo inicialmente se generó un cubo con una base de 2.79m x1.8m Figura 36, luego se han ido añadiendo más sketches en el esquema y creando solidos como se muestra en la Figura 37 hasta tener concluido el cuerpo del fluido a analizar.

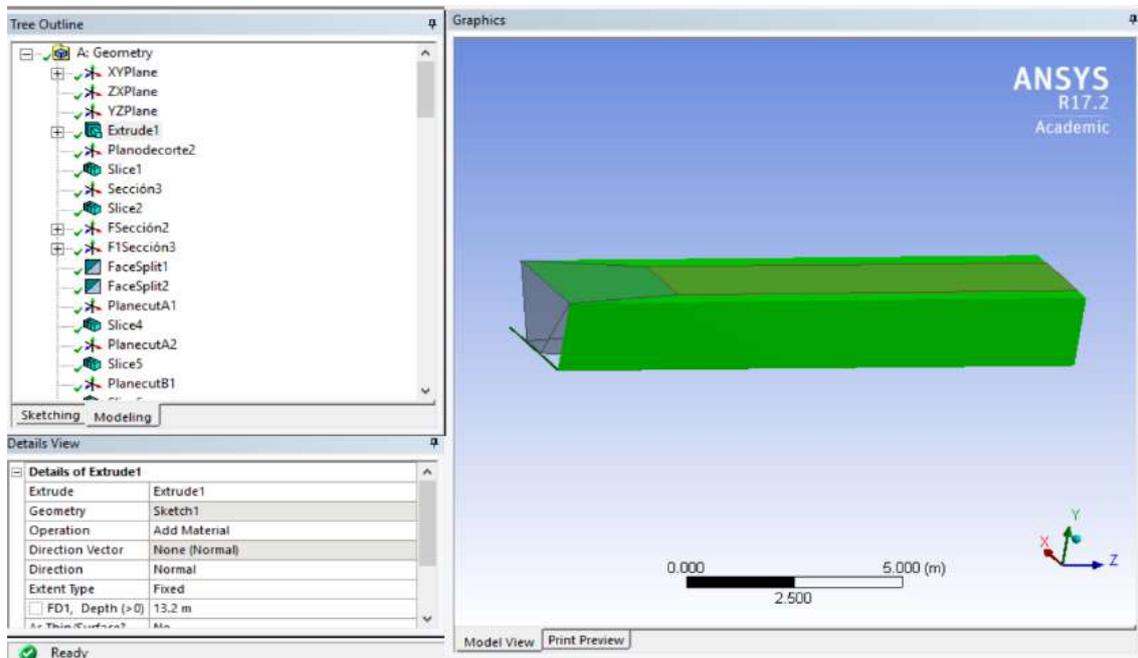


Figura 35. Distribución del espacio de trabajo.

Fuente: Elaboración propia

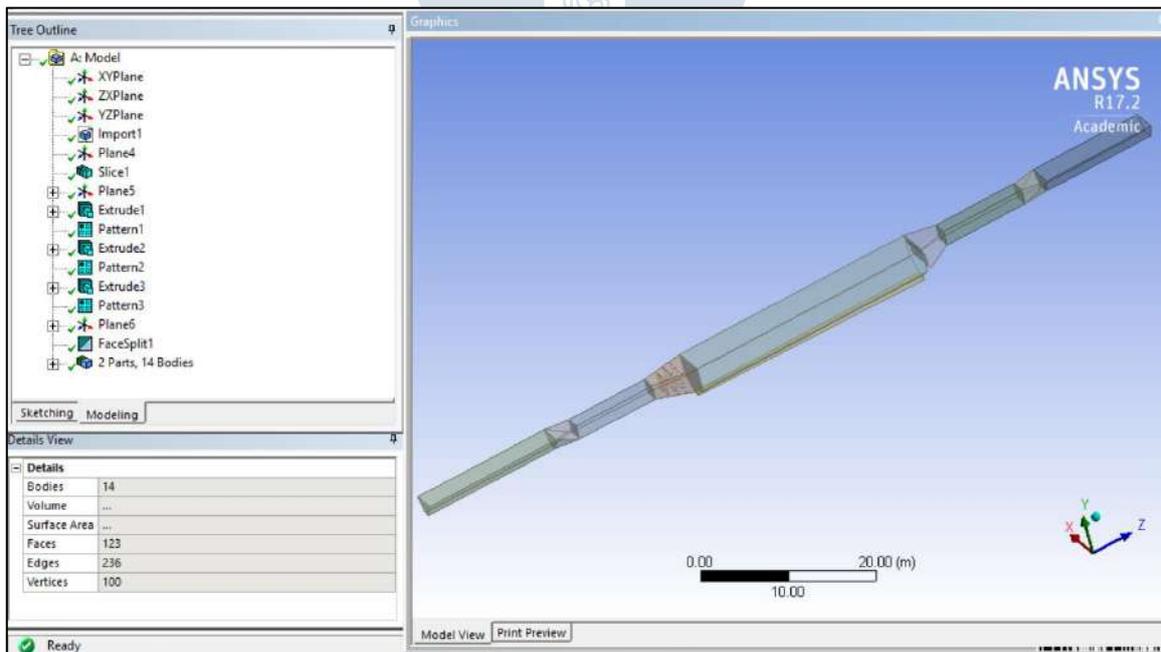


Figura 36. Distribución del espacio de trabajo del modeling.

Fuente: Elaboración propia

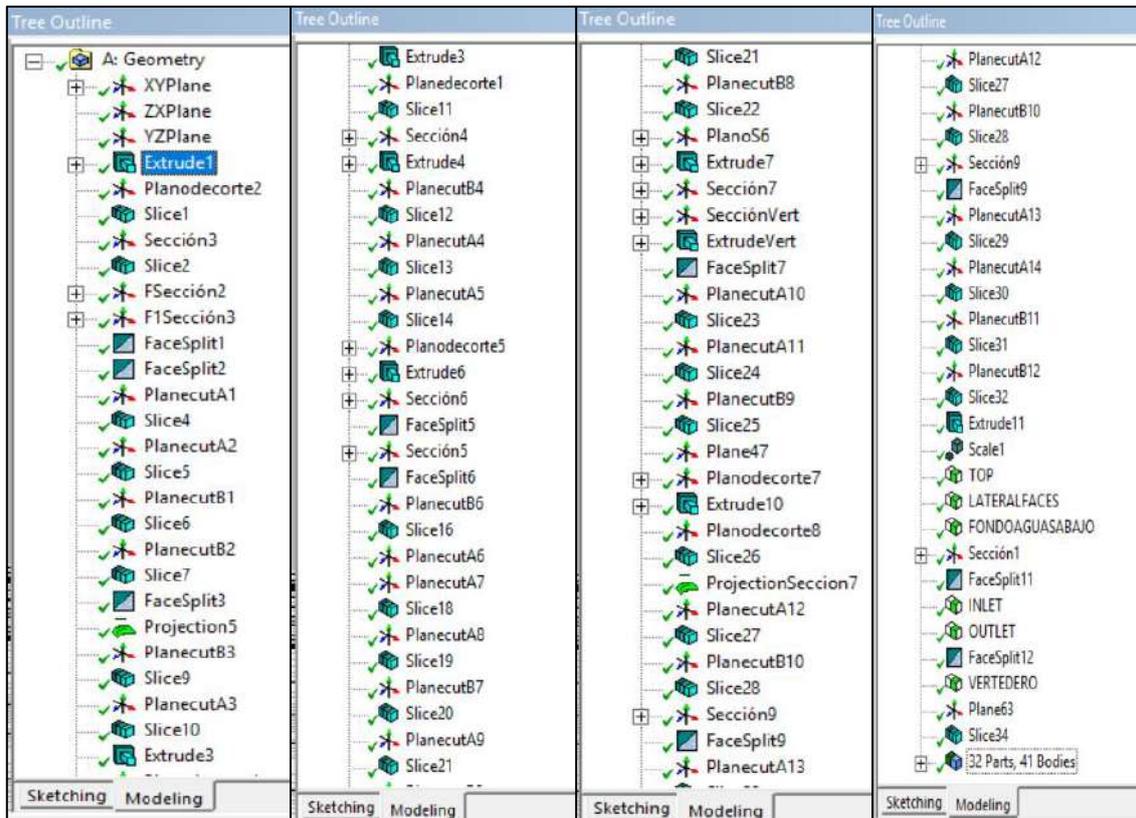


Figura 37. Detalle de la creación de la geometría de la nave del desarenador.

Fuente: Elaboración propia

Condición de compuertas abiertas

La geometría creada pretende representar la compuerta de entrada y de salida completamente abierta, es decir, se considera un canal totalmente abierto. Ver Figura 38, Figura 39 y Figura 40.

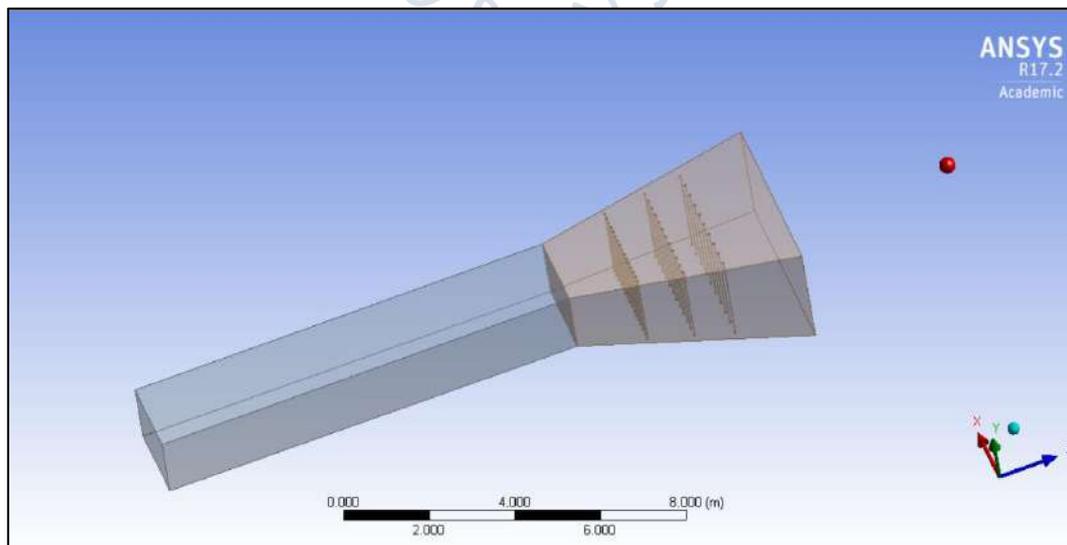


Figura 38. Geometría de la entrada de transición y presencia de rejillas. Sin compuerta de entrada.

Fuente: Elaboración propia

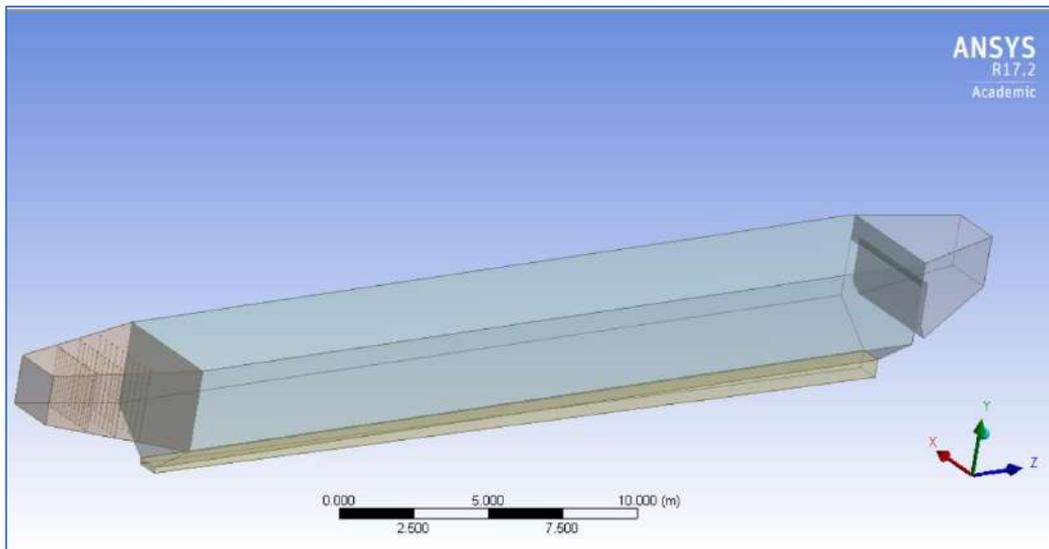


Figura 39. Geometría de la nave del desarenador y vertedero. Sin compuerta de salida.
Fuente: Elaboración propia

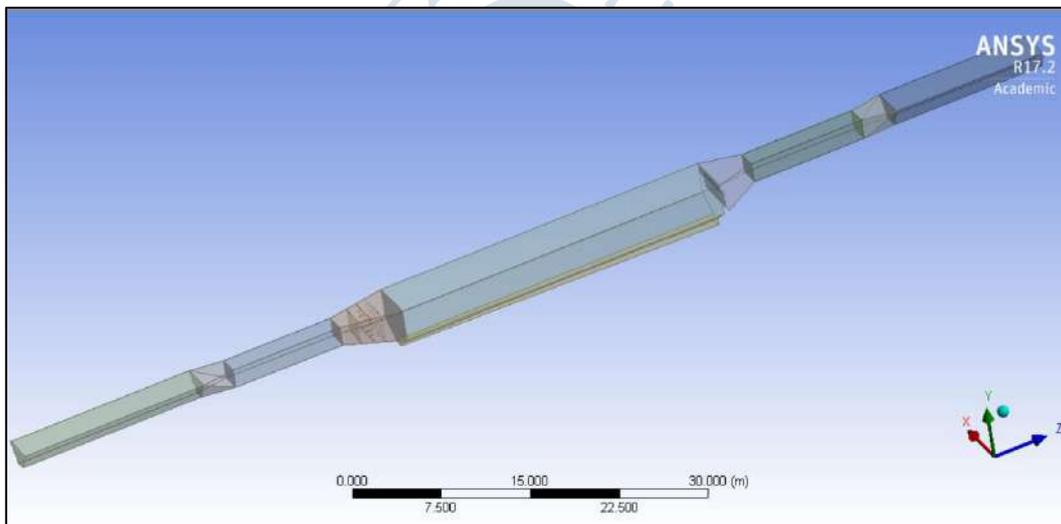


Figura 40. Geometría de todo el desarenador. Sin compuertas.
Fuente: Elaboración propia

5.2. Mallado del dominio de estudio

En CFX Pre- procesamiento se realiza el ingreso de información fundamental para el análisis, esto se hará a través de la herramienta del *software Setup*. En esta herramienta se definen los parámetros tanto de la estructura física del modelo hidráulico como de los fluidos. Es en *Setup*, donde se modifican distintas variables tales como: los dominios, interfaces, parámetros de solución y expresiones, además se establecen valores iniciales, condiciones de borde, materiales a utilizar, la física del flujo, tipo de análisis, el control de la simulación, entre otros.

Setup se divide en dos espacios de trabajo: el esquema (*outline*) en el cual se pueden aplicar las configuraciones de la estructura a analizar y la zona del gráfico (*view*) se observa la

ejecución de las configuraciones o también puede mostrar avisos de alerta por posibles errores o falta de información que impedirá continuar con los siguientes pasos previos a la simulación.

5.2.1. Creación del dominio

CFX-Pre utiliza el concepto de dominio para definir el tipo, las propiedades y la región del fluido o sólido. Los dominios son regiones de espacio en las que se resuelven las ecuaciones de flujo o la transferencia de calor, según sea el caso.

En la Figura 41, se describen las condiciones de borde de cada dominio y las interfaces de dominio.

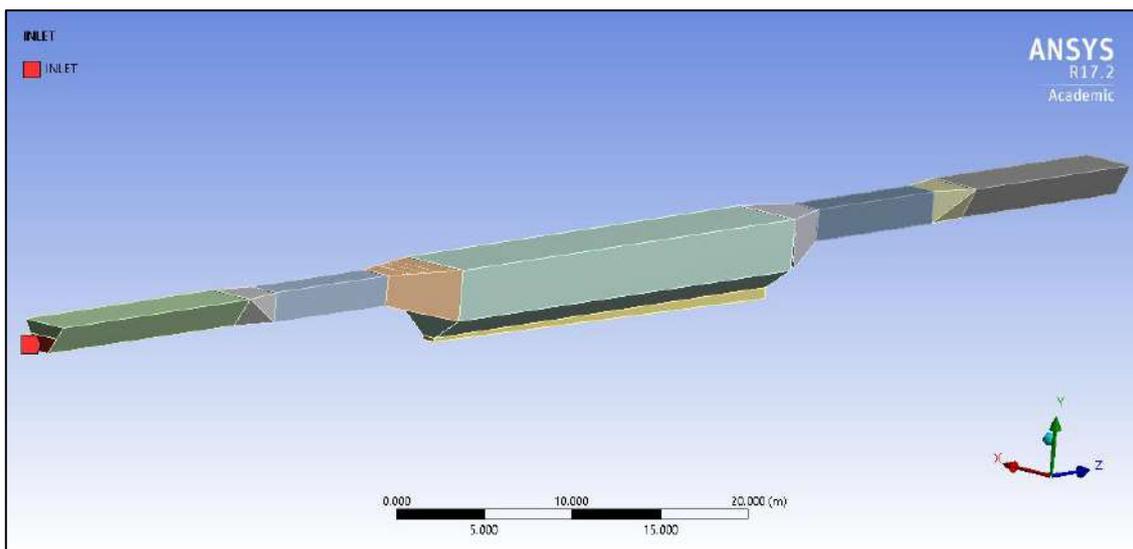


Figura 41. Zona de interés: inlet o entrada de agua.
Fuente: Elaboración propia

El valor de área transversal en la entrada de la superficie es de 1.33m^2 para el tirante de agua de 0.96 m. Mediante la siguiente ecuación (5.1) se hallará la velocidad de ingreso:

$$Q = V.A \quad (5.1)$$

Donde:

Q = Caudal del canal

V = Velocidad del cuerpo de agua

A = Área de la sección transversal

En la Figura 42 se muestra la superficie de frontera top, zona designada como superficie libre y en la cual el programa Ansys CFX simulará el comportamiento del fluido y su interacción con el aire.

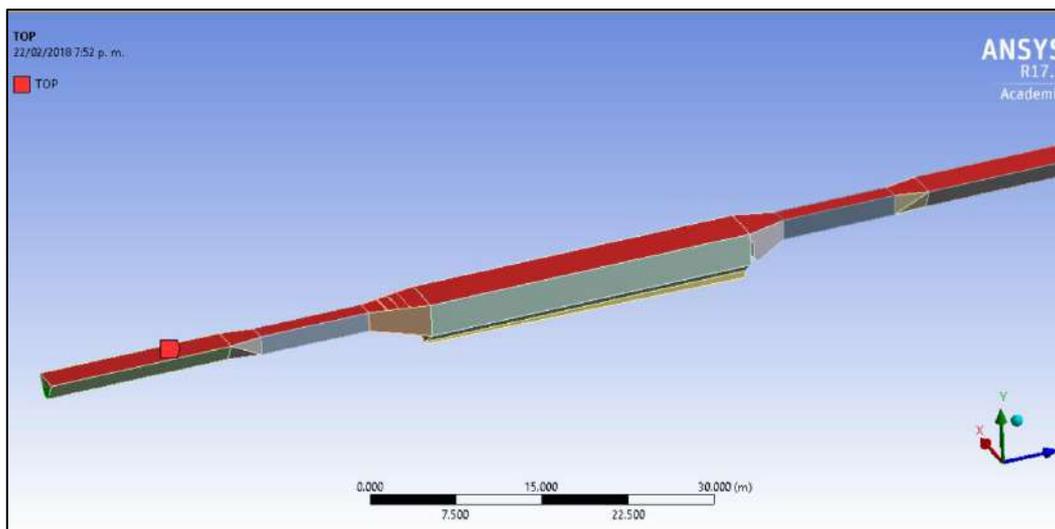


Figura 42. Superficie de frontera (top)
Fuente: Elaboración Propia

De igual manera, en la Figura 43 se muestra la superficie de frontera de la salida del fluido *outlet*.

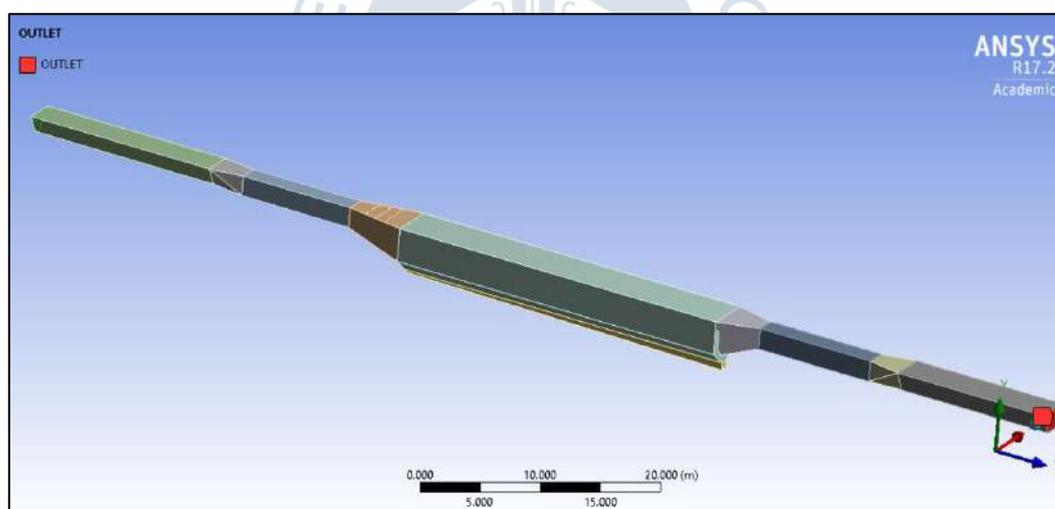


Figura 43. Superficie de frontera de salida (outlet).
Fuente: Elaboración Propia

5.2.2. Parámetros iniciales, físicos y numéricos de la modelación en Ansys CFX

Ansys CFX brinda la posibilidad de utilizar diferentes tipos de elementos para desarrollar el mallado del dominio del fluido. De esta manera, puede adaptar la malla a cualquier contorno de los sólidos que restringen el dominio fluido. En la Figura 44 se muestran las configuraciones realizadas en la generación del mallado sobre la geometría a analizar.

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Body Color
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	100
Shape Checking	CFD
Target Skewness	Program Controlled
Element Midside Nodes	Dropped
[-] Sizing	
Size Function	Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (12.0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (5)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (9.7114e-003 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (9.7114e-003 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	0.250 m
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	Default (1.94230 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.10)
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (4.8557e-003 m)
Minimum Edge Length	8.3548e-005 m
[-] Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0.77
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
[-] Advanced	
[-] Statistics	

Figura 44. Detalle de la malla en Ansys CFX.
Fuente: Elaboración propia

Ansys integra un módulo de mallado semiautomático especial (llamado CFX- Mesh) para el campo de la dinámica de fluidos computacional, que puede generar rápidamente una malla híbrida de prismas y tetraedros.

Para generar el mallado se ha usado la opción Worksheet y se ha seleccionado cada sólido por separado, para finalmente utilizar herramientas de refinamiento en zonas que podrían causar posibles errores en el momento de la simulación. Dichas zonas de dificultad en la simulación son mayormente las curvaturas, como se puede visualizar en la Figura 45.

La característica principal que distingue diferentes elementos es la cantidad de nodos utilizados para resolver las ecuaciones en el volumen de control. Mientras mayor sea el número de nodos por elemento, más específica será la resolución interna. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los nodos obtenidos en el mallado del desarenador.

En la Figura 46, se observa que se ha usado la aplicación *Edge Sizing*, el cual divide los bordes de los cuerpos en el número y tamaño de celda que se requiera. La aplicación *face meshing* permite generar una malla libre o mapeada en las caras seleccionadas. La aplicación de mallado determina automáticamente un número adecuado de divisiones para los bordes de

la superficie límite. Se especifica el número de divisiones en el borde con un control de tamaño, la aplicación de malla intenta hacer cumplir esas divisiones (Ansys CFX 17.2, 2017).

Para refinar la malla computacional, en sectores donde se necesite mejorar la precisión de los resultados, se permite usar más de un método por elemento.

El resultado de aplicar todas estas propiedades a la generación de la malla computacional se puede visualizar en la Figura 47.

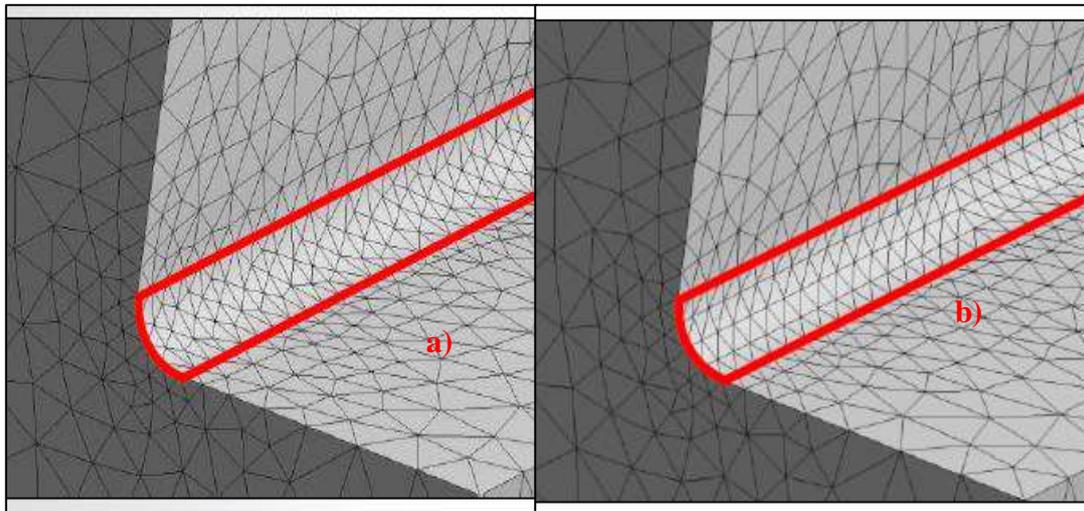


Figura 45. Refinamiento de la malla computacional. a) Sin usar herramienta face meshing
b) Usando herramienta face meshing.

Fuente: (Ansys CFX 17.2, 2017)

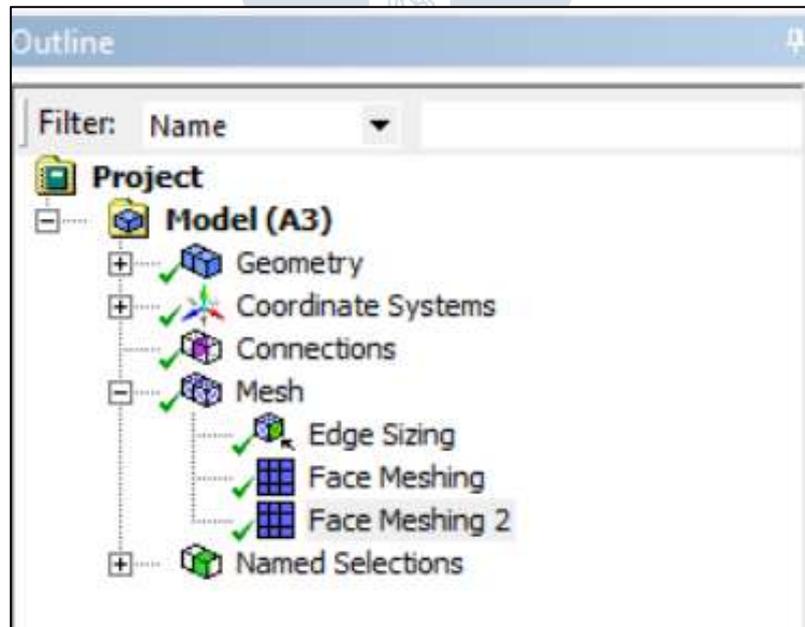


Figura 46. Herramientas usadas para la creación de la malla mixta.

Fuente: Elaboración propia

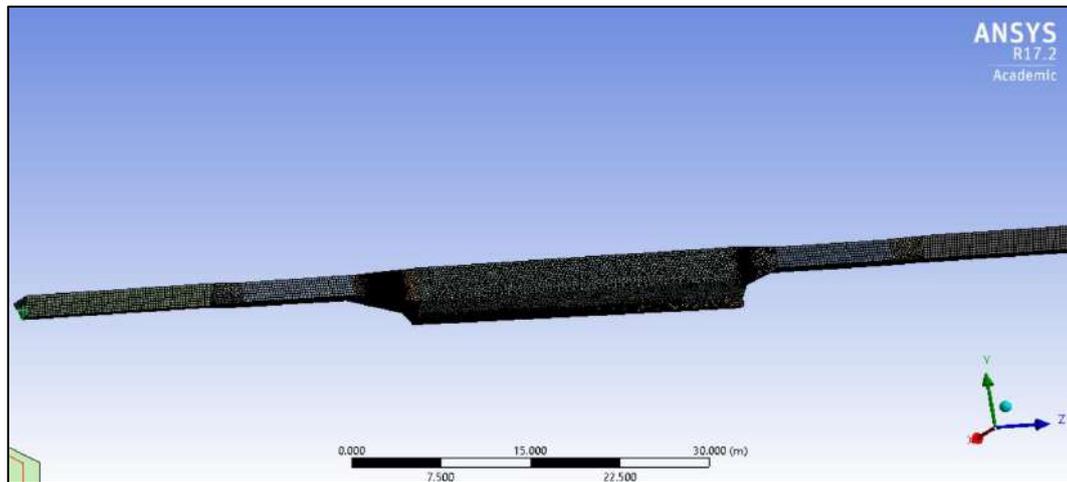


Figura 47. Malla estructurada del desarenador.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Número de nodos y elementos del mallado realizado.

Resultado del análisis del desarenador con rejillas	Unidades
Número de nodos	744898
Número de elementos	4065099

Fuente: Elaboración propia

Algunas variables son predeterminadas por el programa, se muestran en la Tabla 5 las consideraciones que se modifican al momento de configurar dichos dominios.

Tabla 5. Resumen de parámetros para configuración del dominio.

Características	Descripción
Tipo de análisis	<i>Steady State</i>
Tipo de fluido	Agua: Incompresible, continuo, newtoniano Aire: Compresible, continuo, newtoniano
Tipo de flujo	Turbulento
Tipo de régimen	Estacionario
Tipo de dominio	Dominio Fluido
Modelo multifásico	Homogéneo
Tipo de modelo de turbulencia	<i>k-Epsilon</i>
Modelo de flotabilidad	Sí
Fuerza gravitacional	Sí
Densidad de referencia para flotabilidad	1.2kg/m ³
Presión de referencia	1 atm
Coefficiente de tensión superficial	0.072N m ⁻¹
Modelo de tensión superficial	Superficie continua
Flujo primario	Agua
Transferencia de interfaces	Superficie libre
Transferencia de masa	No
Transferencia de calor	No
Método de resolución	Método de volúmenes finitos

Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Parámetros de calidad

La precisión de los resultados y el tiempo necesario para obtener la solución depende en gran medida de la malla computacional. En otras palabras, el uso de una malla refinada pobremente con un paso del tiempo relativamente bajo obtendrá resultados en poco tiempo, pero no muy confiables, mientras que, el uso de una malla computacional demasiado refinada con un paso de tiempo muy cortos, obtendrá resultados bastantes precisos, pero el tiempo de simulación es demasiado largo y el coste computacional es alto, lo que puede ser excesivo para los resultados de ingeniería.

Por las razones anteriores, es necesario cumplir con ciertos parámetros de calidad, siendo los más significativos:

- Calidad del elemento
- Aspecto del elemento
- Ortogonalidad
- Oblicuidad

5.2.3.1. Calidad del elemento

El rango de valores de este parámetro es de 0 a 1. Se recomienda que el valor este cerca de 1, debido a que la unidad representa un cubo o cuadrado perfecto.

En la Figura 48, la calidad de elementos es de 0.8398 en promedio, lo que se considera aceptable.

La Figura 49 muestra la cantidad de elementos creados y su métrica correspondiente. Los elementos tetraédricos se visualizan de tono rojo y los elementos hexaédricos de tono azul, pocos visibles (mínimo) a causa de su pequeño número.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	744898
<input type="checkbox"/> Elements	4065099
Mesh Metric	Element Quality ▼
<input type="checkbox"/> Min	3.4121e-002
<input type="checkbox"/> Max	0.99999
<input type="checkbox"/> Average	0.8398
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	9.68e-002

Figura 48. Estadística de la calidad del elemento.
Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

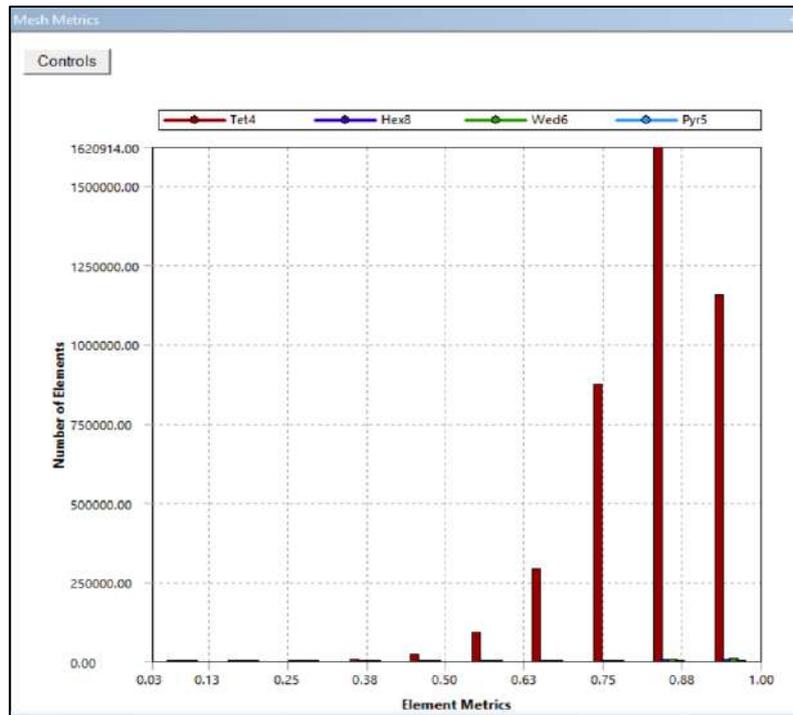


Figura 49. Gráfica de barras correspondiente a la calidad del elemento.
Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

5.2.3.2. Aspecto del elemento

Según la Figura 51, la mejor relación de aspecto es la que tiende a la unidad. Sin embargo, se acepta y recomienda que no exceder el valor 3.

Ansys CFX brinda la posibilidad de utilizar diferentes tipos de elementos para analizar mallas de dominio del fluido. De esta manera, puede adaptar la malla computacional a cualquier contorno de los sólidos que limitan el dominio del fluido. Ver Figura 50.

El *Aspect Ratio* promedio es de 1.8365, está dentro del rango permitido, por esta razón es aceptable. Ver Figura 51.

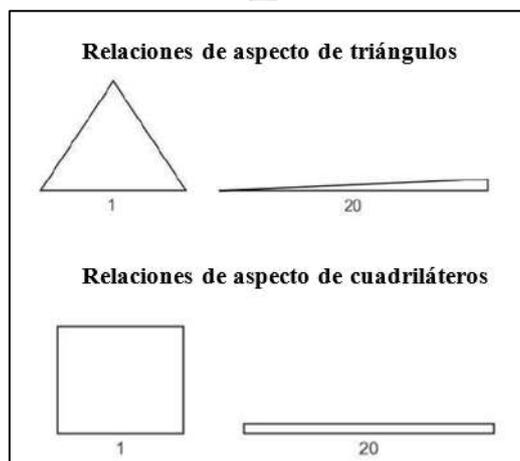


Figura 50. Relación de aspecto en triángulos y cuadriláteros.
Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	744898
<input type="checkbox"/> Elements	4065099
Mesh Metric	Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1.0909
<input type="checkbox"/> Max	84.881
<input type="checkbox"/> Average	1.8365
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.49148

Figura 51. Estadísticas del aspecto del elemento-
Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

La Figura 52 muestra la cantidad de elementos creados y su métrica correspondiente. Los elementos tetraédricos se visualizan de tono rojo y elementos hexaédricos de tono azul, pocos visibles (mínimo) a causa de su poca cantidad de estos.

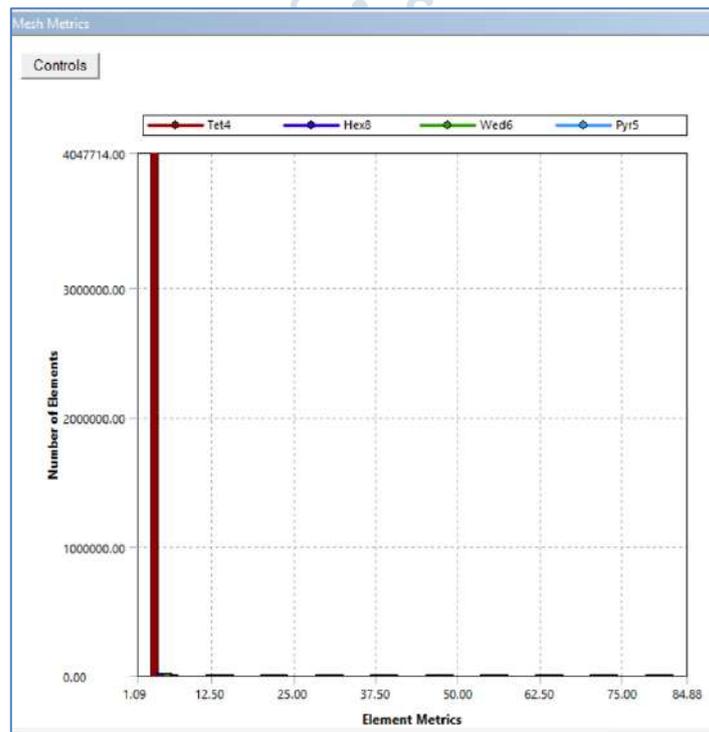


Figura 52. Gráfica de barras correspondiente al aspecto de radio del elemento.
Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

5.2.3.3. Ortogonalidad

El rango de ortogonalidad varía de 0 a 1, se recomienda que el valor sea cercano a 1, lo que significa que los ángulos en las celdas se inclinen a 90 grados, lo cual es útil para el cálculo del programa.

Los rangos de ortogonalidad se pueden observar en la Tabla 6 :

Tabla 6. Rango de valores de ortogonalidad para definir la calidad del mallado.

No aceptable	Malo	Aceptable	Buena	Muy buena	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.7-0.95	0.95-1.00

Fuente: (Ansys CFX 17.2, 2017)

En la Figura 53 se puede observar que el valor promedio de la ortogonalidad es de 0.86, está en el rango muy bueno, por lo tanto, es aceptable.

Con un mayor refinamiento de mallado en la geometría podría generarse un valor más cercano a la unidad.

Statistics	
<input checked="" type="checkbox"/> Nodes	744898
<input type="checkbox"/> Elements	4065099
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	3.5959e-002
<input type="checkbox"/> Max	0.99885
<input type="checkbox"/> Average	0.8623
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	8.4844e-002

Figura 53. Estadística de la ortogonalidad del elemento.

Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

La Figura 54 muestra la cantidad de elementos creados y su métrica correspondiente. Los elementos en su mayoría tetraédricos son representados con barras de color rojo y los elementos de hexaédricos de color azul (en menor cantidad).

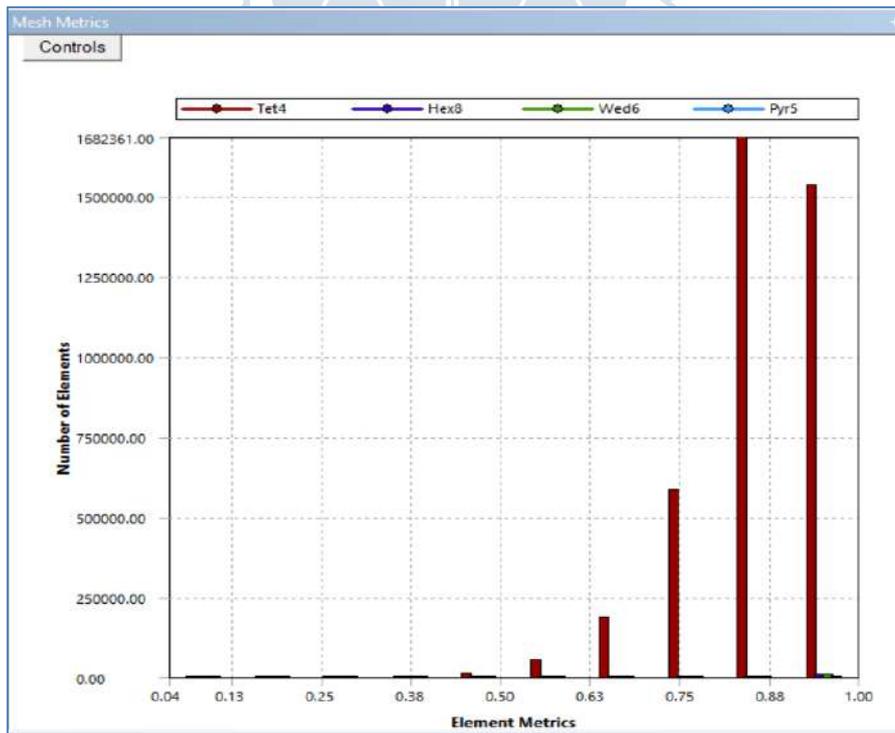


Figura 54. Gráfica de barras correspondiente a la ortogonalidad del elemento.

Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

5.2.3.4. Oblicuidad

Esta es una de las principales características de calidad que se debe cumplir a la hora de generar el mallado computacional. Le permite ver la información de la métrica de malla para determinar la calidad de la malla.

Para conocer los rangos de la oblicuidad, se puede visualizar la Tabla 7:

Tabla 7. Rango de valores de oblicuidad para definir la calidad del mallado.

Equilátero	Excelente	Bueno	Equitativo	Pobre	Malo	Degenerado
0	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-0.90	0.9-<1	1

Fuente: (Ansys CFX 17.2, 2017)

Una vez que se haya generado la malla, puede elegir la información sobre cualquiera de las siguientes métricas de mallado. En este caso se ha usado *Skewness*, el cual permite ver la información de la métrica del mallado y evaluar la calidad, como se observa en la Figura 55.

La calidad de elementos observada en la Figura 55 promedió 0.22566, este se considera excelente.



Advanced	
Statistics	
Nodes	744898
Elements	4065099
Mesh Metric	Skewness
Min	1.1191e-005
Max	0.99987
Average	0.22566
Standard Deviation	0.12135

Figura 55. Estadística de oblicuidad del elemento.
Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

La Figura 56 muestra el número de elementos creados y su métrica correspondiente. Los elementos tetraédricos son representados con barras de tono rojo y los elementos de hexaédricos de tono azul (en menor cantidad).

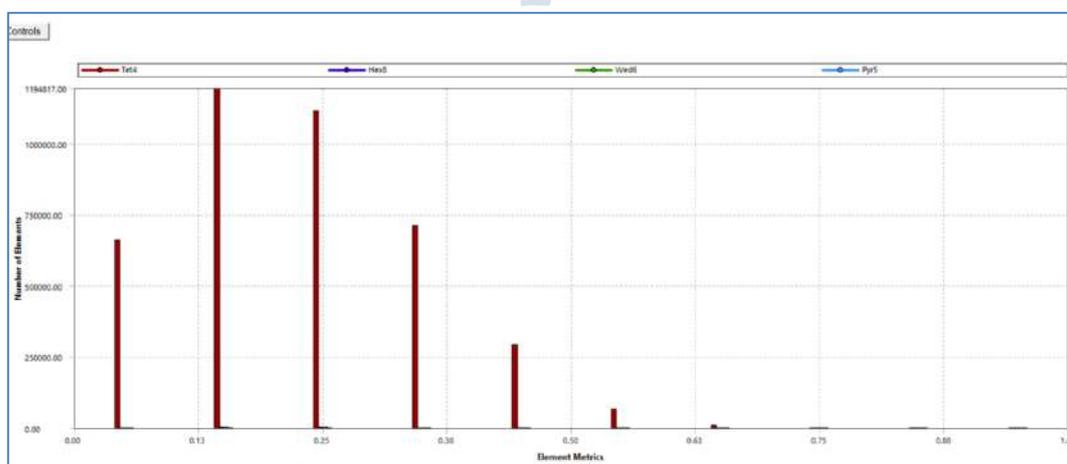


Figura 56. Gráfica de barras correspondiente a la oblicuidad del elemento.
Fuente: Elaboración propia. Ansys CFX

Se obtiene un mallado en todo el dominio utilizando elementos hexaédricos, tetraédricos y piramidales en un total de 4065099. Las estadísticas del mallado muestran que para el dominio de estudio los parámetros de calidad del mallado son buenos.

5.3. Calibración del desarenador en el modelo numérico

En la Figura 57, Figura 58, Figura 59 e Figura 60 se puede observar las propiedades de los fluidos de estudio, en este caso del aire y del agua. Mientras que en la Figura 61, Figura 62, Figura 63 y Figura 64 se ha aplicado estas características para la correspondiente configuración del dominio y de la interface.

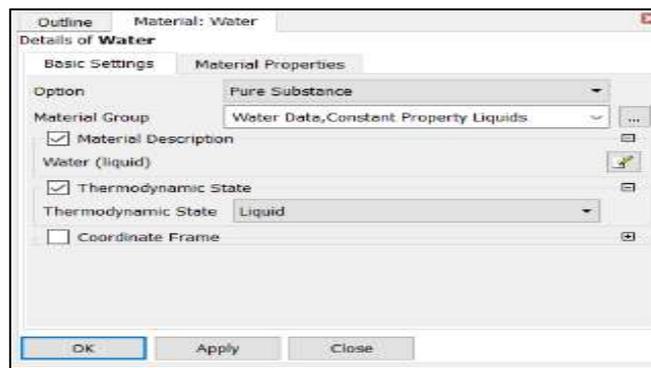


Figura 57. Configuración básica de las propiedades del fluido de trabajo (agua).
Fuente: Elaboración propia

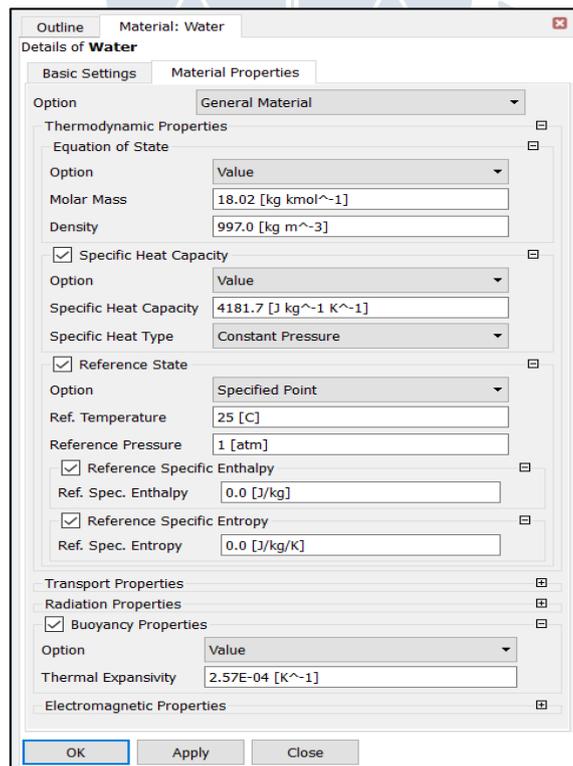


Figura 58. Configuración básica de las propiedades del fluido de trabajo (agua).
Fuente: Elaboración propia

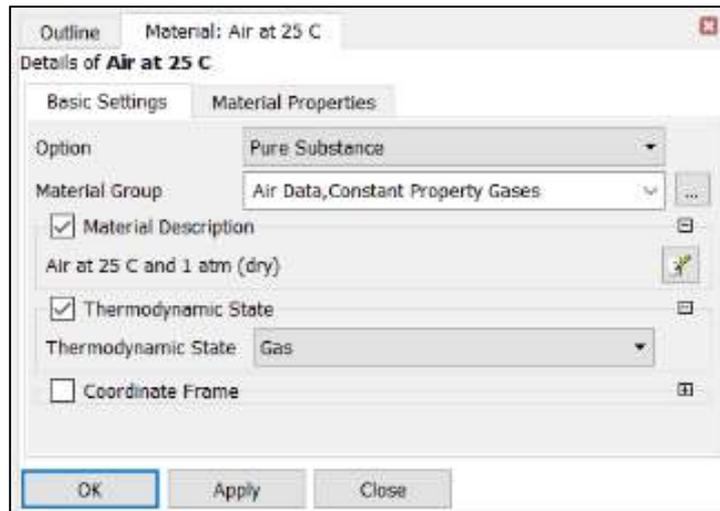


Figura 59. Configuración básica de las propiedades del fluido de trabajo (aire).
Fuente: Elaboración propia

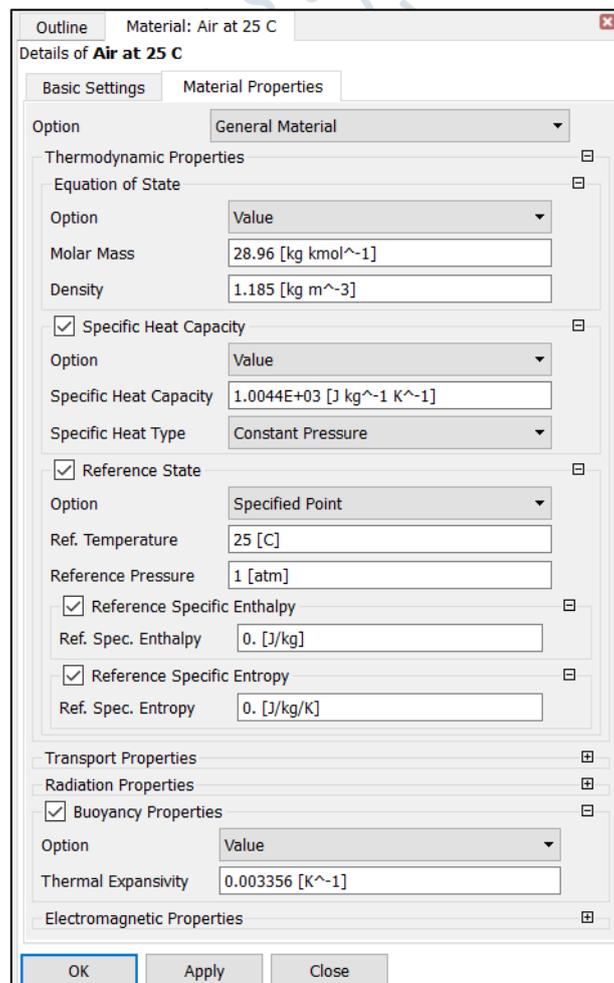


Figura 60. Configuración básica de las propiedades del fluido de trabajo (aire).
Fuente: Elaboración propia

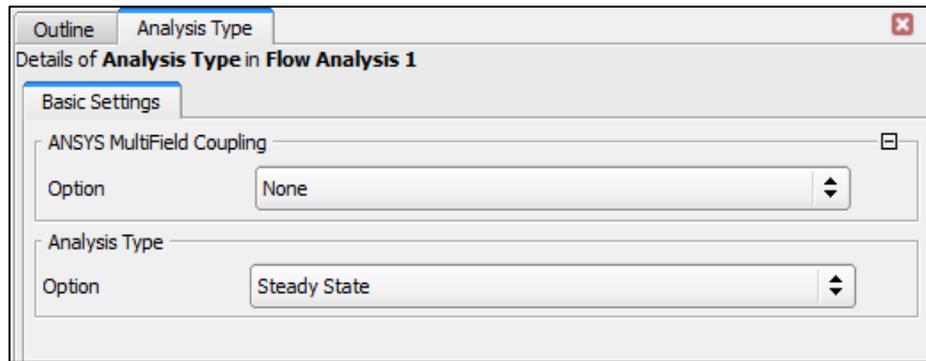


Figura 61. Tipo de análisis del fluido de trabajo.
Fuente: Elaboración propia

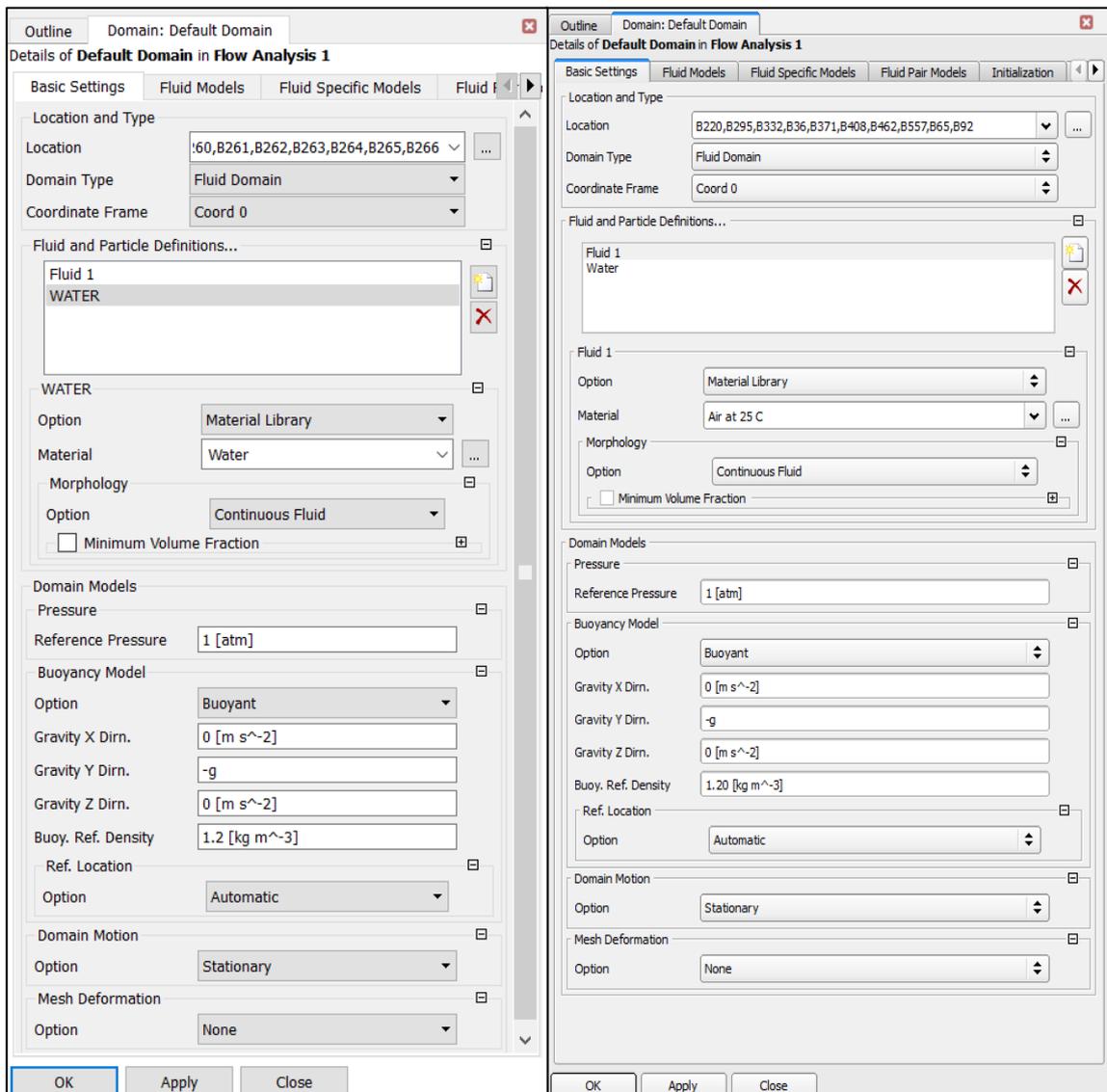


Figura 62 Configuración básica del dominio, característica de los fluidos, presión, flotabilidad y densidad de referencia.

Fuente: Elaboración propia

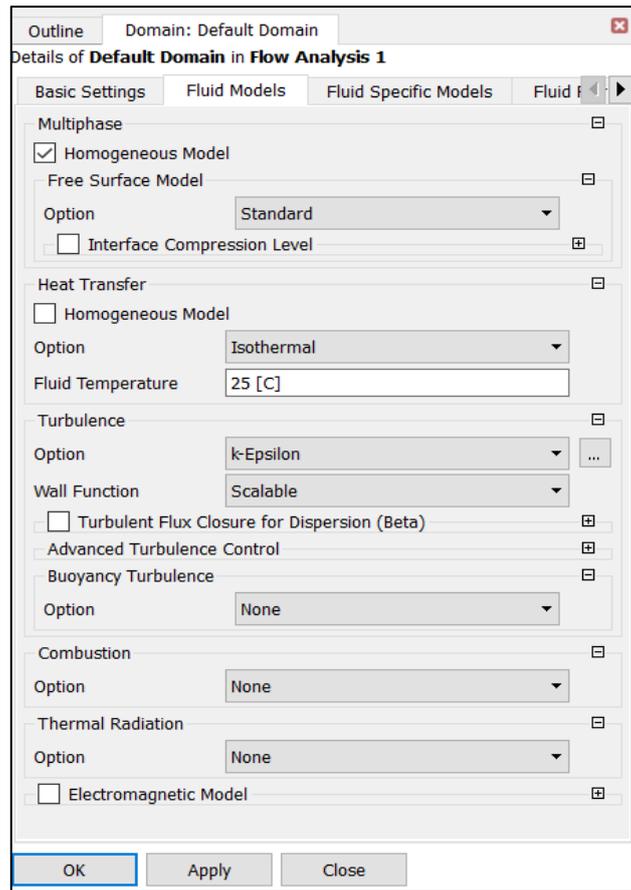


Figura 63. Configuración de modelo multifásico y modelo de turbulencia.
Fuente: Elaboración propia

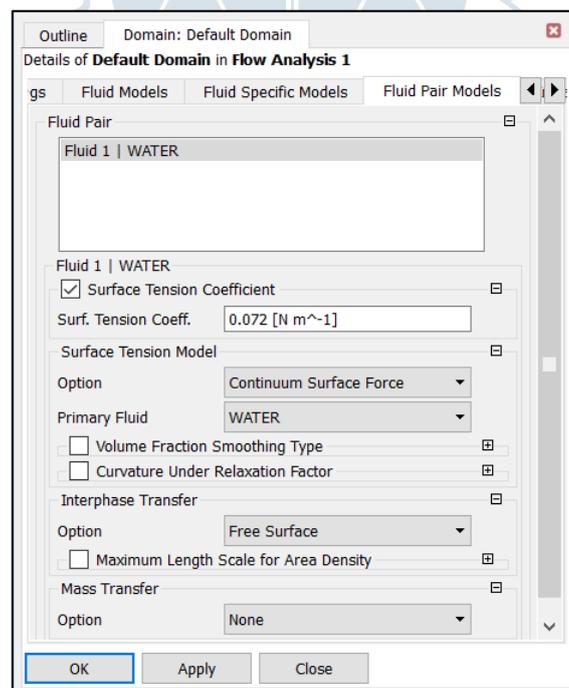


Figura 64. Configuración de interacción entre fluidos
Fuente: Elaboración propia

5.3.1. Condiciones de borde

Las condiciones de contorno se aplican al dominio físico y son fundamentales para establecer el comportamiento que debe tener la estructura a analizar. Un error en el momento de ingresar los datos dará como consecuencia resultados incorrectos o lo más probable es que el programa no realice ninguna simulación.

Para crear fronteras en el dominio se usan las herramientas *boundaries*, con la finalidad de elegir el tipo de frontera y sus condiciones. A continuación, se muestra en la Figura 65, Figura 66, Figura 67, Figura 68 , Figura 69 y Figura 70 la configuración aplicada al dominio generado en el desarenador estableciendo condiciones de caudal de diseño y un tirante de agua de 0.96 m necesarias para un modelo de superficie libre.

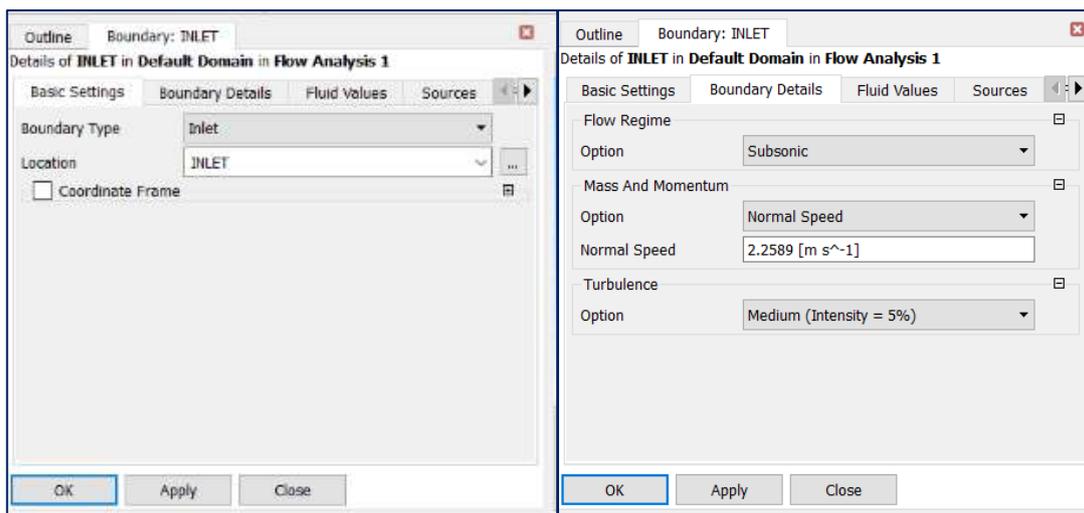


Figura 65. Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera, caudal promedio y tirante de 0.96 m en la entrada del desarenador (Inlet).

Fuente: Elaboración propia

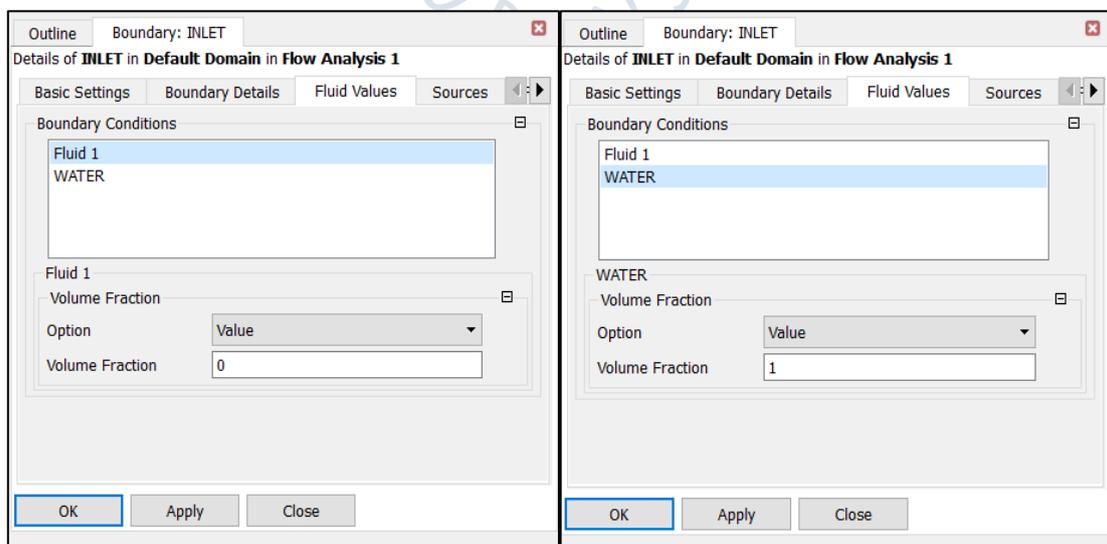


Figura 66. Configuración de los valores de fluidos en la entrada del desarenador (Inlet).

Fuente: Elaboración propia

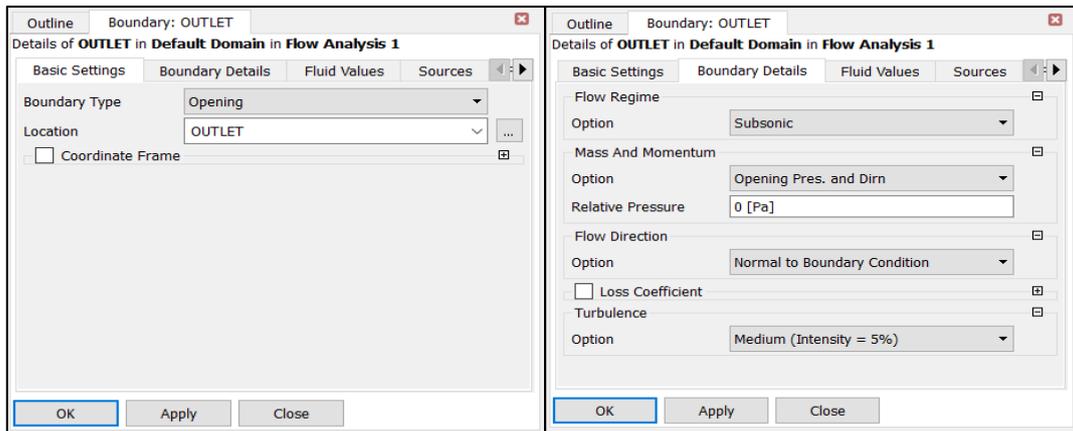


Figura 67. Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y presión relativa en la salida del desarenador (Outlet).

Fuente: Elaboración propia

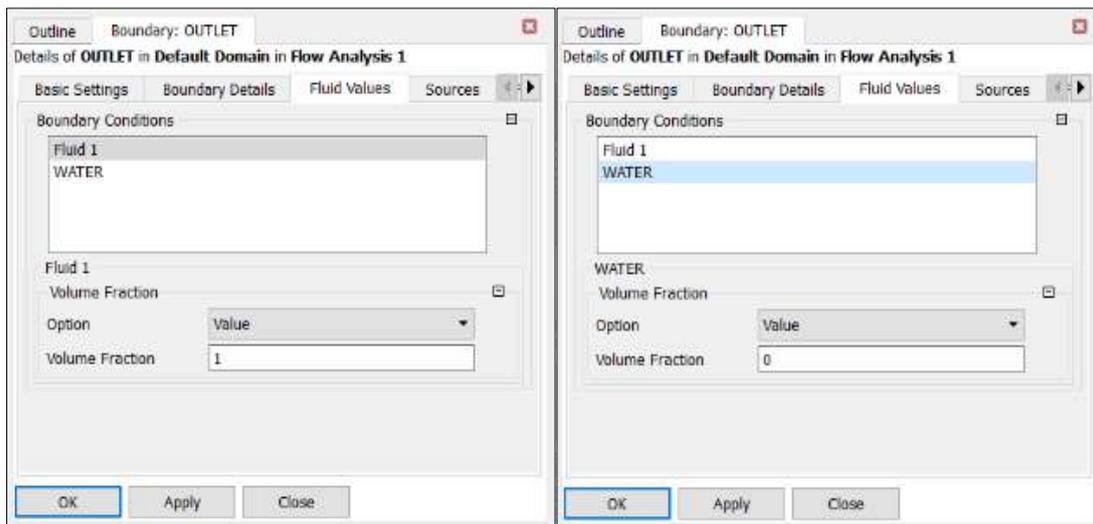


Figura 68. Configuración de los valores de fluidos en la salida del desarenador (Outlet).

Fuente: Elaboración propia

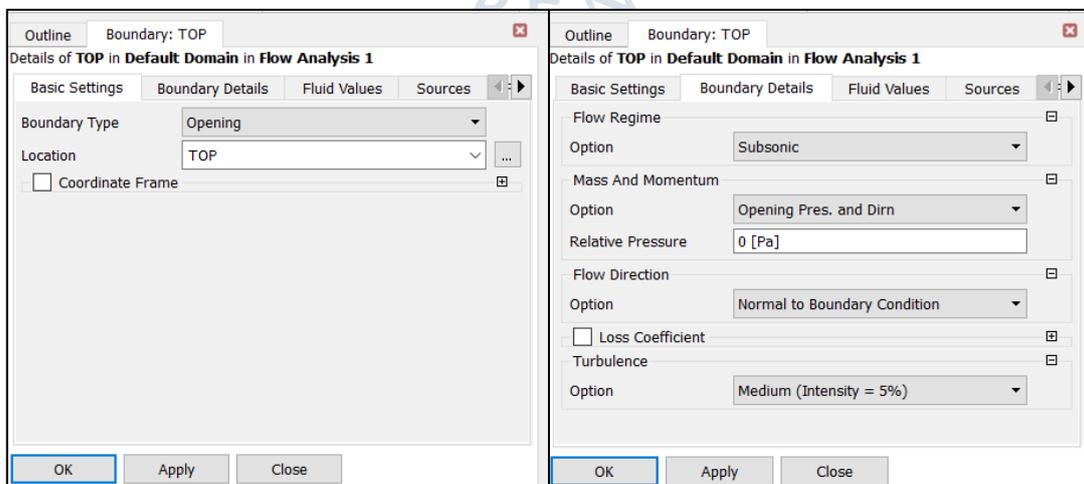


Figura 69. Configuración de las condiciones básicas, detalles de frontera y presión relativa con la zona superior del desarenador. (Top)

Fuente: Elaboración propia

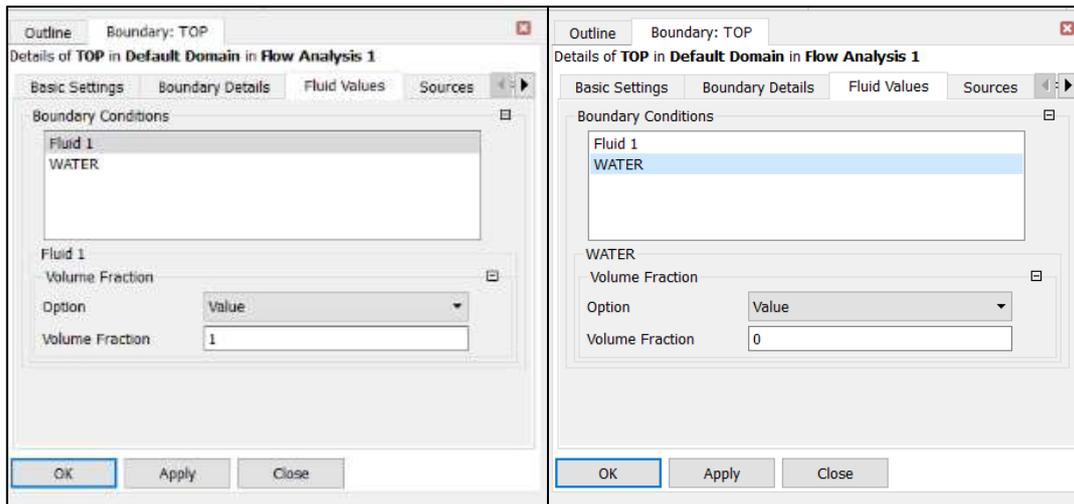


Figura 70. Configuración de los valores de fluidos en la zona superior del desarenador (Top).
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 71 se puede observar el efecto de aplicar todas las configuraciones en la estructura de análisis, en la cual están representadas en formas de vectores normales las condiciones de entrada, salida y zona superior del desarenador según los valores asignados de velocidad y presión.

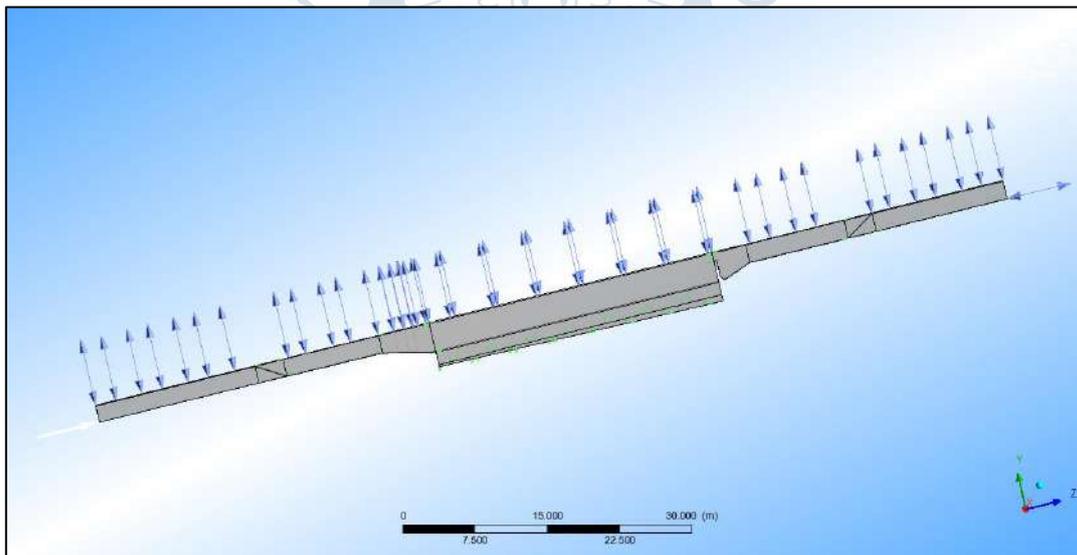


Figura 71. Representación gráfica de vectores normales resultado de los datos ingresados.
Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Configuración del control del solucionador

La pestaña de solver control muestra las configuraciones básicas del control del solucionador, aquí se establecen los parámetros que controla CFX- Solver durante la etapa de solución.

El siguiente paso es escoger las herramientas de convergencia. Para *advection scheme* se selecciona *High Resolution* y *turbulence numerics* se selecciona *First Order*, estas opciones

tendrán consecuencias tanto en el tiempo de simulación como de la convergencia de la solución.

High Resolution utiliza valores de factores de mezclado entre 1 y 0. El valor de 1 corresponde a regiones de flujo con bajas variaciones de gradientes para mantener la precisión de la solución y 0 con grandes variaciones de gradiente para evitar las sobreoscilaciones, bajas oscilaciones y mantener la robustez de la solución.

La opción *first order* de *advection scheme* con un factor de mezclado de 0 es más robusto que *high resolution*, el cual es más robusto que un factor de mezclado de 1. Si el flujo incluye choques, la opción de *high resolution* debería ser la opción para utilizar (Ansys CFX 17.2, 2017).

En el proceso de análisis se ha colocado como número mínimo y máximo de iteraciones 1 y 1500 respectivamente, a pesar de ello la convergencia puede acercarse a un número menor o mayor al fijado. El análisis concluirá cuando se observe una gran tendencia de uniformidad de los datos entre iteraciones continuas, siendo así se habrá alcanzado la estabilidad y convergencia de los datos analizados. Y al alcanzar dichas características el usuario asegura que los resultados finales obtenidos representan fielmente la realidad del fenómeno.

En *timescale* control se coloca la opción *Auto Timescale Control*, el cual usa una escala de tiempo física calculada internamente basada en las condiciones de contorno, condiciones de flujo, la física y la geometría de dominio. Además, tener en cuenta que *Auto Timescale* solucionada por el *solver* es conservadora, lo cual es robusto, pero en algunos casos se logra una convergencia más rápida usando ajustes más agresivos.

Otro criterio de análisis como se observa en la Figura 72, es el *Residual Type* y *Residual Target*. En *residual type* se selecciona la opción *RMS* y en *Residual Target* se coloca un valor límite de 1×10^{-4} , para que el proceso de análisis se detenga automáticamente cuando todas las variables analizadas presenten una variación de residuo tipo RMS menor a 1×10^{-4} .

En *residual target* se observa la opción de *Conservation Target*, el cual considera que la simulación converge cuando el Imbalance se ubica dentro del 1% de error, es por esta razón, que se selecciona un valor de 0.01 (Ansys CFX 17.2, 2017).

Finalmente, en *Advanced Options* se selecciona la opción *Global Dynamic Model Control*, para prevenir cualquier efecto no deseado. Estas opciones son gobernadas por las ecuaciones de turbulencia e hidrodinámica.

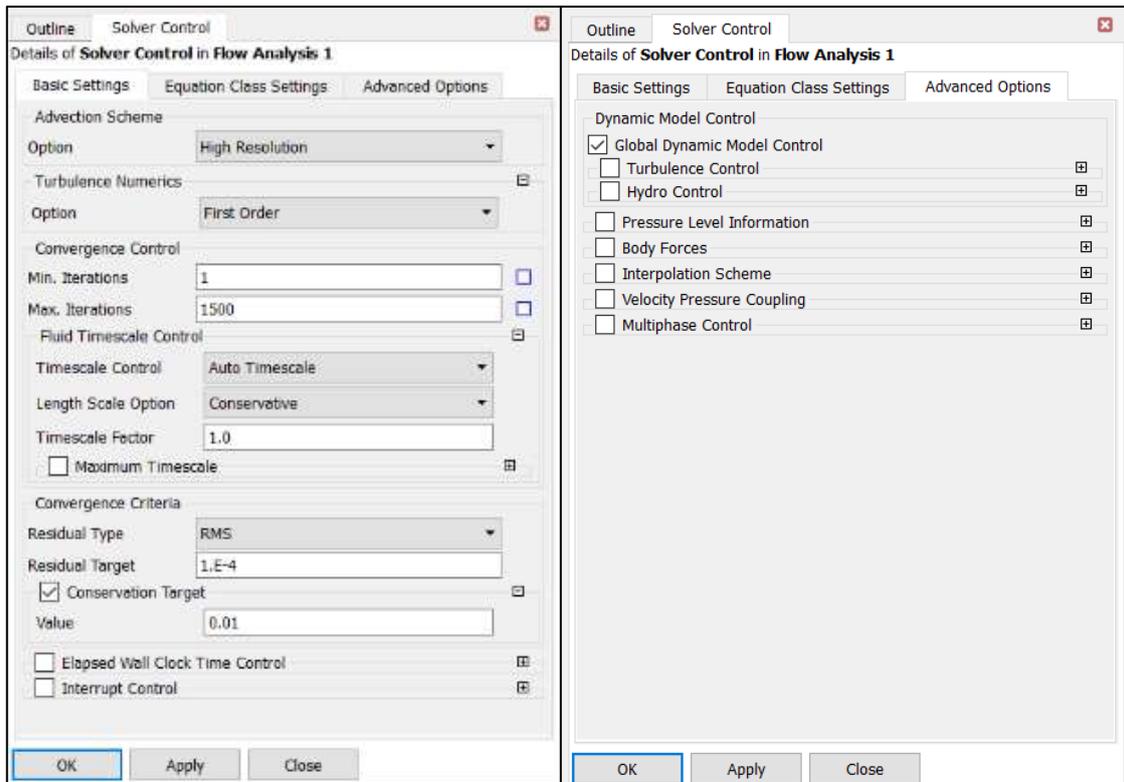


Figura 72. Configuración de Solver Control.
Fuente: Elaboración propia

5.4. Parámetros hidráulicos

En *solution* se pueden visualizar las gráficas en el tiempo de la simulación. Al abrir esta herramienta aparece una ventana con el nombre de *Fluid Flow (CFX)- CFX Solver Manager*, en el que automáticamente muestra una ventana con el nombre de *Run Define* como se muestra en la Figura 73.

Se procede a seleccionar *Double Precision*, debido a que el uso ejecutable del solucionador puede mejorar la convergencia de manera significativa.

Para definir el número de particiones, se selecciona el modo *Run*, el cual permite configurar el número de particiones, para eso se debe seleccionar *Local Parallel Run* (Ansys CFX 17.2, 2017).

Una vez definidas las condiciones de simulación, se procede a iniciar el cálculo de las ecuaciones. El tiempo de simulación para el caso del desarenador es de aproximadamente 3 hrs con 53 min. El cálculo de la simulación depende de la geometría, del número nodos y de elementos y de la configuración del *solver control*.

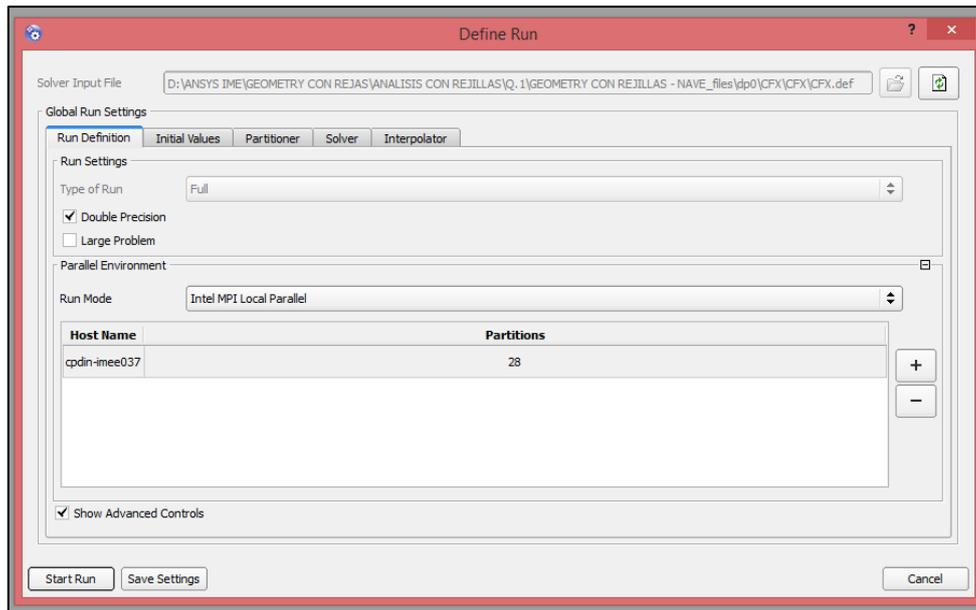


Figura 73. Configuración de Solution para iniciar la simulación.
Fuente: Elaboración propia

Por último, se define las opciones de partida de la simulación. Si es una nueva simulación se selecciona *Initial Conditions* o si se cuenta con una data almacenada, y se desea empezar con esta, entonces se selecciona *Current Solutions Data (If posible)*. Se puede observar en Figura 74.

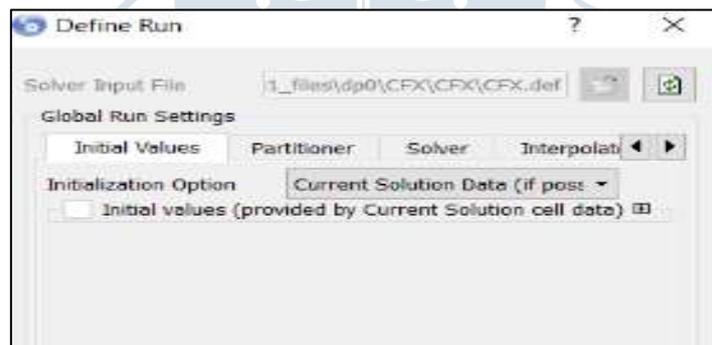


Figura 74. Configuración de Solution para una nueva simulación.
Fuente: Elaboración propia

5.4.1. Resolución numérica

En la Figura 75 y Figura 76, representan los cálculos internos desarrollados por el software para alcanzar estabilidad y convergencia de los datos ingresados.

En la Figura 75, se puede observar, que conforme se van procesando las iteraciones continuas, se está logrando una convergencia cuando se aprecia que los residuos van reduciendo, caso contrario, si estos van aumentando esto quiere decir que están perdiendo estabilidad y se entiende que están divergiendo. Además, no se observa cambios bruscos en su convergencia, por ello se estima como aceptable la solución en dicha iteración.

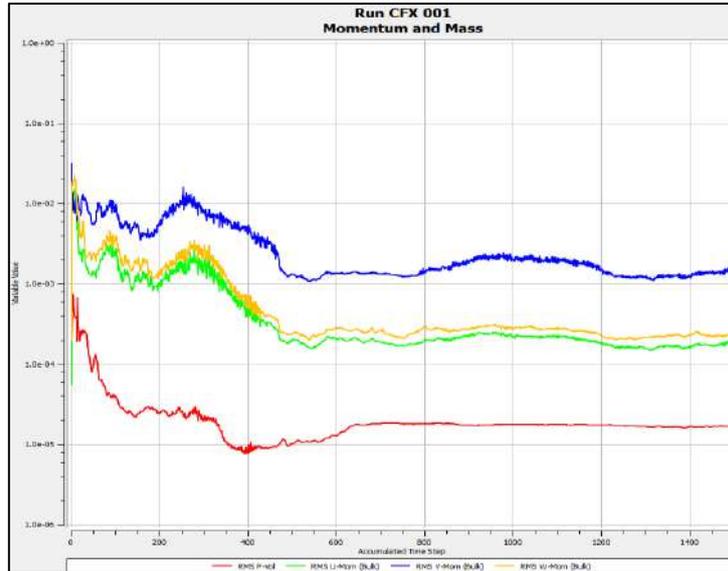


Figura 75. Curva de convergencia del CFX- Solver Manager del desarenador.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 76, se puede apreciar que conforme se van procesando las iteraciones continuas, se está logrando una solución convergente ya que se aprecia que los residuos tienden a cero, caso contrario los residuos van aumentando y la solución estaría divergiendo.

Encontrar la solución exacta o similar al entorno real depende de muchos factores, incluido el tamaño y forma de los volúmenes de control y la dimensión de los residuos finales.

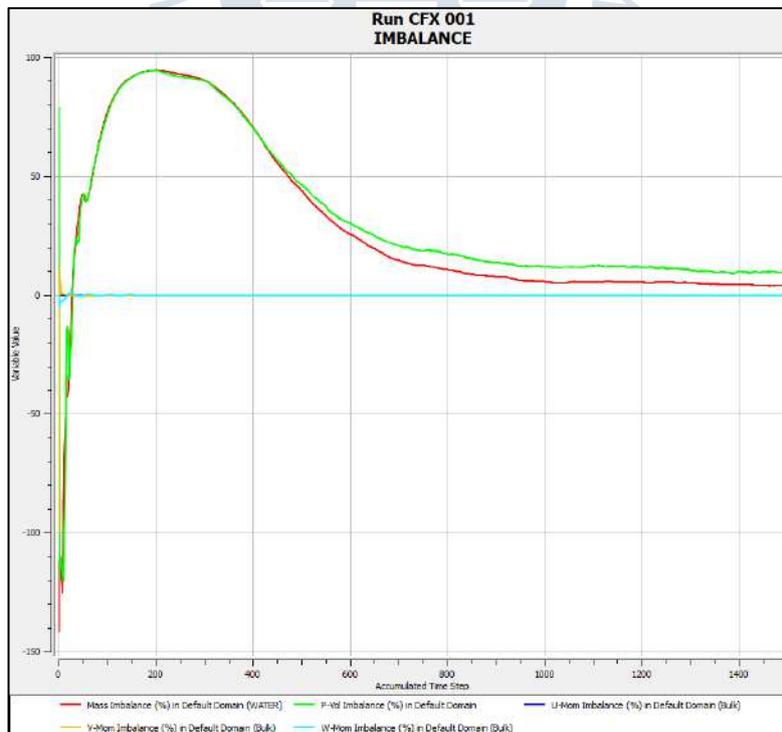


Figura 76. Gráfica del imbalance del desarenador.
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se observa en la Figura 77 las variaciones de una solución con diferentes iteraciones.

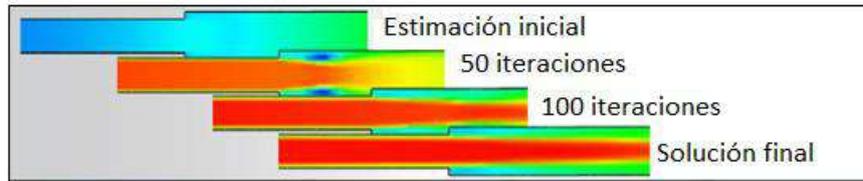


Figura 77. Variaciones de una solución con diferentes iteraciones.
Fuente: Elaboración propia

En *CFX -Solver Manager* se puede agregar nuevas gráficas dependiendo de los parámetros que se desean analizar. Para realizar este paso se dirige a *new monitor* y se selecciona la gráfica que se desea analizar como: *timestep*, *residual*, *Flow*, *force*, *imbalance*, *momento* y *source*. Ver Figura 78.

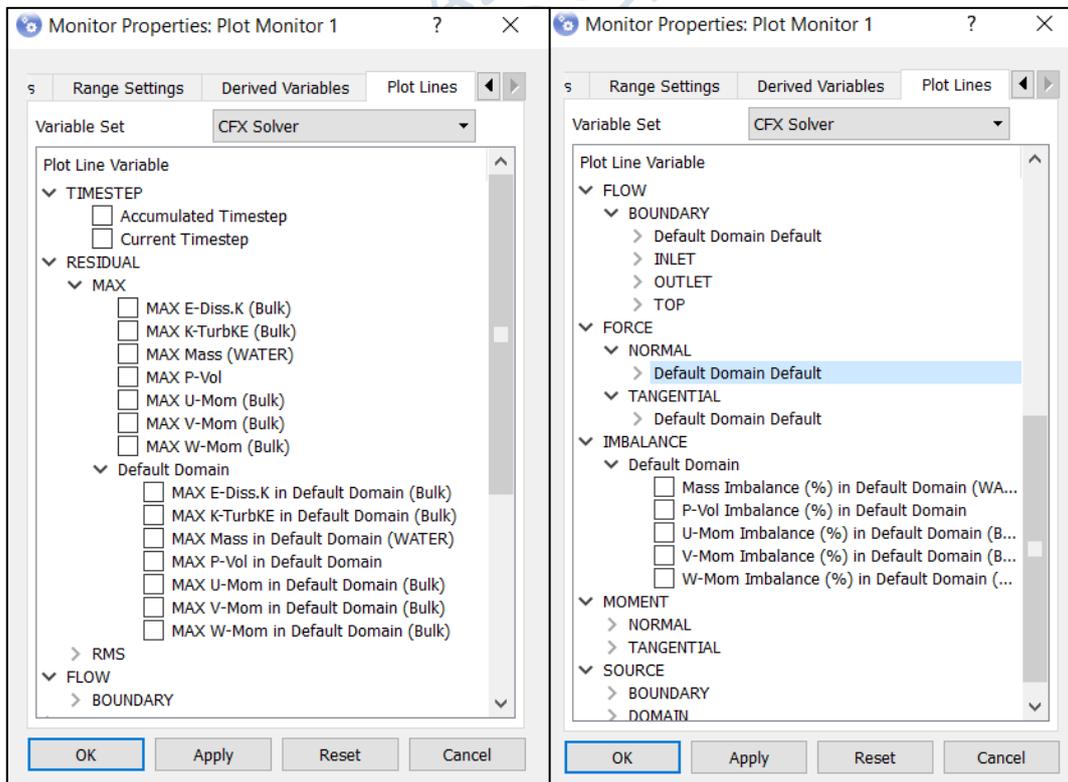


Figura 78. Nombres de gráficas para posteriores análisis en *CFX -Solver Manager*
Fuente: Elaboración propia

Out File es un archivo de texto generado por el *CFX- Solver*, contiene información sobre la configuración del modelo simulado, el estado de la solución durante la ejecución del *CFX- Solver* y estadísticas de análisis de la ejecución (Ansys CFX 17.2, 2017).

Toda la información mencionada se puede visualizar al lado derecho de la interfaz, asimismo se genera un archivo de salida denominado *CFX_001.out*.

Las secciones se dividen en (Ansys CFX 17.2, 2017):

- *Header*: Es el encabezado y se escribe al inicio de cada simulación en CFX-Solver Manager Output File. Contiene información sobre los comandos que se utilizan para resolver dicho trabajo.
- *CFX Command Language for the Run*: Esta sección describe la definición del problema incluyendo la especificación del dominio, condiciones de contorno, parámetros de mallado y el control de la solución.
- *Job Information at Start of Run*: En esta sección se describen las características de trabajo en términos del modo de simulación (Serial o Paralelo), la máquina en la cual se está simulando el trabajo y el tiempo y fecha en que se empezó a resolver (CFD, s.f.). En la Figura 79 se muestra el esquema de esta sección.

```

+-----+
|                               |
|           Job Information at Start of Run           |
|-----+-----+
|
| Run mode:           partitioning run
|
| Host computer:     CPDIN-IMEE037 (PID:11004)
|
| Job started:      Thu Jan 11 18:50:46 2018
|
+-----+

```

Figura 79. Job information at start of run.
Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

- *Memory Allocated for the Run*: El almacenamiento asignado, generalmente, excede el almacenamiento requerido. Ver Figura 80.

```

+-----+
|           Memory Allocated for Run (Actual usage may be less)           |
|-----+-----+
|
|           | Real      | Integer  | Character | Logical  | Double
|-----+-----+-----+-----+-----+
| Mwords   | 4.70  | 75.73  | 6.91  | 0.12  | 0.00
| Mbytes   | 35.88 | 288.87 | 6.59  | 0.46  | 0.00
|-----+-----+-----+-----+

```

Figura 80. Memory allocated for run.
Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

- *Mesh Statistics*: La estadística de la malla computacional resume los siguientes elementos globales y específicos del dominio: diagnóstico de la calidad de mallado, la totalidad de nodos, elementos y caras de contorno en el mallado y las fracciones de área de mallado no asignada. En el diagnóstico de calidad de mallado incluye la medición de ortogonalidad, expansión y relación de aspecto. La calidad de mallado se diferencia como OK (bueno), ok (aceptable) y ¡(pobre).

- *Initial Average Scales*: Las escalas iniciales promedio se basan sobre el campo de flujo inicial. Si el campo de velocidad inicial es cero, entonces la escala promedio de la velocidad inicial también será cero. La Figura 81 muestra el esquema de esta sección.

Average Scale Information	
Domain Name : Default Domain	
Global Length	= 9.0667E+00
Minimum Extent	= 4.1000E+00
Maximum Extent	= 9.6900E+01
WATER.Density	= 9.9700E+02
WATER.Dynamic Viscosity	= 8.8990E-04
WATER.Velocity	= 2.2589E+00
WATER.Advection Time	= 4.0138E+00
WATER.Reynolds Number	= 2.2946E+07
WATER.Mass (Conservative)	= 3.7154E+05
WATER.Mass (Normalised)	= 3.7154E+05
WATER.Volume	= 3.7266E+02
WATER.Volume Fraction	= 5.0000E-01
Fluid 1.Density	= 1.1850E+00
Fluid 1.Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05
Fluid 1.Velocity	= 2.2589E+00
Fluid 1.Advection Time	= 4.0138E+00
Fluid 1.Reynolds Number	= 1.3255E+06
Fluid 1.Mass (Conservative)	= 4.4160E+02
Fluid 1.Mass (Normalised)	= 4.4160E+02
Fluid 1.Volume	= 3.7266E+02
Fluid 1.Volume Fraction	= 5.0000E-01
Wave Speed	= 9.4294E+00
Froude Number	= 2.3956E-01

Figura 81. Initial average scales.

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

- *Checking for Isolated Fluid Regions*: Para modos de simulación en serie, el Solver Manager comprueba si algún dominio del fluido contiene regiones volumétricas que se hallan aisladas, lo cual no puede ser comprobado para modos de simulación en paralelo.
- *Solved Equations*: En esta sección se enumeran las variables dependientes resueltas y las relaciones con ecuaciones, así como la estimación del tiempo físico, si se calculase automáticamente. Estas ecuaciones se ubican clasificadas en dos: el nombre individual y un nombre combinado, los cuales son utilizados para combinar residuos. En la Figura 82 se observa el esquema de esta sección.

The Equations Solved in This Calculation	
Subsystem : Momentum and Mass	
U-Mom-Bulk	
V-Mom-Bulk	
W-Mom-Bulk	
P-Vol	
Subsystem : Volume Fractions	
Mass-WATER	
Subsystem : TurbKE and Diss.K	
K-TurbKE-Bulk	
E-Diss.K-Bulk	
CFD Solver started: Thu Jan 11 18:51:17 2018	

Figura 82. Solved Equations.

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

- *Convergence History*: Aquí es donde se detalla el estado de la solución, así como el progreso. La información de la ecuación residual en ubicaciones específicas le permite a *solver manager* monitorear la convergencia. Dificultades en la convergencia pueden, a menudo, ser señalados en una parte determinada de la solución y/o localizado en un lugar determinado. La Figura 83 muestra el esquema de esta sección.

Convergence History					
Timescale Information					
Equation	Type	Timescale			
U-Mom-Bulk	Auto Timescale	9.61532E-01			
V-Mom-Bulk	Auto Timescale	9.61532E-01			
W-Mom-Bulk	Auto Timescale	9.61532E-01			
Mass-WATER	Auto Timescale	9.61532E-01			
K-TurbKE-Bulk	Auto Timescale	9.61532E-01			
E-Diss.K-Bulk	Auto Timescale	9.61532E-01			
=====					
OUTER LOOP ITERATION = 1496			CPU SECONDS = 3.857E+05		
Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom-Bulk	0.93	1.8E-04	9.1E-03	2.5E-03	OK
V-Mom-Bulk	0.97	1.4E-03	6.8E-02	4.0E-04	OK
W-Mom-Bulk	0.95	2.2E-04	2.4E-02	1.7E-03	OK
P-Vol	1.00	1.7E-05	9.9E-04	8.5 2.0E-03	OK
Mass-WATER	1.00	3.8E-03	1.9E-01	10.0 4.9E-06	OK
K-TurbKE-Bulk	0.99	2.6E-03	1.9E-01	9.9 7.5E-06	OK
E-Diss.K-Bulk	0.91	7.6E-04	5.1E-02	7.4 1.2E-04	OK
=====					
OUTER LOOP ITERATION = 1497			CPU SECONDS = 3.860E+05		
Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom-Bulk	1.11	2.0E-04	1.4E-02	2.7E-03	OK
V-Mom-Bulk	1.15	1.6E-03	1.5E-01	4.1E-04	OK
W-Mom-Bulk	1.06	2.4E-04	2.5E-02	1.9E-03	OK
P-Vol	1.00	1.7E-05	1.0E-03	8.5 2.3E-03	OK

Figura 83. Convergence history.

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

- *Computed Model Constants*: la viscosidad global de la turbulencia es proporcionada, si se utiliza el modelo de ecuación cero como modelo de turbulencia.
- *Termination and Interrupt Condition Summary*: luego de ejecutar cada iteración de coeficiente y paso de tiempo, *solver manager* evalúa todas las condiciones internas y condiciones de control de interrupción definidas por el usuario. Después de terminar o interrumpir, algunas de estas condiciones que son verdaderas, éstas son reportadas en *CFX-Solver Output File*.

- *Global Conservation Statistics*: esta sección se genera por las ecuaciones de transporte, con la excepción de la ecuación de turbulencia, las cuales tienen un comportamiento especial en la pared.

Pequeños valores del desbalance global indican que la conservación ha sido lograda. El porcentaje de desbalance se representa mediante la ecuación (5.2):

$$\%Imbalance = 100 \times \frac{Equation\ Inbalance}{Maximum\ Flow} \quad (5.2)$$

Donde *Maximum Flow* considera la mayor contribución en todo el dominio conectado por el grupo específico de ecuaciones. El propósito del grupo de ecuaciones puede ser diferente dependiendo el caso.

Para calcular una sola fase, cada ecuación del desbalance es normalizada utilizando la mayor contribución para el subsistema de ecuaciones. La excepción es el subsistema hidrodinámico, donde cada desbalance de la ecuación del momento se normaliza utilizando la mayor contribución. Desde todas las ecuaciones del momento. El desbalance de la ecuación de continuidad es normalizado utilizando la mayor contribución en todas las ecuaciones de la continuidad.

- *Calculated Wall Forces and Moments*: CFX – solver manager calcula las componentes de la presión y viscosidad de fuerzas sobre todos los contornos especificados como pared. La Figura 84 muestra cómo se calcula la fuerza de arrastre sobre una pared.

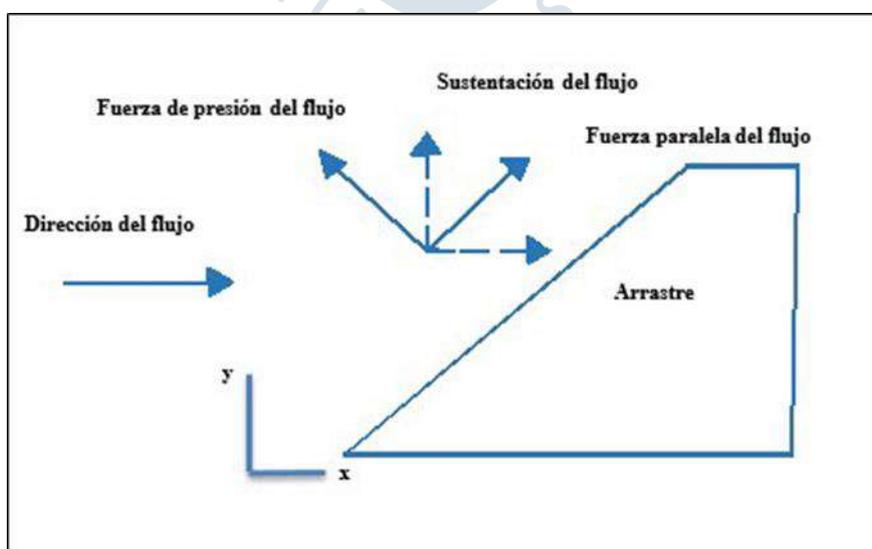


Figura 84. Fuerza de arrastre sobre una pared.
Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

La fuerza de sustentación es la fuerza neta que actúa sobre un objeto en dirección vertical. La fuerza de sustentación es la adición de todas las fuerzas sobre la pared en la dirección vertical, es decir, la sumatoria de las componentes de las fuerzas de fricción y viscosidad en la dirección “y”. La fuerza de arrastre es la fuerza neta sobre el cuerpo, pero en la dirección del flujo y es la suma de las fuerzas que actúan sobre la pared en dirección horizontal, en otras palabras, el resultado de las componentes de las fuerzas de presión y viscosidad en la dirección “x” (Ansys CFX 17.2, 2017).

La presión y los momentos viscosos se hallan relacionados con la presión producida por las fuerzas viscosas calculadas sobre una pared. El momento de presión (M_n) es el vector producto del vector fuerza de presión y el vector posición. El momento viscoso (M_t) es el producto vectorial del vector fuerza viscosa y el vector posición tal y como se muestra en la ecuación (5.3) y (5.4). Ver Figura 85.

$$M_n = \vec{r} \times \vec{F}_n \quad (5.3)$$

$$M_t = \vec{r} \times \vec{F}_t \quad (5.4)$$

Wall Force and Moment Summary			
Notes:			
1. Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.			
-----+-----			
Pressure Force On Walls			
+-----+-----			
	K-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Default Domain			
Default Domain Default	-1.6889E+01	-5.6193E+06	4.9740E+03
Domain Group Totals :	-1.6889E+01	-5.6193E+06	4.9740E+03
-----+-----			
Viscous Force On Walls			
+-----+-----			
	K-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Default Domain			
Default Domain Default	2.3955E+00	-3.8805E+01	9.3562E+02
Domain Group Totals :	2.3955E+00	-3.8805E+01	9.3562E+02
-----+-----			
Pressure Moment On Walls			
+-----+-----			
	K-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Default Domain			
Default Domain Default	1.7425E+08	-1.0176E+03	-3.9674E+02
Domain Group Totals :	1.7425E+08	-1.0176E+03	-3.9674E+02
-----+-----			
Viscous Moment On Walls			
+-----+-----			
	K-Comp.	Y-Comp.	Z-Comp.
Domain Group: Default Domain			
Default Domain Default	5.4778E+02	1.9935E+02	1.3064E+01
Domain Group Totals :	5.4778E+02	1.9935E+02	1.3064E+01

Figura 85. Fuerzas y momentos calculados sobre las paredes del desarenador.
Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

Es importante notar que dichas fuerzas evaluadas en el marco de referencia local no incluyen los efectos de la presión de referencia. La fuerza de presión es calculada como la

integral de la presión relativa sobre el área de la pared, y no como la integral de la suma de las presiones de referencia y relativas (Ansys CFX 17.2, 2017).

- *Maximum Residual Statistics*: Las ubicaciones de los residuos máximos son importantes para identificar las dificultades de convergencia de la solución. Si existen residuos grandes, entonces se menciona que la simulación no converge, por lo tanto, se debe ubicar los residuos máximos en la sección de diagnóstico y repararlos en *Geometry*. En la Figura 86 se muestra el número de nodo de cada dominio y ecuación.

Locations of Maximum Residuals		
Equation	Domain Name	Node Number
U-Mom-Bulk	Default Domain	106076
V-Mom-Bulk	Default Domain	96009
W-Mom-Bulk	Default Domain	12401
P-Vol	Default Domain	727191
Mass-WATER	Default Domain	705961
K-TurbKE-Bulk	Default Domain	719893
E-Diss_K-Bulk	Default Domain	255034

Figura 86. Maximum residual statistics del desarenador.

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

- *False Transient Information*: Esta sección sólo aparece en las simulaciones en estado estacionario. Para cada ecuación, el tipo de tiempo utilizado se presenta como *auto* o *physical*, los cuales funcionan como falsos transitorios para suavizar la convergencia (CFD, s.f.). En la Figura 87 se muestra el esquema de esta sección.

False Transient Information		
Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom-Bulk	Auto Timescale	1.44230E+03
V-Mom-Bulk	Auto Timescale	1.44230E+03
W-Mom-Bulk	Auto Timescale	1.44230E+03
Mass-WATER	Auto Timescale	1.44230E+03
K-TurbKE-Bulk	Auto Timescale	1.44230E+03
E-Diss_K-Bulk	Auto Timescale	1.44230E+03

Figura 87. False transient information del desarenador.

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

- *Final Average Scales*: Estas son las escalas medias para el campo de flujo final, y se observan en la Figura 88.
- *Variable Range Information*: Esta sección representa los valores máximos y mínimos para cada variable del campo de flujo, los valores para el desarenador con rejilla se muestran en la Figura 89.

- *CPU Requirements: Out file*, muestra los requerimientos del CPU, tal y como se observa en la Figura 90 para el caso del desarenador con rejilla.
- *Job Information at End of Run: Out file* muestra la información final de la hora y fecha de culminación de la simulación, así como la dirección de donde fue almacenada la simulación, tal y como se visualiza en la Figura 91.

```

+-----+
|                                     |
|               Average Scale Information               |
|-----+-----+
Domain Name : Default Domain
Global Length                = 9.0667E+00
Minimum Extent                = 4.1000E+00
Maximum Extent                = 9.6900E+01
WATER.Density                 = 9.9700E+02
WATER.Dynamic Viscosity       = 8.9990E-04
WATER.Velocity                = 6.9689E-01
WATER.Advection Time         = 1.3010E+01
WATER.Reynolds Number        = 7.0789E+06
WATER.Mass (Conservative)     = 5.7339E+05
WATER.Mass (Normalised)      = 5.7339E+05
WATER.Volume                  = 5.7512E+02
WATER.Volume Fraction        = 7.7164E-01
Fluid 1.Density               = 1.1850E+00
Fluid 1.Dynamic Viscosity     = 1.8310E-05
Fluid 1.Velocity              = 6.9689E-01
Fluid 1.Advection Time       = 1.3010E+01
Fluid 1.Reynolds Number      = 4.0892E+05
Fluid 1.Mass (Conservative)   = 2.0169E+02
Fluid 1.Mass (Normalised)    = 2.0169E+02
Fluid 1.Volume                = 1.7020E+02
Fluid 1.Volume Fraction      = 2.2836E-01
Wave Speed                    = 9.4294E+00
Froude Number                 = 7.3906E-02

```

Figura 88. Average scale information

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

```

+-----+
|                                     |
|               Variable Range Information               |
|-----+-----+
Domain Name : Default Domain
+-----+-----+
| Variable Name | min | max |
+-----+-----+
| WATER.Density | 9.97E+02 | 9.97E+02 |
| WATER.Specific Heat Capacity at Constant Pr | 4.18E+03 | 4.18E+03 |
| WATER.Dynamic Viscosity | 8.90E-04 | 8.90E-04 |
| WATER.Thermal Conductivity | 6.07E-01 | 6.07E-01 |
| WATER.Static Entropy | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Fluid 1.Density | 1.19E+00 | 1.19E+00 |
| Fluid 1.Specific Heat Capacity at Constant | 1.00E+03 | 1.00E+03 |
| Fluid 1.Dynamic Viscosity | 1.83E-05 | 1.83E-05 |
| Fluid 1.Thermal Conductivity | 2.61E-02 | 2.61E-02 |
| Fluid 1.Static Entropy | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| WATER.Velocity u | -3.45E+00 | 3.46E+00 |
| WATER.Velocity v | -6.72E+00 | 2.45E+00 |
| WATER.Velocity w | -1.80E+00 | 4.27E+00 |
| Pressure | -2.70E+03 | 4.47E+04 |
| WATER.Conservative Volume Fraction | 1.00E-15 | 1.00E+00 |
| WATER.Volume Fraction | 1.00E-15 | 1.00E+00 |
| Fluid 1.Volume Fraction | 1.11E-15 | 1.00E+00 |
| WATER.Turbulence Kinetic Energy | 2.57E-06 | 1.00E+00 |
| WATER.Turbulence Eddy Dissipation | 4.20E-06 | 7.90E+00 |
| WATER.Eddy Viscosity | 4.23E-05 | 6.85E+01 |
| Fluid 1.Eddy Viscosity | 5.03E-08 | 8.15E-02 |
| WATER.Temperature | 2.98E+02 | 2.98E+02 |
| Fluid 1.Temperature | 2.98E+02 | 2.98E+02 |
| Eddy Viscosity | 2.34E-05 | 1.78E+01 |

```

Figura 89. Variable range information.

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

```

+-----+
|          CPU Requirements of Numerical Solution - Total          |
+-----+
Subsystem Name                Discretization                Linear Solution
                               (secs.  %total)                (secs.  %total)
-----
Momentum and Mass             2.04E+05  52.1 %             2.98E+04  7.6 %
Volume Fractions              1.99E+04   5.1 %             8.52E+03  2.2 %
TurbKE and Diss.K            3.45E+04   8.8 %             1.64E+04  4.2 %
-----
Subsystem Summary             2.59E+05  65.9 %             5.47E+04  13.9 %
-----
File Reading                   3.07E+01   0.0 %
Search Calculations            1.50E+00   0.0 %
Variable Updates              7.17E+04  18.3 %
File Writing                   1.40E+02   0.0 %
Miscellaneous                  7.25E+03   1.8 %
-----
Total                          3.93E+05
+-----+

```

Figura 90. Requerimiento del CPU

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

```

+-----+
|          Job Information at End of Run          |
+-----+
Job finished:   Thu Jan 11 22:44:51 2018
Total wall clock time: 1.402E+04 seconds
                   or: (           0:           3:           53:   43.638 )
                   (           Days:       Hours:   Minutes:   Seconds )
--> Final synchronization point reached by all partitions.
End of solution stage.
-----
| The results from this run of the ANSYS CFX Solver have been |
| written to D:/ANSYS |
| IME/11.01.18/MESH1_pending/dp0_CFX_Solution/CFX_001.res |
+-----+

```

Figura 91. Información final de la simulación.

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.0

5.5. Visualización de los resultados CFD- Post procesamiento

En esta última etapa de la simulación, CFD - post procesamiento brinda datos cualitativos y cuantitativos en 1 dimensión (1D), 2 dimensiones (2D) o 3 dimensiones (3D) del comportamiento del flujo del fluido. Presenta una apropiada interfaz gráfica para analizar e interpretar los resultados obtenidos de forma interactiva.

El espacio de trabajo está dividido en ventanas de trabajo, en el lado izquierdo se muestra la zona del gráfico (*view*) y en el derecho el esquema (*outline*); en éste es donde se observa un listado de herramientas creadas por el usuario para la visualización de datos y

variables de interés de estudio, así como los detalles de configuración de dichas herramientas mostrados en la Figura 92 y Figura 93.

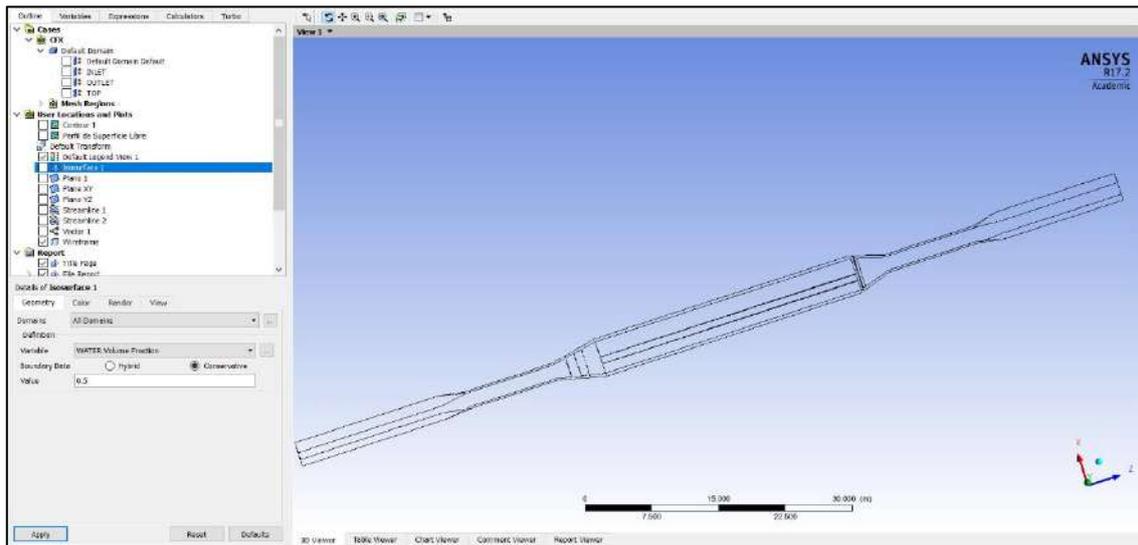


Figura 92. Interfaz del espacio de trabajo de CFD- Post.

Fuente: Elaboración propia utilizando Ansys17.2

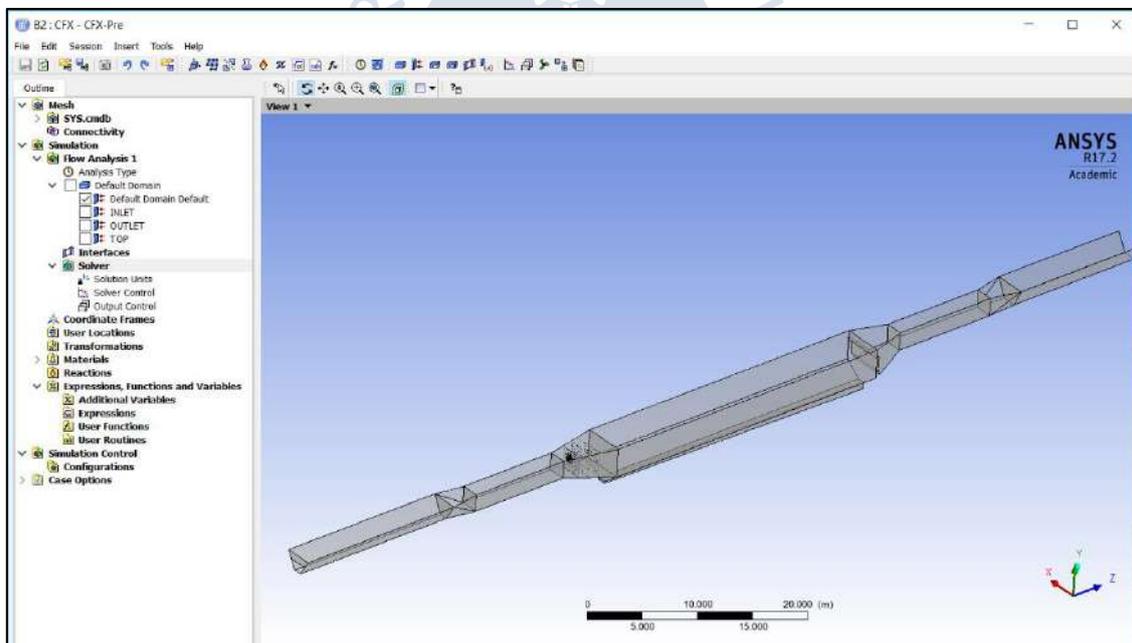


Figura 93. Distribución del espacio de trabajo CFX- Pre.

Fuente: Elaboración propia

5.6. Análisis y comparación de resultados del prototipo y el modelo numérico

Se llevó a cabo una visita de campo al prototipo del desarenador de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del Quiroz con la finalidad de verificar las dimensiones de la estructura hidráulica. Se tomaron datos de velocidad, tirantes, cuadro de flujo y caudal para realizar el diagnóstico de la estructura hidráulica.

Las condiciones observadas en el desarenador fueron las siguientes:

- Las compuertas de ingreso y salida de la nave del desarenador estuvieron completamente abiertas
- Las compuertas del canal de desvío estuvieron cerradas.
- La compuerta de ingreso del conducto de purga estuvo cerrada.

La medición de velocidades se llevó a cabo utilizando un correntómetro unidireccional. En la Figura 94 se puede observar el correntómetro N°108542 y hélice N°1-108882. Con este instrumento sólo se mide la componente de velocidad en la dirección del eje.



Figura 94. Correntómetro N°108542 y hélice N°1-108882.
Fuente: Elaboración propia. (2018)

Ansys CFX proporciona los valores de las tres componentes de velocidad y grafica los vectores velocidad en base a los valores y direcciones de componentes calculadas. Con la finalidad de obtener una comparación válida entre velocidades medidas en el prototipo y simuladas en el modelo numérico, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Seleccionar el tipo de hélice adecuada para la medición en campo. Esto debido a que, en algunas zonas, los valores de velocidad eran tan pequeños que no podían ser medidos por la mayoría de las hélices. Por lo tanto, se eligió la hélice más sensible.

Especificar la ubicación de las secciones de comparación de tal forma que en ellas las velocidades tengan como componente preeminente aquella que sigue la dirección de la corriente principal (hacia aguas abajo). De esta forma la comparación se realiza entre valores medidos en campo y valores simulados de la componente preeminente.

5.6.1. Puntos de comparación entre velocidades medidas y simuladas

Para la medición de velocidades en la sección hidrométrica se conformó una malla de medición de velocidades: tres verticales con tres puntos de medición (0.2h, 0.6h y 0.8h) donde h representa el tirante de agua, como se visualiza en la Figura 95.

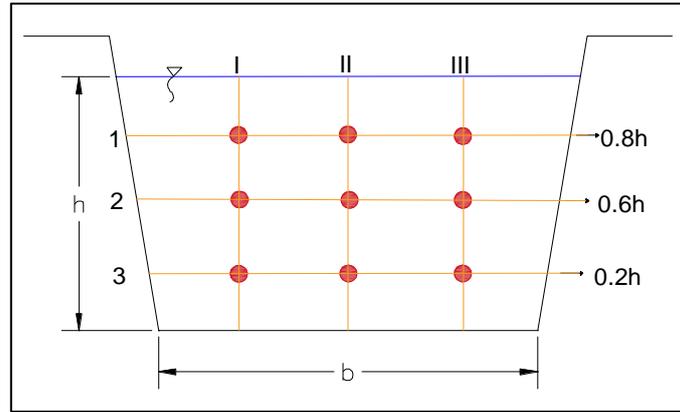


Figura 95. Malla para medición de velocidades en el canal.
Fuente: (Universidad de Piura, 2002)

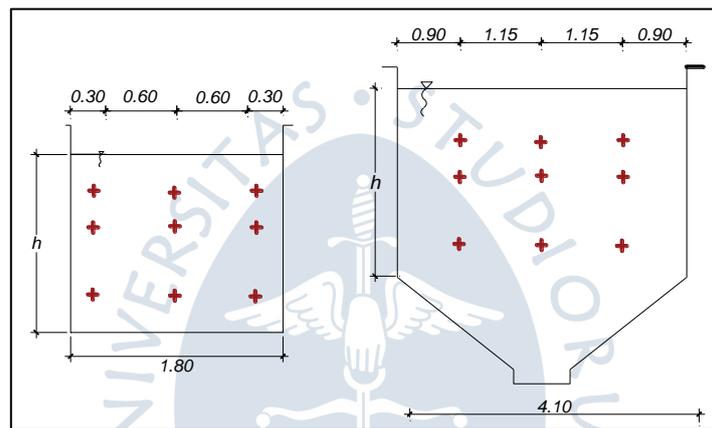


Figura 96. Distribución de distancias en las secciones del canal y la nave del desarenador.
Fuente: Elaboración propia

La Figura 96 muestra la asignación de distancias en la sección transversal de él canal y de la nave del desarenador en las que analizarán las velocidades en el prototipo y simulación.

También se ha realizado una evaluación “Aplicación del modelo numérico SSIIM para simular el patrón de flujo en el desarenador Quiroz” en el que se concluyó que el programa SSIIM simuló correctamente el patrón de flujo en el desarenador Quiroz dependiendo del modelo físico para obtener los datos iniciales de velocidades y nivel de agua. Los resultados de velocidades y patrón de flujos obtenidos por SSIIM se consideran aceptables y útiles durante un estudio real.

Los resultados cualitativos de SSIIM muestran que la implementación de un flujo uniforme se logra incorporando un muro central en la transición de entrada. Esta optimización se comprobó mediante ensayos en modelo físico (Atoche, 2003).

A continuación, se muestra la Figura 97 que indica las secciones en donde se realizaron las mediciones de velocidades en el prototipo y en la simulación.

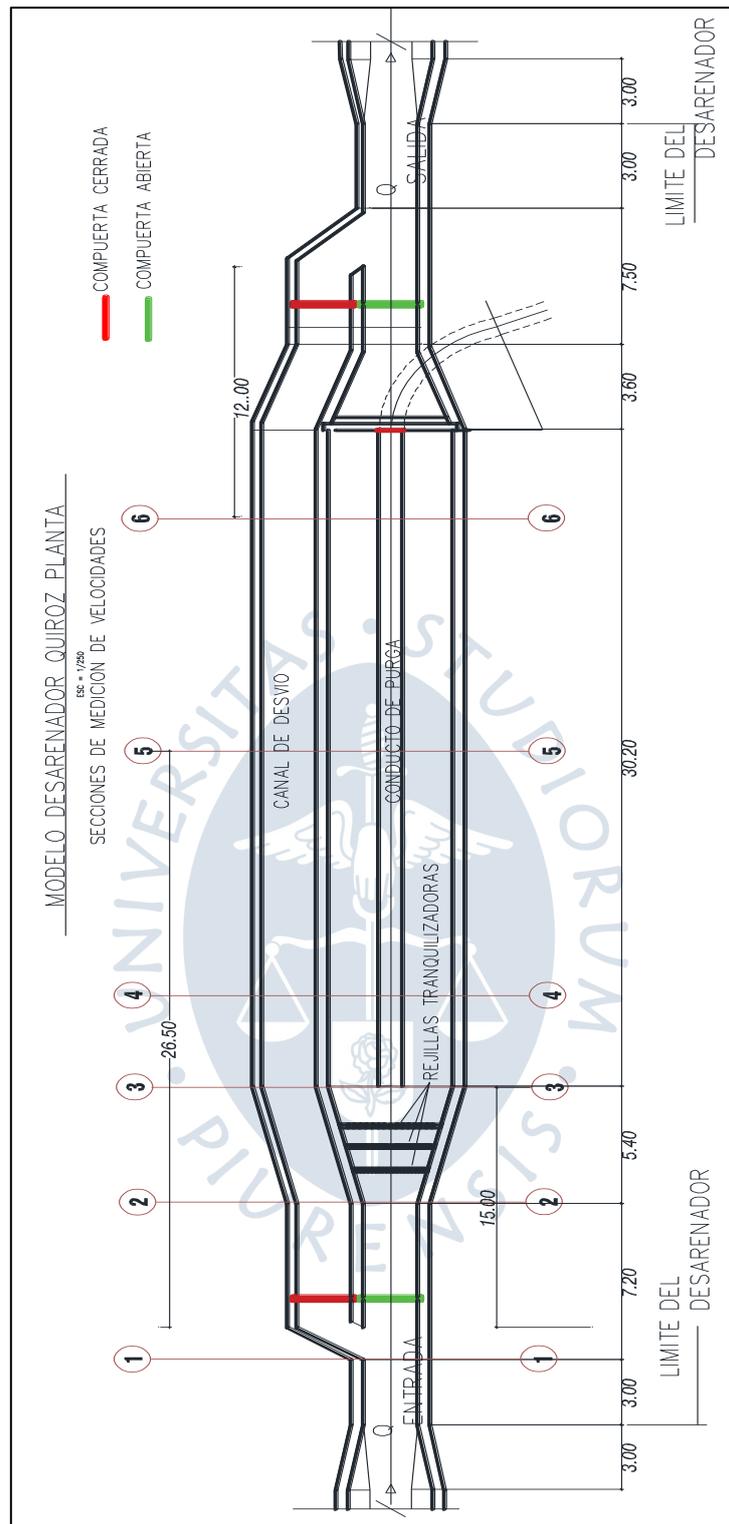


Figura 97. Vista de planta del modelo del desarenador CH. María Auxiliadora del Quiroz.
Fuente: Elaboración propia

5.6.2. Discusión de resultados

Se realizó la modelación numérica del desarenador con Ansys CFX para determinar las velocidades del flujo a lo largo de la nave de desarenador. Dicha modelación permitió

determinar las condiciones de borde (velocidad a la entrada y nivel aguas arriba) y verificar el adecuado criterio de los parámetros de la malla computacional.

A continuación, se muestra cada sección, en la cual se ha determinado las condiciones hidráulicas de ingreso en la visita de campo y se han simulado numéricamente usando el programa Ansys CFX.

Sección 1-1

Sección ubicada aguas arriba de la nave del desarenador. Tramo con pendiente de 0.0294, con paredes de ladrillo, mortero y acrílico.

Se utilizó el mismo caudal de diseño del desarenador de la Central Hidroeléctrica del Quiroz ($2.8 \text{ m}^3/\text{s}$) tanto en el prototipo como en la simulación. Se parte de este dato obtenido por información brindada por Electronoreste S.A.

La Figura 98 muestra los resultados de velocidades y tirantes obtenidos en la visita (prototipo) y en la simulación, además se ha verificado que el producto de las velocidades y el área mojada de la sección es muy similar en ambos casos, como se muestra a continuación:

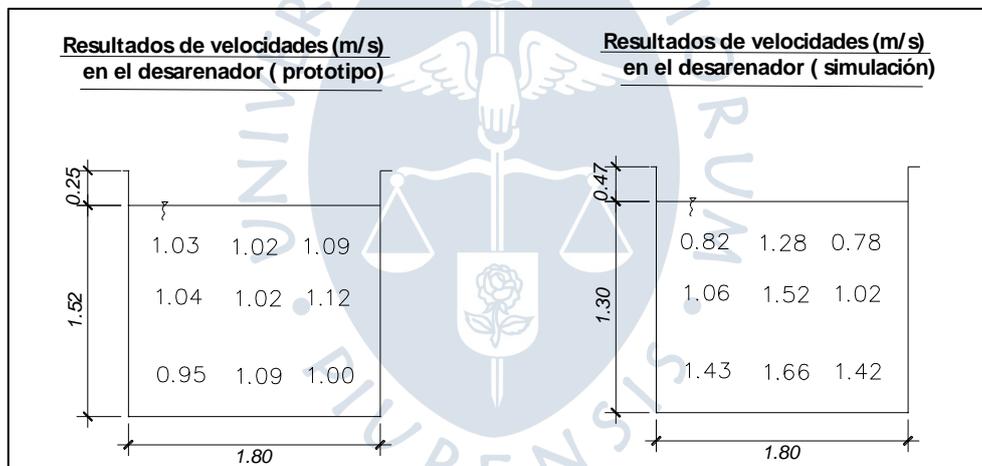


Figura 98. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador (transición de entrada)
Fuente: Elaboración propia

Datos en el prototipo

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = \Sigma \text{Velocidades} / 9$$

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = 1.04 \text{ m/s}$$

$$Q_{\text{entrada}} = V \times A$$

$$Q_{\text{entrada}} = 1.04 \text{ m/s} \times 1.52 \text{ m} \times 1.80 \text{ m}$$

$$Q_{\text{entrada}} = 2.84 \text{ m}^3/\text{s}$$

Datos en la simulación

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = \Sigma \text{Velocidades} / 9$$

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = 1.22 \text{ m/s}$$

$$Q_{\text{entrada}} = V \times A$$

$$Q_{\text{entrada}} = 1.22 \text{ m/s} \times 1.30 \text{ m} \times 1.80 \text{ m}$$

$$Q_{\text{entrada}} = 2.85 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se aprecia que las velocidades en la transición de entrada en el prototipo y en la simulación son similares como promedio, pero no en velocidades puntuales.

Sección 2-2

En la sección 2 se puede visualizar que en la Figura 97 el caudal de entrada tiene un curso hacia la nave del desarenador y hacia el canal de desvío.

A pesar que se encontraba cerrada la compuerta de by pass se observó en la visita de campo (prototipo), ingreso de caudal en mínima proporción. Por lo tanto, se está considerando añadir un caudal de $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ al cálculo del caudal en el prototipo. Se observa las velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador como se muestra en la Figura 99.

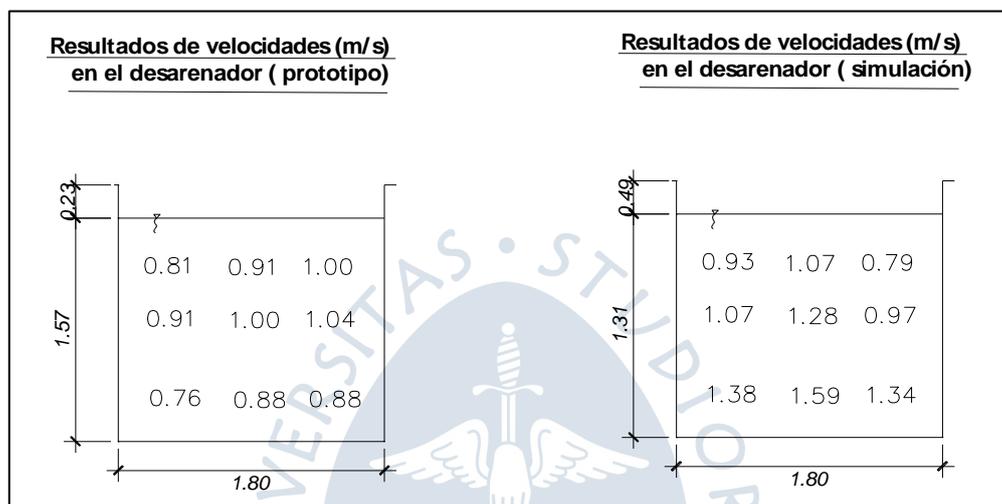


Figura 99. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador (transición de entrada-antes de las rejillas tranquilizadoras).

Fuente: Elaboración propia

No se puede añadir el caudal de las infiltraciones visualizadas en el canal de desvío en el caudal obtenido en la simulación debido a que las condiciones simuladas en el programa Ansys CFX son las ideales. Entonces se concluye que no existen pérdidas de caudal por presencia de infiltraciones en la simulación numérica.

Se adicionará el caudal de $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ a las siguientes secciones de estudio (prototipo).

Datos en el prototipo

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = \Sigma \text{Velocidades} / 9$$

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = 0.92 \text{ m/s}$$

$$Q_{\text{entrada}} = V \times A$$

$$Q_{\text{entrada}} = 0.92 \text{ m/s} \times 1.57 \text{ m} \times 1.80 \text{ m}$$

$$Q_{\text{entrada}} = 2.60 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{canal de desvío}} = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{total}} = 2.80 \text{ m}^3/\text{s}$$

Datos en la simulación

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = \Sigma \text{Velocidades} / 9$$

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = 1.16 \text{ m/s}$$

$$Q_{\text{ingreso}} = V \times A$$

$$Q_{\text{ingreso}} = 1.16 \text{ m/s} \times 1.31 \text{ m} \times 1.80 \text{ m}$$

$$Q_{\text{ingreso}} = 2.73 \text{ m}^3/\text{s}$$

Las velocidades observadas en la sección 2 tanto del prototipo como de la simulación muestran poca uniformidad y concordancia, debido a que están pasando por la transición de entrada de la nave. Al ser esta una zona de alta turbulencia, en un mismo punto ocurren velocidades de magnitudes, sentido y direcciones diferentes, por tanto, las medidas resultan inexactas.

Sección 3-3

A continuación, se analizarán las siguientes velocidades a 0.6 h y 0.8 h para representar un mismo escenario en la discusión de resultados, con respecto al flujo del agua en las secciones 3, 4, 5 y 6.

En la Figura 100 se observa un flujo ordenado en los resultados de velocidades del prototipo, además, refleja uniformidad entre dichas velocidades, de esta manera mejora la eficiencia del desarenador.

En la Figura 100 las velocidades inmediatamente tras la zona de transición son 0.36 m/s y 0.16 m/s del prototipo y simulación respectivamente. Esto asegura una baja velocidad horizontal en el desarenador, lo que ayuda con la sedimentación por gravedad. Además, dado que se utiliza las rejillas tranquilizadoras se observa pérdida de velocidad.

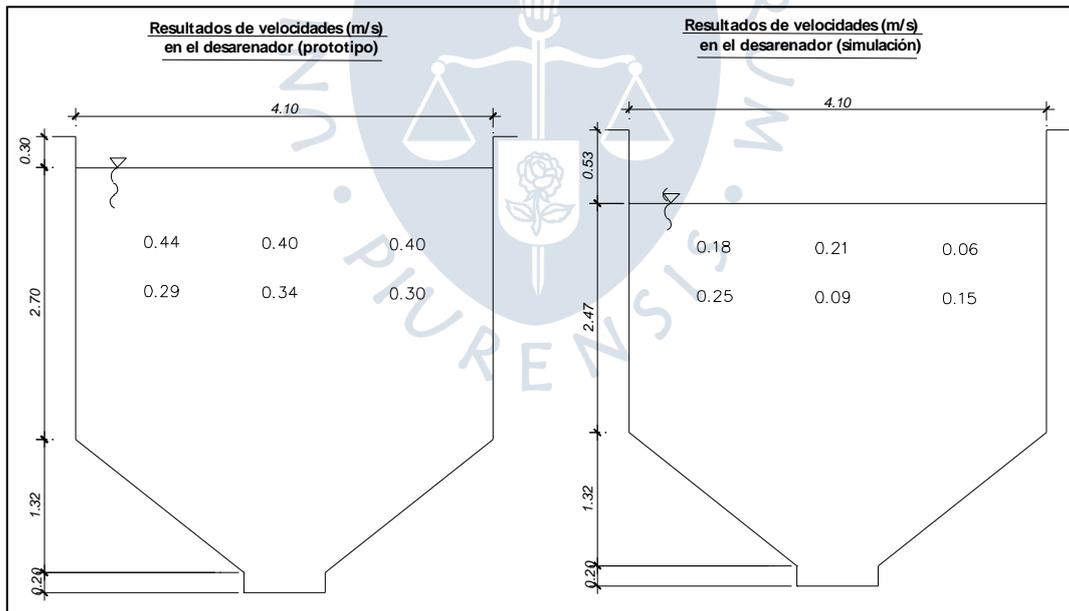


Figura 100. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador (después de las rejillas tranquilizadoras).

Fuente: Elaboración propia

A continuación, la Tabla 8 muestra los porcentajes de reducción de velocidades. Por lo tanto, se demuestra que las rejillas tranquilizadoras reducen la cinética del flujo en el desarenador de la C.H María Auxiliadora del Quiroz.

Tabla 8. Porcentajes de disminución de velocidades.

	Velocidad de prototipo (m/s)	Velocidad de simulación (m/s)
Sección 2	0.92	1.16
Sección 3	0.36	0.16
% de disminución respecto a la sección 2 y 3	60.87%	86.21%

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 101 se observa que las rejillas funcionan como se esperaba, reduciendo así la energía cinética turbulenta. Se modifican las líneas de flujo en contacto con las rejillas tranquilizadoras y se produce un flujo ordenado en toda su zona longitudinal.

La Figura 102 muestra cierta uniformidad en las líneas de flujo de la nave del desarenador. Por lo tanto, se puede asegurar que las velocidades en dicha zona no presentan gran variación entre ellas, sino que son similares.

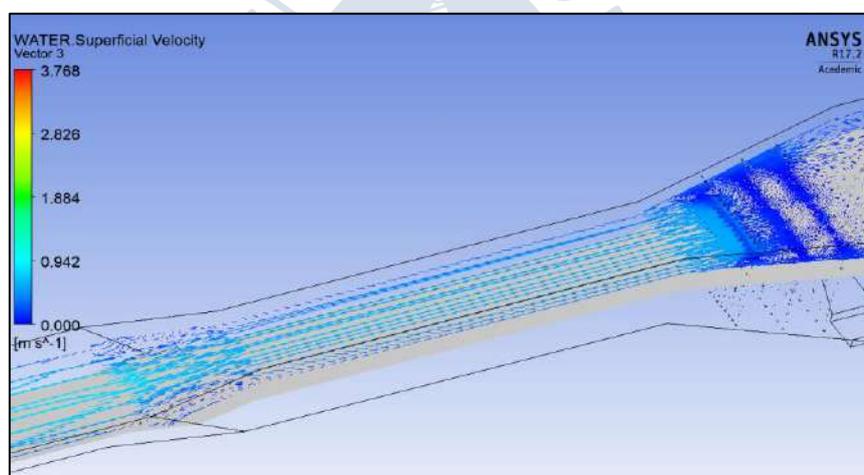


Figura 101. Vectores del flujo del agua en ANSYS CFX.

Fuente: Elaboración propia

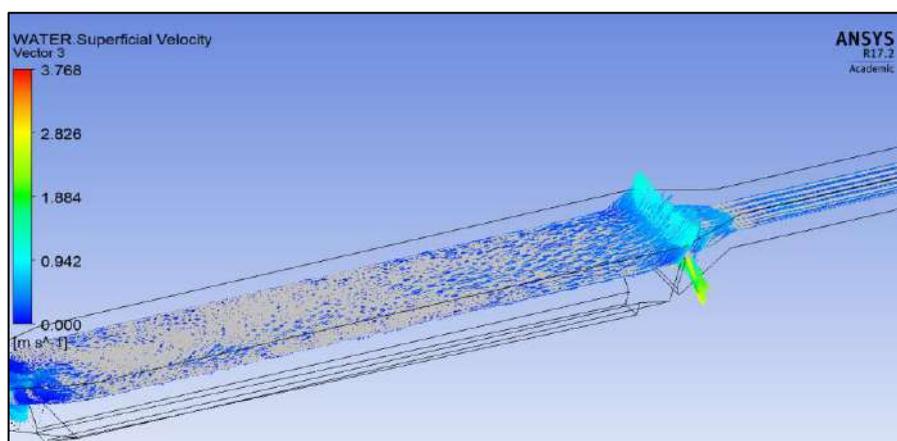


Figura 102. Vectores del flujo del agua en la nave del desarenador usando ANSYS CFX.

Fuente: Elaboración propia

Sección 4-4

En la Figura 103 se observa en la sección transversal del prototipo velocidades mínimas de 0.13 m/s y máximas de 0.38 m/s, las cuales se encuentra entre el rango de 0.3m/s - 0.4m/s. Por lo tanto, permite la decantación de partículas con diámetro aproximadamente de 0.2 mm.

En la Figura 104 se observa tanto en el prototipo como en la simulación un patrón de flujo no uniforme en la sección 4 de la nave desarenador Quiroz. Se visualiza presencia de turbulencia y vórtices suaves en la simulación.

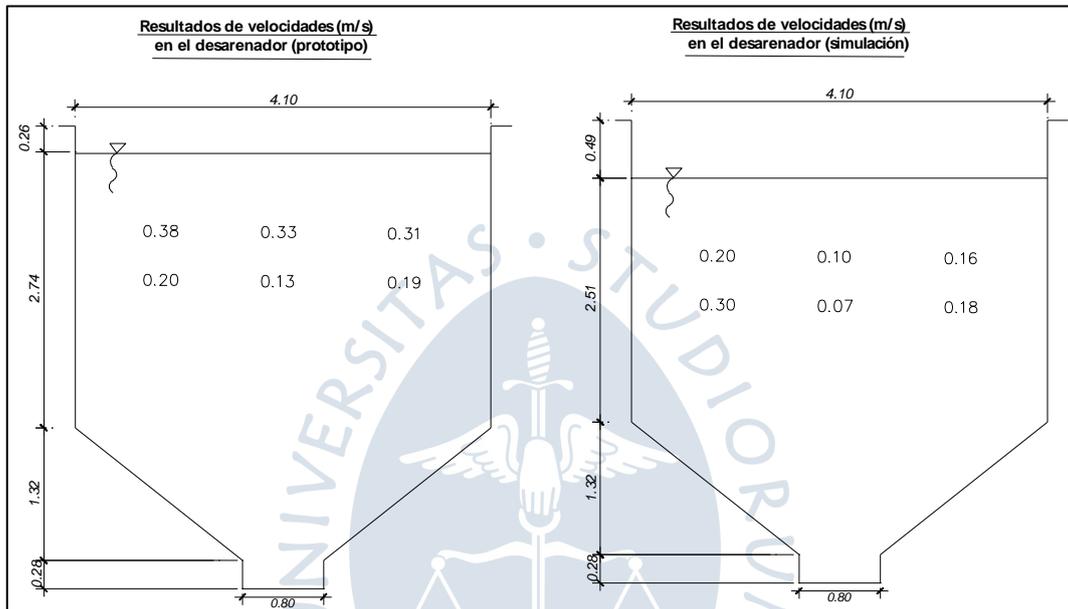


Figura 103. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador.
Fuente: Elaboración propia

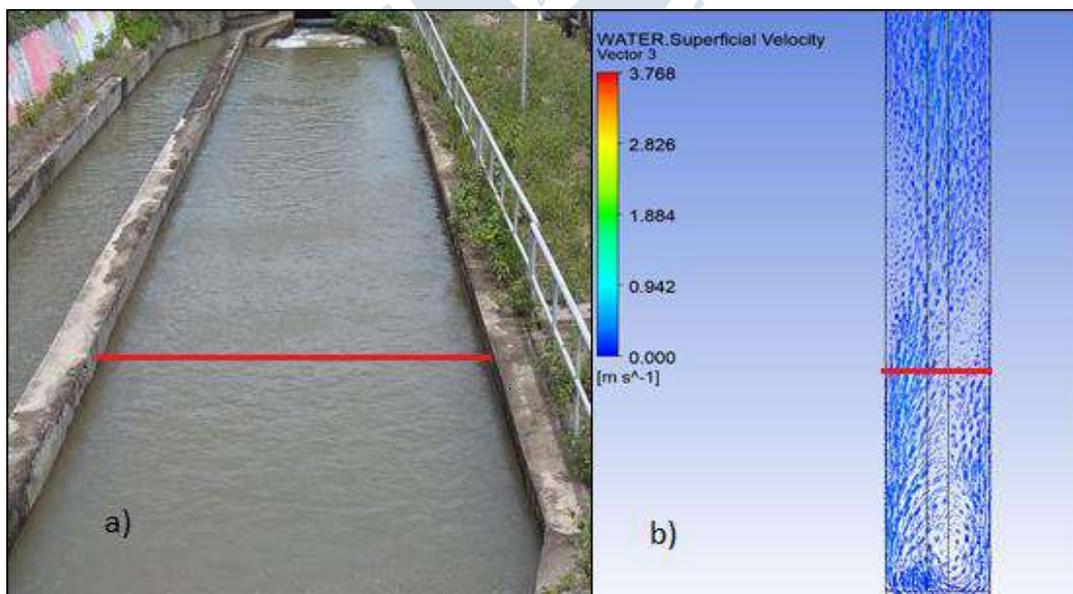


Figura 104. Flujo del agua a) En el prototipo b) En la simulación.
Fuente: Elaboración propia

Sección 5-5

En la Figura 105 se observa velocidades similares que transitan en la sección transversal 5 en el prototipo y en la simulación, respectivamente. En esta zona la velocidad promedio del prototipo y de la simulación es de 0.17 m/s y 0.13 m/s respectivamente.

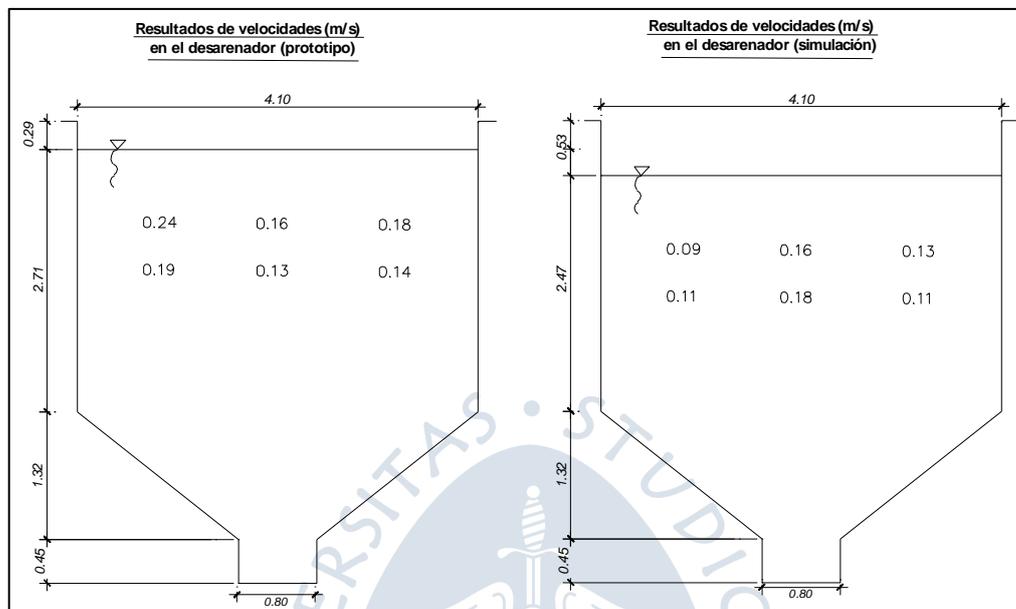


Figura 105. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador. (Sección 5-5)
Fuente: Elaboración propia

Datos en el prototipo

Velocidad promedio = 0.17 m/s

$$Q = V \times A$$

$$Q = 0.17 \text{ m/s} \times 2.71 \text{ m} \times 4.1 \text{ m}$$

$$Q = 1.88 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{canal de desvío}} = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{total}} = 2.08 \text{ m}^3/\text{s}$$

Datos en la simulación

Velocidad promedio = 0.13 m/s

$$Q = V \times A$$

$$Q = 0.13 \text{ m/s} \times 2.47 \text{ m} \times 4.1 \text{ m}$$

$$Q = 1.31 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Figura 106 se observa tanto en el prototipo como en la simulación un patrón de flujo uniforme cerca de la zona de transición de salida de la nave desarenador Quiroz. No presenta turbulencia y vórtices en dicha sección de la nave, está trabajando de manera eficiente, por ende, no estaría ocurriendo arrastre de sedimentos en el flujo de salida del desarenador.

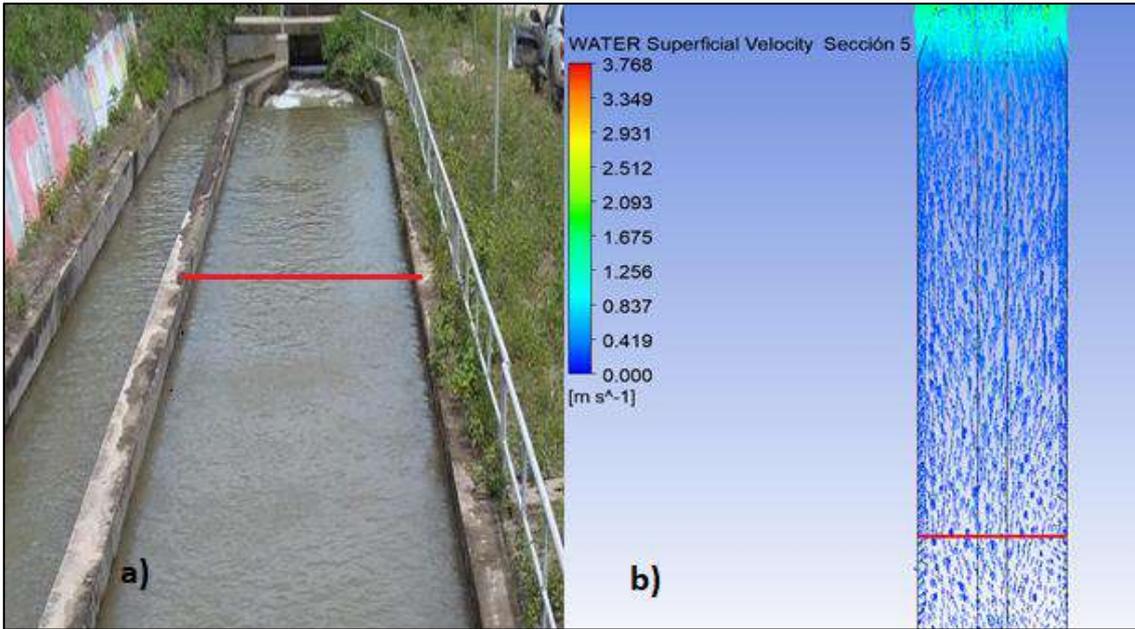


Figura 106. Flujo del agua a) En el prototipo b) En la simulación
Fuente: Elaboración propia

Sección 6-6

Con las velocidades observadas en la Figura 107 se obtuvieron velocidades promedio para determinar el caudal de salida del desarenador en el prototipo y simulación respectivamente.

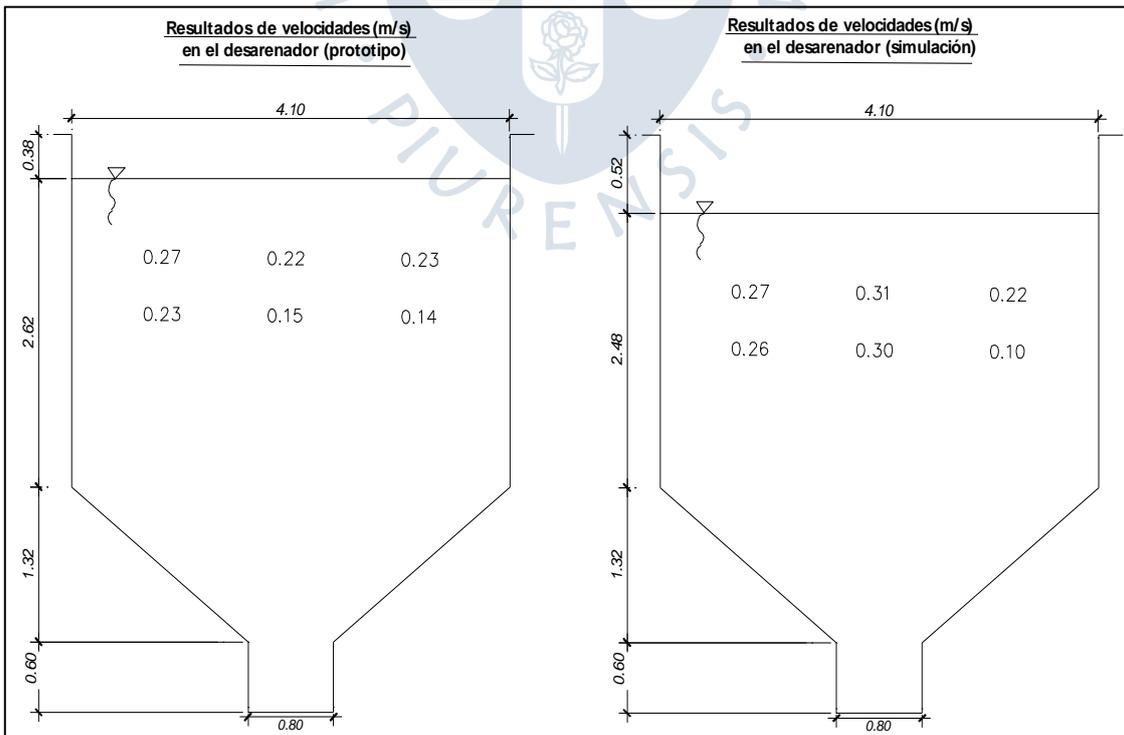


Figura 107. Velocidades en la sección transversal de la nave del desarenador. (Sección 6-6)
Fuente: Elaboración propia

Datos en el prototipo

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = 0.21 \text{ m/s}$$

$$Q_{\text{salida}} = V \times A$$

$$Q_{\text{salida}} = 0.26 \text{ m/s} \times 2.62 \text{ m} \times 4.10 \text{ m}$$

$$Q_{\text{salida}} = 2.26 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{canal de desvío}} = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{salida total}} = 2.46 \text{ m}^3/\text{s}$$

Datos en la simulación

$$\text{Velocidad}_{\text{promedio}} = 0.243 \text{ m/s}$$

$$Q_{\text{salida}} = V \times A$$

$$Q_{\text{salida}} = 0.243 \text{ m/s} \times 2.48 \text{ m} \times 4.10 \text{ m}$$

$$Q_{\text{salida total}} = 2.47 \text{ m}^3/\text{s}$$

Las velocidades entre la sección 5 y sección 6 muestran resultados similares. Es por ello por lo que se puede decir que la distribución del flujo al inicio de la nave del desarenador es simétrica.

En la Figura 108 continúa ocurriendo el mismo comportamiento hidráulico que la Figura 106. Desde el punto de vista de la aplicación práctica de los resultados cualitativos y cuantitativos, ANSYS CFX simuló correctamente las velocidades y el patrón de flujo en el desarenador Quiroz, considerando los resultados aceptables y de gran utilidad durante un estudio real. Por lo tanto, se concluye que este modelo numérico logra simular la realidad.

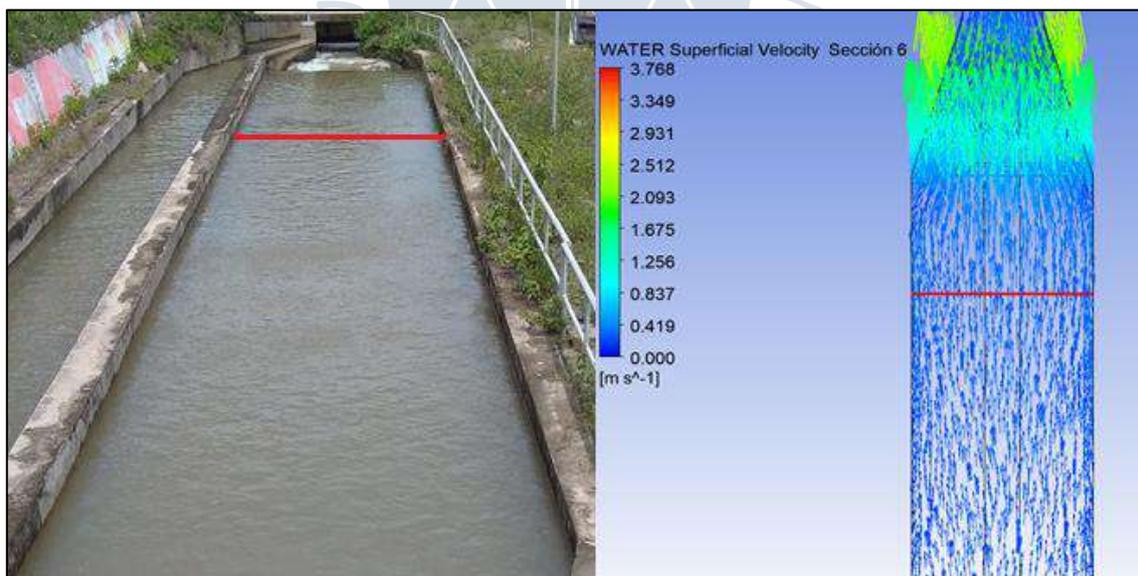


Figura 108. Flujo del agua a) En el prototipo b) En la simulación
Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

- ANSYS CFX simuló adecuadamente el patrón de flujo en el desarenador Quiroz habiéndole ingresado datos de prototipo de velocidades y niveles de agua en la transición de entrada de la nave. Los resultados de velocidades y patrón de flujo en todo el desarenador obtenidos se consideran aceptables y de gran utilidad durante un estudio real.
- En el cuerpo central del desarenador las velocidades más altas obtenida se encuentran entre 0.30 – 0.40 m/s, lo cual permite la decantación de partículas con diámetro aproximado de 0.2 mm, esto quiere decir que las partículas a partir de 0.2mm de diámetro se quedan en el desarenador.
- No se aprecia remanso en el canal de ingreso, ni en el prototipo ni en la simulación numérica, esto es un indicador favorable, ya que no se estaría generando sedimentación en el canal.
- La presencia de rejillas tranquilizadoras en la entrada de la nave del desarenador funcionó como se esperaba, reflejó una distribución uniforme del flujo, tanto en la modelación numérica como en el prototipo. La disminución de energía cinética turbulenta evitó la formación de vórtices aguas arriba y aguas abajo del desarenador.
- Los resultados obtenidos en la modelación numérica y el prototipo muestran pérdida de velocidad en la entrada de la nave del desarenador, por la existencia de las rejillas tranquilizadoras. En el prototipo y en la modelación numérica disminuyen 60.87 % y 86.21 % respectivamente, se demuestra que las rejillas tranquilizadoras reducen la energía cinética del flujo en el desarenador de la Central Hidroeléctrica María Auxiliadora del río Quiroz.
- En la zona de transición de salida de la nave del desarenador se mostraron en la sección 5 y 6 velocidades similares, por lo tanto, se puede afirmar que el patrón de flujo es simétrico. Además, al identificar en estas mismas secciones semejanza en los resultados

cualitativos y cuantitativos desarrollados por el prototipo y la simulación numérica, se puede decir que el modelo numérico logró simular la realidad.

- La existencia de filtración en el canal *by pass* a compuerta cerrada, hace necesario realizar correcciones en los resultados del prototipo para que los resultados sean comparables.
- De acuerdo a las velocidades ingresadas en la nave del desarenador Quiroz (caudal de diseño de $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$), estas permiten decantar las partículas, por lo tanto, se concluye que el desarenador se comporta de manera eficiente, sin embargo, el funcionamiento real es deficiente.



Recomendaciones

- Realizar la modelación numérica en el desarenador de la C.H. María Auxiliadora del río Quiroz para analizar el comportamiento hidráulico, considerando un nuevo escenario teniendo la compuerta de entrada de la nave del desarenador y compuerta de purga totalmente abiertas. Para posteriormente comparar valores de velocidades y patrón de flujo con datos obtenidos de investigaciones pasadas.
- Realizar la reparación de las fisuras en el canal del río Quiroz para evitar problemas de filtraciones y pérdidas de caudales en el transcurso del cauce.
- Se podría mejorar la eficiencia del funcionamiento del desarenador de la C.H. María Auxiliadora del río Quiroz instalando otra nave de decantación y eliminando el canal de *by pass*. Electronoreste brindó una información en el que afirma “que es casi seguro que los sólidos que alcanzan la cámara de carga y las turbinas de la hidroeléctrica han ingresado al canal de derivación a través del canal de desvío, durante los lavados de la nave del desarenador”. Se sugiere realizar una modelación numérica e investigaciones en campo de un desarenador con dos naves para verificar la eficiencia de funcionamiento de la nave de decantación de la estructura actual.
- Se recomienda realizar mediciones tanto de caudal líquido y caudal sólido en el canal de derivación para certificar la conclusión anterior.

Referencias bibliográficas

Ansys CFX 17.2. (2017).

Arteaga, F. (2017). *Análisis Hidráulico de la Bocatoma María Auxiliadora del río Quiroz con modelo numérico tridimensional (ANSYS CFX). Tesis de título.* Universidad de Piura, Perú.

Atoche, J. (2003). *Aplicación del modelo numérico SSIIM para simular el patrón de flujo en el desarenador Quiroz.* Universidad de Piura, Perú.

Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Manual criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico.* Lima, Perú.

Bakker, A. (2002). *The Colorful Fluid Mixing Gallery. Obtenido de Course materials for the Computational Fluid Dynamics.* Obtenido de <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>

Barceló, J. (1996). *Simulación de sistemas Discretos.* 1era Edición, España.

Barreto, C. (2015). *Investigación hidráulica utilizando un modelo numérico 3D de la presa tablones Alto - Chinecas. Tesis de título.* Universidad de Piura, Perú.

Bernal, I. (2010). *Corrientes Parásitas.* Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Casa, E. (2016). *Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD). Programa FLOW-3D.* Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Cegel & Cimbalá. (2006). *Mecánica de fluidos- Fundamentos y aplicación.*

Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente. (2005). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores.* Lima, Perú.

Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente. (2005). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores.* Lima, Perú.

CFD On line. (1994-2013). *Online center for Computacional Fluid Dynamics. En línea internet.* Obtenido de <http://www.cfd-online.com/>

- Coronado, F. (1992). *Diseño y Construcción de Canales*. Lima, Perú.
- Coronado, F. (1998). *El Desarenador*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Coronado, F. (2004). *El desarenador, una guía para su diseño hidráulico*.
- Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng & Kresta. (2004). *Handbook of industrial Mixing Science and Practice*.
- ELECTRONOROESTE S.A - ENOSA . (Diciembre de 2001). Aprovechamiento Hidroeléctrico del río Quiroz . *CH. María Auxiliadora del Quiroz, diseño según construcción: Desarenador entrada, planta y secciones*.
- ELECTRONOROESTE S.A. (2013). *Elaboración del estudio definitivo para la ampliación de 1.6 a 3.6 MW de la C.H María Auxiliadora del Quiroz*.
- Engelman, M. S. (1978). *Advances in Engineering Software*.
- Fernández, J. (2012). *Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos*. España.
- Frías, E. (2004). *Aportes al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. España: Departamento de Ingeniería Eléctrica UPC.
- García, A. (2006). *Introducción a la simulación de sistemas discretos*.
- Herrera, L. (2011). *Modelación numérica del concreto simple con elementos finitos usando un modelo constitutivo de daño*. Bogotá, Colombia.
- Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria. (1994). *Investigación en modelo hidráulico del desarenador par la Central Hidroeléctrica en el río Quiroz*. Universidad de Piura, Perú.
- Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria. (2002). *Diagnóstico de la situación y recomendaciones para el funcionamiento adecuado y para una futura ampliación de la Infraestructura de la C.H. María Auxiliadora del Quiroz*. Universidad de Piura, Perú.
- Joel. H. Ferziger/ Milovan Peric. (2002). *Computacional Methods for Fluid Dynamic. 3rd Edition*. Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Launder and Spalding. (1974). *The Numerical Computation of Turbulence Flow, Comp. Meth. In Appl. Mech. And Engineering*.
- Maza, J. (1984). *Hidrodinámica, bases para la hidráulica fluvial*. Ciudad Unversitaria, Mexico.
- Miloradovic, M. (2010). *Funcionamiento del desarenador de la C.H María Auxiliadora del Quiroz*.

- Monje, C. (2017). *Modelo Numérico de un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el Software Ansys CFX y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM. Tesis de pregrado.s.* Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Norma técnica E.030 Diseño Sismoresistente. (2014). Obtenido de <https://www.igp.gob.pe/version-anterior/norma-e030-diseno-sismorresistente>
- Park. (2009). *Estudio del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante el programa Ansys CFX V.14.0.*
- Ruiz, C. (2016). *Calibración Hidráulica del desarenador San Gabán analizando modelos de turbulencia con TELEMAC- 3D. Tesis de título.* Universidad de Piura,Perú.
- Sánchez, J. (2004). *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas.* Sevilla, España.
- Sydor, k. (2016). *Agua y ambiente FLOW - 3D.* Obtenido de <https://flow3d.co/wp-content/uploads/2016/06/Flow3D-Spanish.pdf>
- Universidad de Piura. (1994). *Investigación en el modelo hidráulico del desarenador para la central hidroeléctrica en el río Quiroz.*
- Universidad de Piura. (2002). *Diagnóstico de la situación y recomendaciones para el funcionamiento adecuado y para una futura ampliación de la estructura de la central Maria Auxiliadora Quiroz.* Piura, Perú.
- Vásquez, J. (2003). *Modelación numérica en hidráulica.* Obtenido de [hpp://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf](http://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf)
- Villón, M. (2005). *Diseño de estructuras hidráulicas (Segunda Ed.).* Lima,Perú.
- Wilcox, D. (1998). *Turbulence Modeling for CFD.* California.

Anexos



Anexo A. Creación de la geometría Ansys

ANSYS *Workbench* es una herramienta de gestión que permite administrar los proyectos de simulación y se encarga de la comprobación gráfica del desarrollo de estos. Ésta presenta una interfaz de nivel superior que unifica las herramientas pertenecientes a distintos softwares en un solo programa.

ANSYS *Workbench* administra el paso de la información de la geometría, mallado, solucionador y post-procesamiento a través de los distintos programas que pertenecen al ANSYS.

La interfaz que presenta el ANSYS *Workbench* se muestra en la Figura A.1, en ella se pueden observar los distintos espacios de trabajo que se explicarán a continuación.

- *Toolbox* (caja de herramientas): Es el lugar donde encontramos los distintos programas o softwares que nos permiten realizar las simulaciones de dinámica de fluidos, estructuras mecánicas, electromagnéticas y sistemas multifásicos.

En esta zona se encuentran varias pestañas como se observa en la Figura A.2:

- *Analysis systems* -Sistemas de análisis
- *Components systems* -Sistema del componente
- *Customs systems* -Sistemas personalizados
- *Design exploration* -Diseño de exploración
- *External connection systems*-Sistemas de Conexión externa

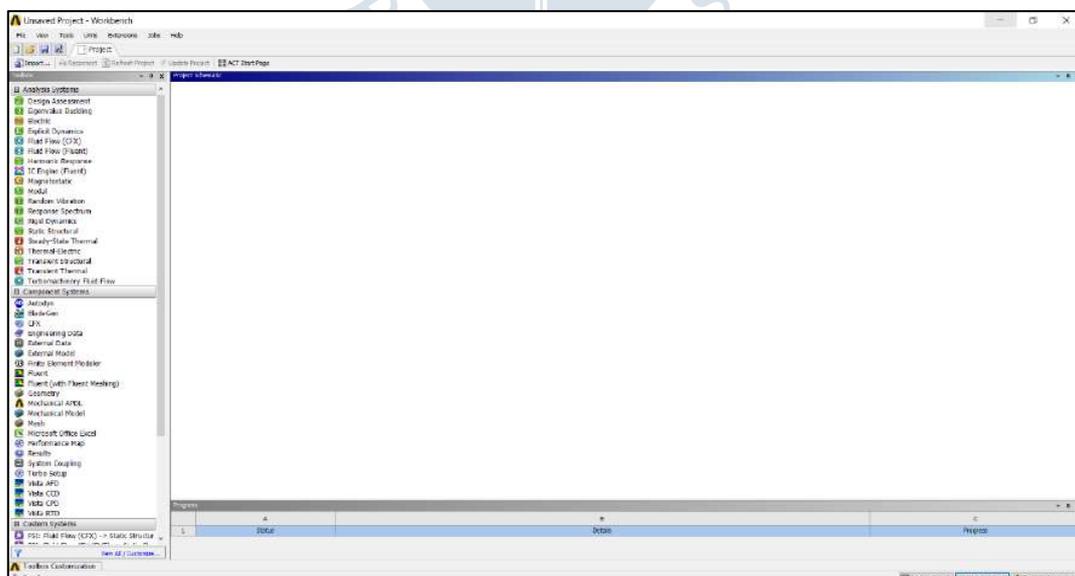


Figura A.1. Interfaz de Ansys Workbench.

Fuente: Elaboración propia

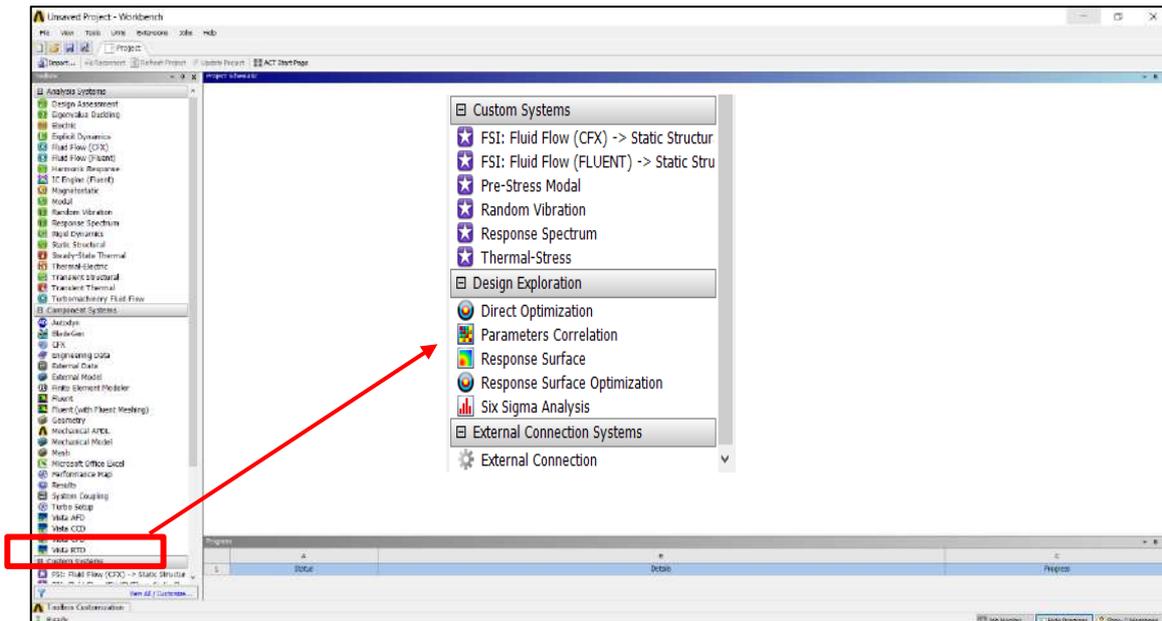


Figura A.2. Pestañas de las cajas de herramientas.

Fuente: Elaboración propia

Entre las más destacables están: *Analysis Systems* (sistemas de análisis), que son “paquetes” que incluyen todas las distintas herramientas que conforman el esquema del proyecto; y *Component Systems* (sistemas de componentes), lugar donde se encuentran las herramientas mencionadas anteriormente de manera individual, el usuario es el encargado de entrelazarlas para darle forma al esquema del proyecto.



Figura A.3. Project Schematic (Esquema del proyecto)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura A.3 es la ventana en el cual son colocados los sistemas de análisis y sistemas de componentes para llevar a cabo el proyecto.

Se debe arrastrar un paquete ya estructurado de herramientas desde la pestaña “*Analysis Systems*” o se puede establecer una cadena de trabajo con las distintas herramientas individuales que se encuentran en la pestaña de “*Component Systems*”; ambas formas permiten realizar un análisis típico de un proyecto.

Significado de los símbolos de las celdas de estado

Una vez colocadas las herramientas a utilizar dentro del esquema del proyecto se puede observar que aparecen símbolos al lado derecho de sus respectivos nombres, estos símbolos son conocidos como estados de celda que, sirven para describir el estado en el que se encuentran cada una de las etapas o herramientas.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
✓	Actualizado. Se ha comprobado sin problemas.
🌿	Requiere actualizar. Existen cambios en los datos subidos.
🌿	Requiere actualizar. Existen cambios en los datos locales.
💡	Sin rellenar. No se ha subido Información.
🔔	Requiere atención.
🔧	Solucionando.
🚫	Actualización fallida.
🛑	Actualización interrumpida.
🔄	Cambios pendientes. Estaba actualizado pero se cambió la información

Figura A.4. Significado de los símbolos de las celdas de estado.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta un diagrama de flujo, explicando, de manera general, la secuencia de la metodología a desarrollar.



Figura A. 5. Diagrama dl flujo del programa Ansys.

Fuente: Elaboración propia

- **Geometría:** preprocesamiento Ansys cfx, equivalente a la creación de la geometría.
- **Malla:** Se genera el mallado de la geometría realizada.
- **Setup:** Se definen los parámetros de condiciones de bordes, propiedades del fluido, el modelo de turbulencia y configuración de resultados adquiridos.
- **Solver o solución:** Genera análisis del sistema. Este módulo se encarga de utilizar la configuración establecida en el pre-procesamiento para resolver ecuaciones que describen el fenómeno natural mediante repeticiones.
- **Resultados:** Visualización de los resultados obtenidos en solución, se puede analizar de forma gráfica o numéricamente en una, dos o tres dimensiones según se requiera.

La Figura A. 6 muestra *project schematic* y es aquí donde se configura cada etapa del proceso.

Se puede habilitar la visualización de los archivos creados en el menú View o Files, para identificar cada uno de los archivos individuales creados en cada una de las etapas del proyecto.

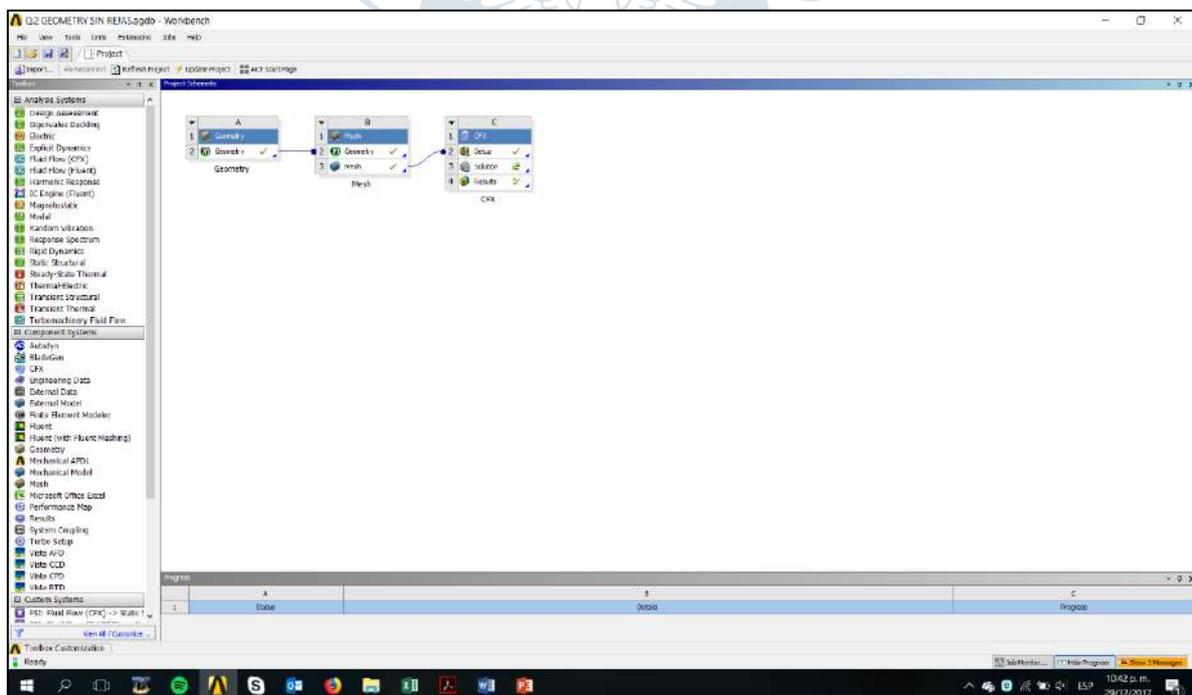


Figura A. 6. Ventana de visualización de archivos.

Fuente: Elaboración propia

Forma de ingreso al DesignModeler

Para realizar la creación de la geometría a modelar es necesario el uso de la herramienta o subprograma incluido en el ANSYS conocida como *DesignModeler*, al cual podemos acceder al hacer doble click en la celda *Geometry* o mediante la primera opción del cuadro que aparece al hacer click derecho en la misma celda como se observa en la Figura A. 7.

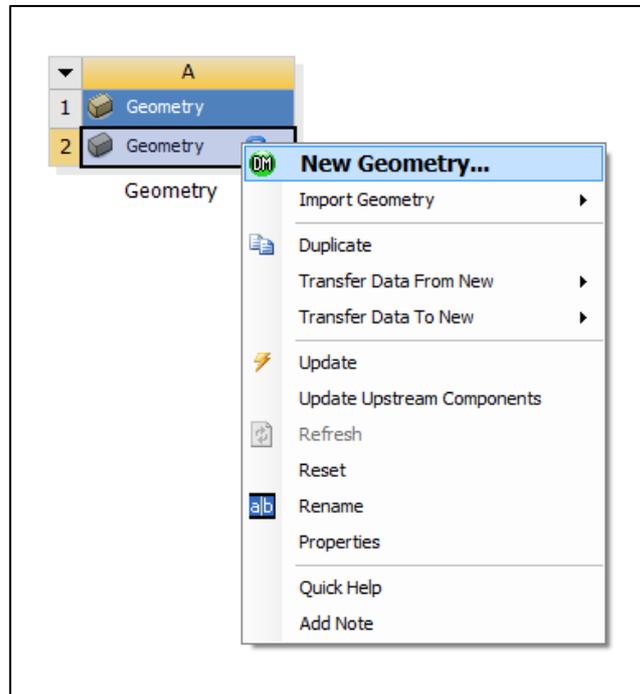


Figura A. 7. Creación de nueva geometría.
Fuente: Elaboración propia

DesignModeler es una herramienta que permite:

- Importar modelos CAD para el pre-procesamiento.
- Simplificar o modificar la geometría de manera sencilla prepararla para el posterior mallado.
- Permite crear cuerpos conjuntos para luego mallarlos por separado, siempre que los cuerpos pertenezcan a un mismo sólido pueden facilitar la malla estructurada y mixta. Por lo contrario, al exportarlos de otro programa toda la geometría se reconoce como un solo cuerpo, por lo que es difícil editarlo.

La interfaz que presenta el *DesignModeler* se muestra en la Figura A. 7, en ella se pueden observar los distintos espacios de trabajo que se explicarán a continuación.

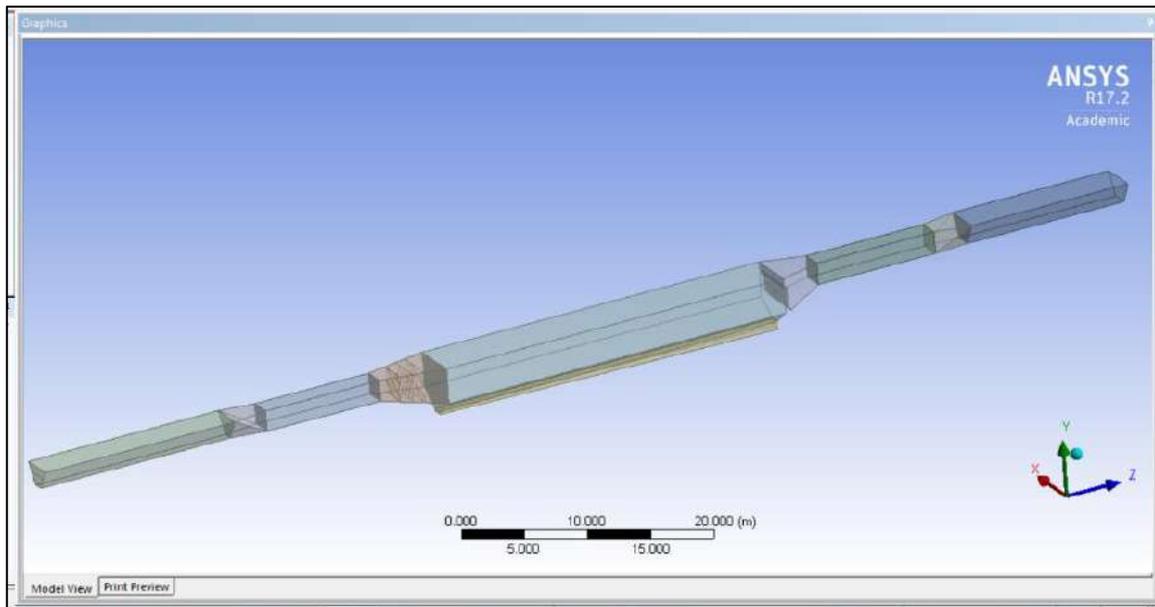


Figura A. 8. Geometría del desarenador de la C.H. María Auxiliadora.
Fuente: Elaboración propia

