



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Simulación del flujo del salto de esquí y de la poza de
disipación debido a un mal funcionamiento en la disipación
de energía ocasionado por un obstáculo frontal al
Reservorio Poechos utilizando el programa Ansys CFX**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Brayand Daniel Mendoza Cruzado

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

Piura, setiembre de 2022

NOMBRE DEL TRABAJO

**TESIS CFD Poechos - BDMC levantamien
to de observaciones.docx**

AUTOR

Brayand Mendoza

RECuento DE PALABRAS

19882 Words

RECuento DE CARACTERES

104818 Characters

RECuento DE PÁGINAS

126 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

24.1MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 20, 2022 5:19 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 20, 2022 5:32 PM GMT-5**● 5% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 3% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)

Dedicatoria

*A mis padres Audberto y Lola y a mis hermanos,
por su cariño y apoyo incondicional en cada logro de mi vida.*





Agradecimientos

Agradezco a mi asesor Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar, por su apoyo, colaboración y orientación durante el presente trabajo de investigación y asimismo por cada una de sus valiosas enseñanzas.





Resumen

El Reservorio Poechos es la obra hidráulica más grande del Perú y es de gran importancia en la región debido a que regula las grandes avenidas del río en la temporada de verano, en los fenómenos de El Niño y El Niño Costero, abastece de recurso hídrico a los valles del Chira y Piura. Entre las estructuras que posee el reservorio, se tiene un aliviadero con tres compuertas radiales, que permiten la salida de un caudal máximo de $5400 \text{ m}^3/\text{s}$; el flujo es trasladado y entregado aguas abajo a través de un salto de esquí hacia una poza de disipación de energía; sin embargo el flujo impacta en un cerro ubicado al frente impidiendo una salida directa del fluido hacia el cauce del Río Chira, esto hace recircular el flujo en la poza de disipación y consecuentemente genera erosión en las proximidades de la cimentación de la presa. El objetivo principal es reproducir los fenómenos que ocurren en la poza de disipación y obtener información relevante sobre la erosión en las proximidades de los cimientos de la presa. El modelo ha sido elaborado en una escala 1/100 en el programa Ansys CFX, abarcando el salto de esquí y la poza de disipación, por lo tanto, los resultados obtenidos han sido convertidos mediante el uso de las fórmulas de Froude. Los resultados obtenidos muestran velocidades promedio de 1.6 m/s y velocidades máximas de hasta 6 m/s localizadas en las proximidades de la cimentación del reservorio, por lo tanto, se concluye la existencia de erosión ya que la superficie de la poza de disipación está conformada por suelos como grava arenosa, arena limosa y limos, estos materiales no resisten velocidades mayores a 0.5 m/s .



Tabla de contenido

Introducción	19
Capítulo 1	21
Reservorio Poechos	21
1.1 Definición.....	21
1.2 Estructuras de contingencia.....	26
1.2.1 Aliviadero de compuertas	26
1.2.2 Aliviadero de emergencia.....	26
1.2.3 Salida de fondo.....	26
1.2.4 Salida al canal de derivación Daniel Escobar	26
1.3 Operación del Reservorio Poechos	27
1.4 Afianzamiento del reservorio Poechos	29
Capítulo 2	31
Dinámica computacional de fluidos.....	31
2.1 Definición.....	31
2.2 Métodos numéricos de discretización	33
2.2.1 Método de diferencias finitas (FDM)	33
2.2.2 Método de elementos finitos (FEM)	33
2.2.3 Método de volúmenes finitos (FVM)	34
2.3 Teorema de transporte de Reynolds.....	34
2.3.1 Conservación de la masa	38
2.3.2 Conservación de momento	39
2.3.3 Conservación de la energía	44

2.4	Acoplamiento presión-velocidad en flujos constantes	46
2.4.1	El algoritmo Simple.....	46
2.4.2	El algoritmo SIMPLER	46
2.4.3	El algoritmo SIMPLEC	47
2.4.4	El algoritmo PISO	47
2.5	Turbulencia.....	47
2.5.1	Direct Numerical Simulation	49
2.5.2	Large Eddy Simulation	50
2.5.3	Reynolds Averaged Navier Stokes.....	51
2.5.3.1	Modelo de turbulencia k- ϵ	53
2.5.3.2	Modelo de turbulencia k-w.....	53
2.5.3.3	Modelo de turbulencia SST.....	53
2.6	Programas de simulación de fluidos	53
2.6.1	Ansys CFX.....	53
2.6.2	Ansys Fluent	54
2.6.3	ANSYS Discovery.....	54
2.6.4	Flow 3D.....	54
2.6.5	OpenFoam.....	55
Capítulo 3	57
Ansys CFX	57
3.1	Introducción a Ansys CFX	57
3.2	Fluidos multifásicos	58
3.2.1	Flujo multifásico Lagrangiano	58
3.2.2	Flujo multifásico Euleriano	58
3.2.2.1	Modelo no homogéneo.....	59
3.2.2.2	Modelo homogéneo.....	59
3.2.3	Flujo a superficie libre	59
3.3	Modelo multicomponente	59
3.4	ANSYS Workbench.....	59
3.5	Pre-Procesamiento.....	61

3.5.1 Geometría.....	61
3.5.2 Malla.....	61
3.5.2.1 Calidad del elemento.....	62
3.5.2.2 Relación de aspecto.....	62
3.5.2.3 Oblicuidad.....	63
3.5.2.4 Ortogonalidad.....	63
3.5.3 Physis.....	65
3.5.4 Configuración del Solver	65
3.6 Ejecución del solver.....	65
3.7 Pos-Procesamiento.....	65
Capítulo 4	67
Simulación numérica	67
4.1 Descripción del problema	67
4.2 Geometría.....	68
4.3 Malla.....	71
4.4 CFX-pre.....	75
4.4.1 Tipo de análisis.....	75
4.4.2 Configuración del dominio.....	75
4.4.3 Configuración de las condiciones de borde.....	79
4.4.4 Configuración del Solver	86
4.5 CFX-Solver.....	88
Capítulo 5	95
Artículo	95
Capítulo 6	105
Análisis de resultados.....	105
Conclusiones.....	119
Referencias bibliográficas.....	121
Anexos	123
Anexo A. Certificado de participacion.....	125
Anexo B. Visita técnica al Reservorio Poechos.....	127



Lista de tablas

Tabla 1. Niveles de espera del reservorio Poechos en años extraordinarios	28
Tabla 2. Niveles de espera del reservorio Poechos en años muy húmedos.....	28
Tabla 3. Niveles de espera del reservorio Poechos en años húmedos.....	29
Tabla 4. Niveles de espera del reservorio Poechos en años secos.....	29
Tabla 5. Parámetros de calidad.....	64
Tabla 6. Calidad del parámetro Skewnes.....	64
Tabla 7. Parámetros de calidad del mallado.....	73
Tabla 8. Ecuaciones de similitud de Froude.....	106



Lista de figuras

Figura 1. Obras ejecutadas durante la Primera etapa del PECHP.....	22
Figura 2. Vista en planta del Reservorio Poechos.....	22
Figura 3. Geología en la Represa Poechos.....	24
Figura 4. Geología en la zona de emplazamiento de la Represa Poechos.....	25
Figura 5. Volumen de control.....	32
Figura 6. A la izquierda se ilustra un sistema y a la derecha un volumen de control.....	35
Figura 7. Relación entre un sistema y un volumen de control.	36
Figura 8. Representación de un volumen de control.....	37
Figura 9. Comportamiento reológico de los fluidos (a la izquierda), relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad (a la derecha).	43
Figura 10. Velocidad instantánea en un punto al interior de un flujo turbulento.	48
Figura 11. Rendimiento de las computadoras (Flops)	49
Figura 12. Alcance de los modelos de turbulencia en la simulación de flujos turbulentos. ...	49
Figura 13. Modelo de un chorro con simulación DNS.	50
Figura 14. Modelo de un chorro con simulación LES.....	50
Figura 15. Cascada de energía en modelos LES.	51
Figura 16. Modelo de un chorro con simulación RANS.	51
Figura 17. Variación de la velocidad a lo largo del tiempo en un punto del espacio.	52
Figura 18. Etapas de la simulación en Ansys CFX.....	57
Figura 19. A la izquierda los análisis de sistemas. A la derecha los componentes de sistemas.	60
Figura 20. Flujo de trabajo en Ansys Workbench.	61
Figura 21. Relación de aspecto de una celda de forma cuadrada y triangular.	62

Figura 22. Triángulos y cuadriláteros ideales y sesgados.	63
Figura 23. Vectores utilizados para calcular la calidad ortogonal de una celda.	64
Figura 24. Recirculamiento en la poza de disipación	67
Figura 25. Sistema de análisis Ansys CFX.	68
Figura 26. Herramientas usadas en la elaboración del modelo CAD.....	70
Figura 27. Geometría del modelo	71
Figura 28. Configuración global del mallado.....	72
Figura 29. Configuración local del mallado (Body sizing - 0.035m)	72
Figura 30. Calidad del elemento	73
Figura 31. Relación aspecto	73
Figura 32. Oblicuidad	74
Figura 33. Ortogonalidad	74
Figura 34. Mallado de la geometría	74
Figura 35. Análisis estable del modelo.....	75
Figura 36. Ángulo en el fluido primario entre la interfase y la pared.....	76
Figura 37. Configuración básica del dominio.....	77
Figura 38. Configuración de los modelos del dominio.....	78
Figura 39. Fluid pair Models.....	79
Figura 40. Configuración de la condición de borde entrada	80
Figura 41. Ubicación de la condición de borde entrada	81
Figura 42. Configuración de la condición de borde salida	82
Figura 43. Ubicación de la condición de borde salida	82
Figura 44. Configuración de la condición de borde superficie libre	83
Figura 45. Ubicación de la condición de borde superficie libre.....	83
Figura 46. Configuración de la condición de borde concreto.....	84
Figura 47. Ubicación de la condición de borde concreto	84
Figura 48. Configuración de la condición de borde arena	85
Figura 49. Ubicación de la condición de borde arena.....	85
Figura 50. Configuración de la condición de borde región de interés.....	85
Figura 51. Ubicación de la condición de borde región de interés.	86

Figura 52. Configuración del solucionador	87
Figura 53. Configuración de la ejecución de la solución del modelo.....	88
Figura 54. Particiones realizadas a la ejecución de la solución	89
Figura 55. Valores residuales promedio de las ecuaciones de volumen y momento del fluido	90
Figura 56. Valores residuales promedio del modelo de turbulencia.....	90
Figura 57. Valores residuales promedio de la ecuación de continuidad	91
Figura 58. Imbalances de las ecuaciones de conservación	92
Figura 59. Imbalances de la ecuación de momento en los ejes X, Y y Z	92
Figura 60. Imbalances de la ecuación de continuidad	93
Figura 61. Resumen de los imbalances de las ecuaciones de conservación	93
Figura 62. Estado de la solución.....	93
Figura 63. Plano ubicado a 100 m del aliviadero de compuertas.....	106
Figura 64. Resultados de la velocidad promedio.....	107
Figura 65. Ubicación de la parte superior del tirante de agua.	107
Figura 66. Ubicación de la parte inferior del tirante de agua.....	108
Figura 67. Vista isométrica de la fracción volumétrica del agua.	109
Figura 68. Vista lateral de la fracción volumétrica del agua.....	109
Figura 69. Vista isométrica de la fracción volumétrica del agua en todo el dominio	109
Figura 70. Vista lateral de la fracción volumétrica del agua en todo el dominio	110
Figura 71. Líneas de corriente de velocidad en la poza de disipación.....	111
Figura 72. Vectores de velocidad en la poza de disipación	111
Figura 73. Contorno de velocidad a la salida del modelo.....	112
Figura 74. Vectores de esfuerzo de corte en la región de interés.....	112
Figura 75. Contornos de esfuerzo de corte en la región de interés	113
Figura 76. Esfuerzos de corte promedio en la región de interés.....	113
Figura 77. Vectores de velocidad en la región de interés.....	114
Figura 78. Velocidad promedio en la región de interés.....	115
Figura 79. Isosuperficie de velocidad 6 m/s.....	115
Figura 80. Cota de la velocidad máxima en la región de interés	116

Figura 81. Isosuperficie de velocidad 4 m/s.....	116
Figura 82. Isosuperficie de velocidad 3 m/s.....	117
Figura 83. Isosuperficie de velocidad 2 m/s.....	117
Figura 84. Isosuperficie de velocidad 1 m/s.....	118
Figura 85. Velocidad máxima que alcanza el chorro de agua luego de ser impulsado por el salto de esquí.....	118



Introducción

En la actualidad el modelamiento numérico de estructuras hidráulicas, tales como obras de regulación, trasvases, obras de regadío, obras de saneamiento y drenaje urbano, entre otras, permite la solución de problemas hidráulicos complejos; convirtiéndose en la herramienta predilecta para simular el comportamiento de los fluidos en las estructuras, gracias a la reducción de tiempo, costos y estudios de mayor generalidad que permiten obtener información de diferentes variables como velocidades, turbulencia, vorticidad, esfuerzos de corte, etc. en todo el dominio, resultando una gran ventaja en comparación a los modelos físicos, en los cuales es difícil de obtener.

Si bien es cierto que no existe una solución a las ecuaciones de Navier Stokes, las cuales rigen el comportamiento de los fluidos; el crecimiento computacional acelerado de ordenadores y de modelos numéricos tridimensionales cada vez más sofisticados y precisos, permiten abordar problemas complejos, resultando ser de gran utilidad en el diseño y comprobación de las estructuras hidráulicas.

El presente trabajo de investigación está conformado por cinco capítulos los mismos que se describen a continuación:

El primer capítulo se centra en brindar un panorama del Reservorio Poechos en el que se describe su importancia para los valles del Chira y Piura, las estructuras que lo conforman y las reglas de operación bajo las cuales se rige actualmente.

El segundo capítulo describe los fundamentos de la dinámica de fluidos computacional, comprendiendo su definición, los métodos de discretización, el teorema de transporte de Reynolds, las ecuaciones de transporte, algoritmos de acoplamiento presión-velocidad, la turbulencia y programas de dinámica de fluidos computacional con un alcance tridimensional.

El tercer capítulo explica cada una de las etapas de la simulación y brinda los conceptos que permiten catalogar al modelo como un flujo multifásico euleriano a superficie libre, capaz de desarrollarse en Ansys CFX.

El cuarto capítulo presenta una descripción del problema y su posterior desarrollo en cada una de las etapas de simulación, esta comprende la elaboración de la geometría; el

mallado; la configuración del dominio, las condiciones de borde y del solucionador; la configuración de la ejecución del solver.

El quinto capítulo contiene el artículo presentado al 39th IAHR World Congress, que se llevó a cabo del 19 al 24 de junio en la ciudad de Granada-España.

Finalmente, el sexto capítulo presenta los resultados obtenidos de la simulación, por ejemplo, vectores y contornos en la región denominada “región de interés” (zona próxima a los cimientos de la presa), además de líneas de corriente, isosuperficies, etc, a partir de los cuales se puede concluir la existencia de erosión, pues la velocidad máxima y promedio superan los 0.5 m/s que resisten los suelos arenosos y además el esfuerzo de flujo supera al esfuerzo resistente.



Capítulo 1

Reservorio Poechos

1.1 Definición

El Reservorio Poechos se encuentra ubicado en el cauce del Río Chira, específicamente a 40 km al Noreste de la ciudad de Sullana del departamento de Piura-Perú.

Esta importante obra hidráulica forma parte del Proyecto Especial Chira Piura (PECHP), cuya ejecución fue declarada de manera prioritaria y de interés nacional mediante el Decreto ley N°17463 durante el gobierno del expresidente Juan Velasco Alvarado. El proyecto fue construido en tres etapas, siendo en la primera en la que se construyó el reservorio junto al canal de derivación Daniel Escobar de 54 km de longitud y una capacidad de 70 m³/s y una red de 452 km de drenes troncales en el Bajo Piura, está empezó a ejecutarse el 24 de junio de 1972 y finalmente puesto en operación en el año de 1976 (Proyecto Especial Chira Piura, 2021), ver Figura 1.

El Reservorio está conformado por una presa de tierra que posee una altura de 48 m alcanzando una cota de 108 m.s.n.m. en la corona y extendiéndose a lo largo de 11 km, conformando un embalse de 1000 MMC (millones de metros cúbicos) de capacidad en su etapa inicial.

Entre las razones por las que el reservorio es muy importante se tiene: permite regular las grandes avenidas del Río Chira en épocas de verano y de fenómenos como EL niño y El Niño Costero y en consecuencia evita inundaciones en los valles del Chira; almacena y posteriormente abastece de recurso hídrico a los valles del Chira y Piura, irrigando 100 mil hectáreas de cultivo, permitiendo el incremento de cultivos e introducción de nuevos cultivos con calidad de exportación como el banano orgánico, caña de azúcar, uva, etc.; genera energía eléctrica a través de las centrales hidroeléctricas, Poechos I, Poechos II y Curumuy, produciendo 16, 12 y 13 MW (Megawatts) respectivamente (Proyecto Especial Chira Piura, 2021); además provee a 774 mil habitantes de agua potable (El Regional piura, 2015)

Actualmente el reservorio se enfrenta a graves problemas, tal es el caso de la pérdida del 50% de su capacidad, debido a la colmatación de sedimentos que son acarreados

durante las grandes avenidas y fenómenos extraordinarios que luego son depositados en este mismo, otro problema y no menos importante del cual trataremos en esta investigación es la erosión en las proximidades de los cimientos de la presa, producto del recirculamiento del agua en la poza de disipación luego de que le flujo evacuado por el salto de esquí impacte contra un cerro ubicado al frente del mismo, ver Figura 2.



Figura 1. Obras ejecutadas durante la Primera etapa del PECHP

Fuente: (Proyecto Especial Chira Piura, 2021)



Figura 2. Vista en planta del Reservorio Poechos

Fuente: (Google Earth, 2021)

Teniendo presente el “Estudio de factibilidad del proyecto de almacenamiento y derivación Chira -Piura”, la geología existente en el cauce del Río Chira, específicamente en la zona de emplazamiento de la Represa Poechos, se presenta en la Figura 3 y en la

Figura 4; en ellas se observa que el cauce se conforma de aluviones (Qal) en la parte superior, de formaciones del Chira terciarias (Tc) en la parte inferior subyacente a los aluviones y de depósitos de terraza (Qt) a los costados del cauce, estos y otros suelos existentes se detallan a continuación:

- Aluvión (Qal): Está conformado por arena permeable y grava recubiertas por una capa de limos de 20 m aproximadamente. El nivel freático se encuentra alrededor de los 20 m.
- Depósitos de terraza (Qt): Conformado de grava arenosa e incluso cantos rodados, además de finos de arcilla y capas de arena.
- Gravas (Qt): Gravas que poseen sobre si mismas una capa de arcilla de unos 20 m aproximadamente.
- Formación Chira terciaria (Tc): Capas de piedra de limo arenosas y piedra arenisca limosa con cantidades de conglomerados limosos.
- Formación pelados terciaria (Tp): Predomina la breccia de toba andesítica y basalto con algunas capas de roca metasedimentaria inclinada 45 a 50 grados.
- Pizarras Cretac AS (Ks): predomina la pizarra gris oscura con algunas capas de pie de caliza y arenisca arenosa con un rango de inclinación de horizontal a 45 grados.

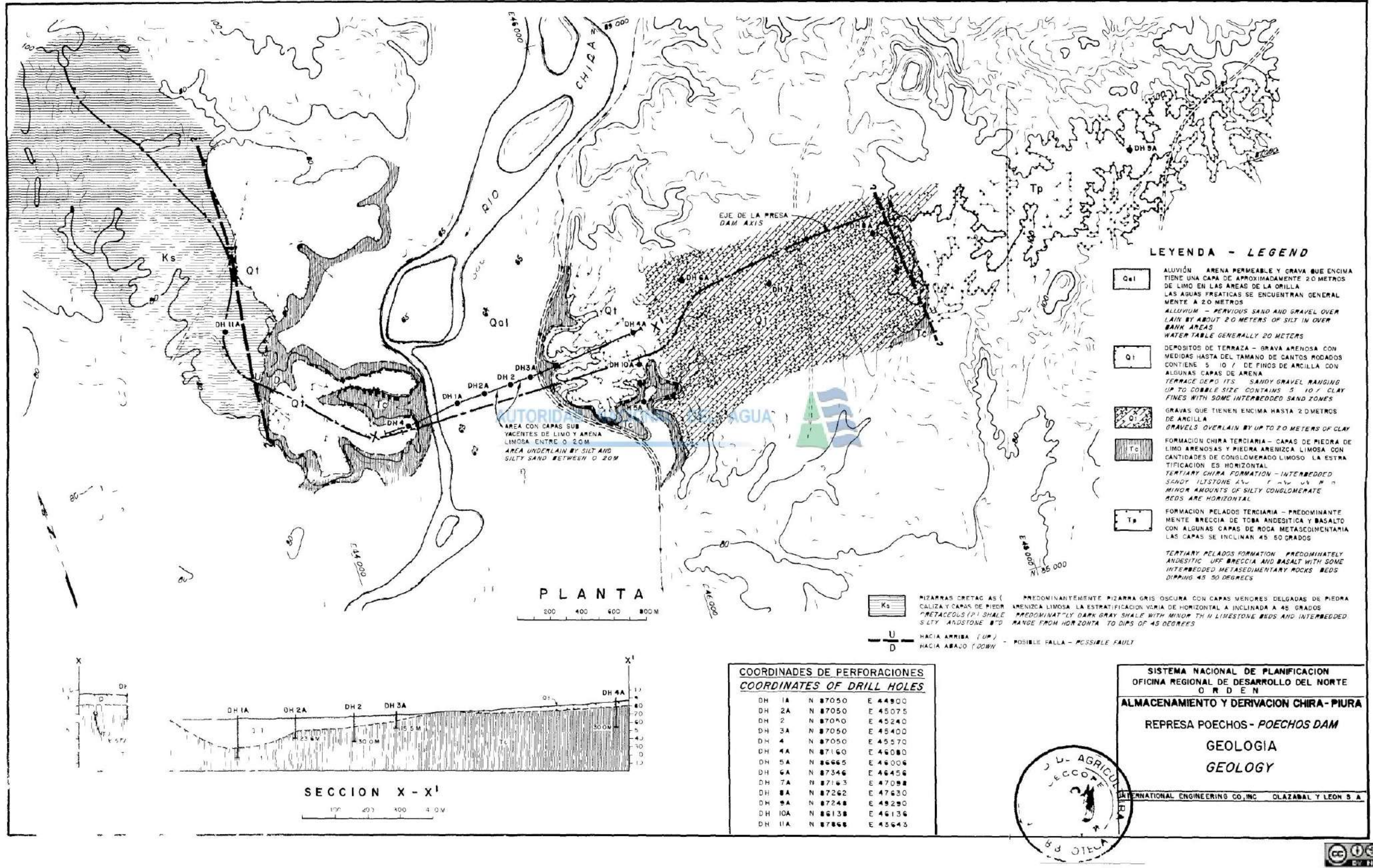


Figura 3. Geología en la Represa Poechos

Fuente: (Oficina Regional de Desarrollo del Norte [ORDEN] y International Engineering Company [IECO], 1968)

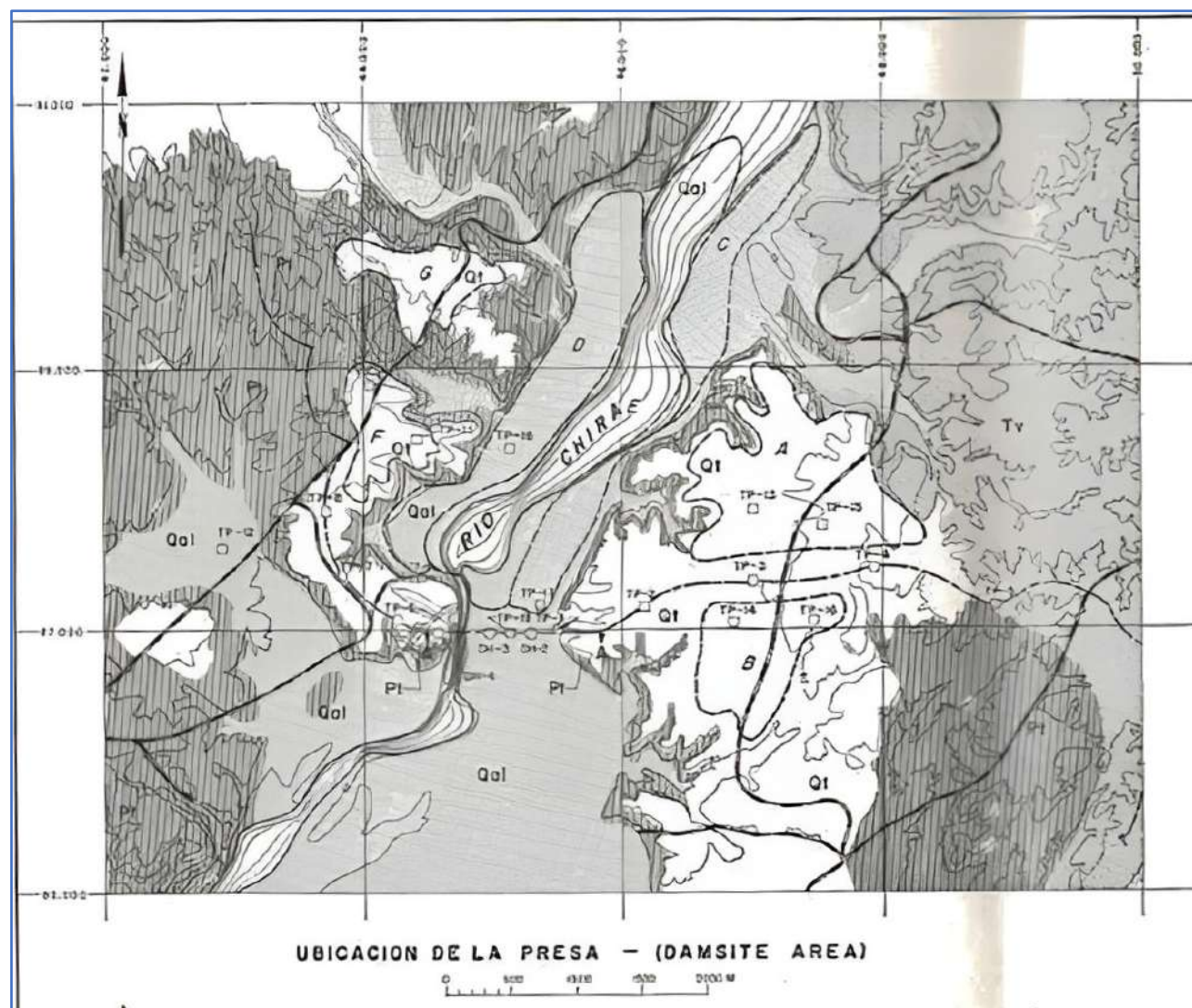


Figura 4. Geología en la zona de emplazamiento de la Represa Poechos

Fuente: (ORDEN y IECON, 1968)

1.2 Estructuras de contingencia

1.2.1 Aliviadero de compuertas

Esta estructura se encarga de la descarga de las avenidas del Río Chira, alcanzando a evacuar $5400 \text{ m}^3/\text{s}$, se encuentra conformado por 3 compuertas radiales de 10 m de ancho, 12 m de alto y 210 toneladas de peso c/u. Las compuertas son controladas por medio de un tablero que demanda 160 psi para subir y 50 psi para bajar cada una de ellas (Proyecto Especial Chira Piura, 2021).

La operación se realiza luego de procesar los datos hidrológicos de la cuenca del Río Chira, los cuales son obtenidos de las estaciones limnigráficas El Ciruelo, Paraje Grande y Ardilla; por otro lado, la abertura de las compuertas se basa en la cota del nivel de agua del reservorio, siendo 105 m.s.n.m. la cota de funcionamiento de máxima seguridad en la que trabaja el reservorio (Aguilar, 2016).

Salto de esquí, esta estructura se ubica luego del aliviadero de compuertas, su función principal es la evacuación de grandes descargas de flujo haciendo un efecto trampolín cuya trayectoria depende del ángulo del salto de esquí, de su energía y cantidad de fluido. Su finalidad es reducir la erosión aguas abajo y en los cimientos de la presa.

1.2.2 Aliviadero de emergencia

Es un solado de concreto sobre el cual se ha rellenado de tierra con la finalidad de que pueda ser erosionado en caso se supere la cota de 105 m.s.n.m. (cota de máxima seguridad); abarca 400 metros y está conformado por 4 cuerpos individuales, que en conjunto poseen una descarga máxima de $10\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Proyecto Especial Chira Piura, 2021). Desde la puesta en funcionamiento en 1976, no se ha visto la necesidad de romperlo, pues ello ocasionaría la inundación del valle Chira.

1.2.3 Salida de fondo

Es una estructura de concreto armado con blindaje de 415 m de longitud, está conformada de compuertas de 4.5 m de diámetro, válvula mariposa y compuerta radial; su capacidad máxima es $300 \text{ m}^3/\text{s}$ y tiene salida al canal Miguel Checa y Huaypirá que irrigan el valle de Chira (Proyecto Especial Chira Piura, 2021).

1.2.4 Salida al canal de derivación Daniel Escobar

Inicia en el dique izquierdo de la presa con ductos de 2.4 m de diámetro y termina en compuertas radiales, posee una longitud de 54 km y $70 \text{ m}^3/\text{s}$ de capacidad. El agua es conducida hacia la hidroeléctrica Poechos II con la finalidad de generar energía y finalmente es devuelta al canal (Proyecto Especial Chira Piura, 2021).

1.3 Operación del Reservoirio Poechos

La operación está basada en datos hidrológicos de la cuenca y en la demanda del recurso hídrico con fines de cultivo en los valles Chira y Piura. El nivel normal de operación es la cota 103 m.s.n.m. (Proyecto Especial Chira Piura, 2021)

A lo largo de los años se ha tenido diferentes reglas de operación, sin embargo, todas tenían el propósito de acumular el agua, sin tener en consideración la colmatación producida por el transporte de sedimentos, sobre todo las grandes avenidas de fenómenos extraordinarios.

Las nuevas reglas de operación están basadas de acuerdo al tipo de año hidrológico estableciendo reglas para sus respectivos niveles de espera (ver. Los años hidrológicos se clasifican en años extraordinarios como el año 1982/83 y 1997/98, muy húmedos y húmedos como los años comprendidos entre 1998/99 y 2001/02 y secos; en los años extraordinarios y muy húmedos, se considera que los niveles de espera sean los más bajos posibles, de esta manera se busca garantizar alcanzar la cota 103 m.s.n.m. de almacenamiento en los meses de mayo y junio; mientras que, en los años húmedos y secos, busca garantizar la demanda del recurso hídrico tanto en la agricultura como para otros usos, basándose en el análisis de reservas técnicas del reservorio; ver Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

Estas reglas de operación buscan alcanzar las siguientes metas: Llenado oportuno de la capacidad máxima del reservorio finalizada la época de avenidas, buscando cubrir la demanda agrícola y otros usos; cuidar al reservorio de la sedimentación; reducir el impacto ambiental aguas abajo del reservorio; minimizar daños en la infraestructura del reservorio como en los terrenos y bienes colindantes al cauce del río durante la descarga del flujo en exceso.

Para la elaboración de las nuevas reglas de operación del Reservoirio Poechos en épocas de avenidas se ha considerado las siguientes pautas: Curva del volumen del Reservoirio Poechos, reserva mínima de agua durante el año hidrológico en cada uno de sus meses, capacidad máxima de descarga de cada una de las obras hidráulicas del reservorio, periodos con ocurrencias considerables de crecidas, descarga máxima para diferentes periodos de retorno, capacidad máxima del cauce del Río Chira desde las descarga del reservorio hasta su desembocadura en el océano pacifico (Miloradovic Obradovic, 2015).

Tabla 1. Niveles de espera del reservorio Poechos en años extraordinarios

DESCARGAS MÁXIMAS DE EXCESOS HÍDRICOS DEL EMBALSE POECHOS PARA DIFERENTES "NIVELES DE ESPERA"		
NIVELES DE ESPERA (m)		CAUDAL (m³/s)
MÍNIMO	MÁXIMO	
90.0	<91.60	500
91.6	<93.20	1000
93.2	<94.80	1500
94.8	<96.40	2000
96.4	<98.00	2500
98.0	<103.00	3000
103.0	<103.50	Todo que ingresa hasta 3500 m ³ /s.
103.5	<104.00	Todo que ingresa hasta 4600 m ³ /s.
104.0	<105.00	Todo que ingresa hasta la capacidad hidráulica máxima del aliviadero de compuertas, con compuertas radiales totalmente abiertas.

Fuente: (Miloradovic Obradovic, 2015)

Tabla 2. Niveles de espera del reservorio Poechos en años muy húmedos

DESCARGAS MÁXIMAS DE EXCESOS HÍDRICOS DEL EMBALSE POECHOS PARA DIFERENTES "NIVELES DE ESPERA"		
NIVELES DE ESPERA (m)		CAUDAL (m³/s)
MÍNIMO	MÁXIMO	
93.0	<94.00	500
94.0	<95.00	1000
95.0	<96.00	1500
96.0	<97.00	2000
97.0	<98.00	2500
98.0	<103.00	3000
103.0	<103.50	Todo que ingresa hasta 3500 m ³ /s
103.5	<104.00	Todo que ingresa hasta 4600 m ³ /s
104.0	<105.00	Todo que ingresa hasta la capacidad hidráulica máxima del aliviadero de compuertas, con compuertas radiales totalmente abiertas.

Fuente: (Miloradovic Obradovic, 2015)

Tabla 3. Niveles de espera del reservorio Poechos en años húmedos

DESCARGAS MÁXIMAS DE EXCESOS HÍDRICOS DEL EMBALSE POECHOS PARA DIFERENTES "NIVELES DE ESPERA"		
NIVELES DE ESPERA (m)		CAUDAL (m³/s)
MÍNIMO	MÁXIMO	
93.0	<94.00	500
94.0	<95.00	1000
95.0	<96.00	1500
96.0	<97.00	2000
97.0	<98.00	2500
98.0	<103.00	3000
103.0	<103.50	Todo que ingresa hasta 3500 m ³ /s
103.5	<104.00	Todo que ingresa hasta 4600 m ³ /s
104.0	<105.00	Todo que ingresa hasta la capacidad hidráulica máxima del aliviadero de compuertas, con compuertas radiales totalmente abiertas.

Fuente: (Miloradovic Obradovic, 2015)

Tabla 4. Niveles de espera del reservorio Poechos en años secos.

DESCARGAS MÁXIMAS DE EXCESOS HÍDRICOS DEL EMBALSE POECHOS PARA DIFERENTES "NIVELES DE ESPERA"		
NIVELES DE ESPERA (m)		CAUDAL (m³/s)
MÍNIMO	MÁXIMO	
103	<103.50	Todo que ingresa hasta 3500 m ³ /s
103.5	<104.00	Todo que ingresa hasta 4600 m ³ /s
104	<105.00	Todo que ingresa hasta la capacidad hidráulica máxima del aliviadero de compuertas, con compuertas radiales totalmente abiertas

Fuente: (Miloradovic Obradovic, 2015)

1.4 Afianzamiento del reservorio Poechos

La vida útil del reservorio se ha visto afectada drásticamente debido a la colmatación de sedimentos, estos han sido acarreados y almacenados en los fenómenos de El Niño de 1983, 1998 y 2017 y a ello sumémosle la deforestación en las cuencas altas del reservorio. La capacidad de almacenamiento del reservorio se ha visto disminuida en un 58.11 %, lo que equivale a 517.11 MMC de agua, esto a su vez afecta a la campaña complementaria de los valles del Chira, Medio y Bajo Piura. Ante ello se formuló el proyecto de “Afianzamiento de la Presa Poechos”, el cual tiene 2 etapas.

La primera etapa tiene un costo de S/ 139 634 366.61 soles y consiste en fortalecer y ampliar la infraestructura existente; con ello se aumentará la capacidad de almacenamiento del reservorio en 180 MMC, al elevar el nivel de operación de la cota 103 msnm a la cota 106 msnm; comprende las siguientes obras: construcción e instalación de 6 compuertas radiales de 5m de alto y 14 m de ancho y la construcción de un muro de concreto armado de 3 m de

alto y a lo largo de 8.69 km sobre los diques de la presa; esto conllevaría en la mejora de producción agrícola, mantener la dotación de agua para consumo poblacional, continuar generando energía eléctrica, etc.

La segunda tiene un costo de S/ 40 817.017 soles, de los cuales más del 80 % se destinaria a equipamiento y el 20 % a programas de eficiencia de riego tecnificado (Proyecto Especial Chira Piura PECHP, 2018).



Capítulo 2

Dinámica computacional de fluidos

2.1 Definición

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una ciencia sobre la simulación numérica y "predice el flujo de los fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, aeroacústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de fluidos y cálculo numérico" (ESSS, 2016).

La ecuación principal que se resuelve en CFD es la ecuación del teorema de transporte de Reynolds o también conocida como ecuación de transporte, esta es una representación general de las ecuaciones de conservación, ver ecuación 2.1.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi \, dV}_{\text{Tiempo}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \vec{V} \cdot dA}_{\text{advección}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \oint_A r \phi \nabla \phi \cdot dA}_{\text{difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi \cdot dV}_{\text{fuente}} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido [kg/ m³]

\vec{V} : Velocidad del fluido [m/s²]

ϕ : Variable de interés

r : Coeficiente de difusión

S : Término fuente

dA : Diferencial de superficie

dV : Diferencial de volumen

Las ecuaciones de conservación poseen la forma de la ecuación 2.1, esta presenta cuatro términos: tiempo, advección, difusión y fuente; por ejemplo, para la ecuación de continuidad el valor de la variable de interés es 1, mientras que el valor de la fuente y coeficiente de difusión es cero. Para encontrar las ecuaciones de conservación de momento y energía basta con reemplazar los valores que toman la variable, el coeficiente de interés y la fuente.

Las ecuaciones de conservación a pesar de ser ampliamente utilizadas no tienen una solución analítica, es por eso la necesidad de emplear algún método de discretización para resolverla. Entre los métodos de discretización más conocidos se tiene: método de diferencias finitas, el método de volúmenes finitos y el de elementos finitos.

Los softwares de CFD se basan en la discretización del dominio por el método de volúmenes finitos, la discretización consiste en dividir el dominio en pequeños volúmenes de control (ver Figura 5), en los cuales se resolverán las ecuaciones de conservación, ya que se genera un sistema de ecuaciones que son resuelta por medio de softwares CFD (ANSYS CFX, ANSYS Fluent, ANSYS Discovery, FLOW-3D, etc.); estos softwares tienen capacidad para solucionar rápidamente y con mucha fidelidad diversos y complejos problemas de dinámica de fluidos.

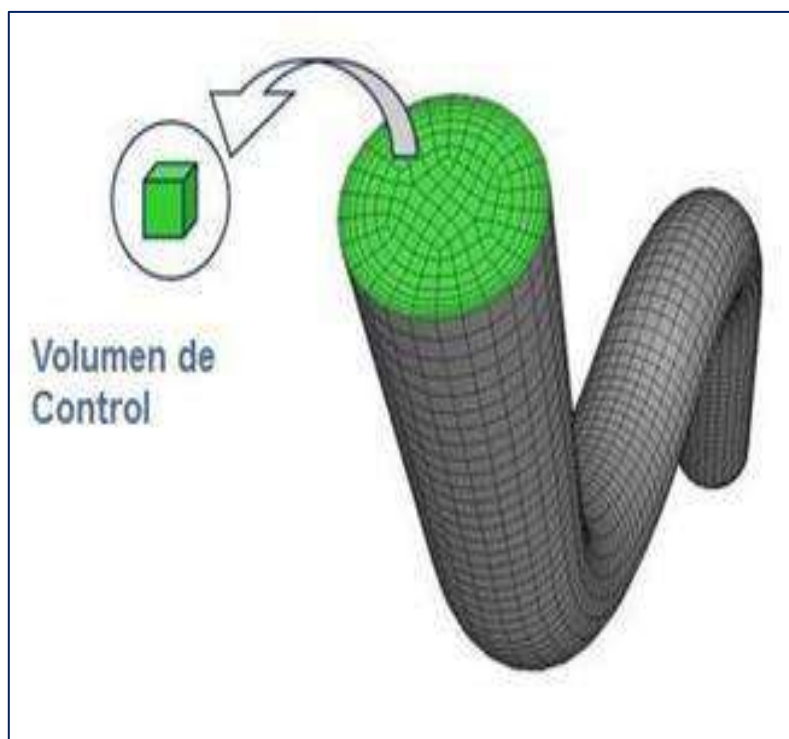


Figura 5. Volumen de control

Fuente: (ESSS, 2016)

Para determinar el número de volúmenes de control necesarios para resolver un problema de dinámica de fluidos, es necesario realizar un estudio de convergencia de malla, el cual consiste evaluar el modelo con diferentes volúmenes de control y apreciar el valor de

alguna variable de interés (velocidad, presión, etc.), cuando el valor de la variable en estudio tienda a un determinado valor (la variación es pequeña) habremos alcanzado la convergencia de malla; si bien es cierto que un mayor número de volúmenes de control respecto al de convergencia de malla, nos proporcionará una solución del modelo más exacta, ello conlleva un mayor costo computacional y un mayor tiempo de solución.

Una vez alcanzado la convergencia de malla, se pasa a la configuración física del modelo, condiciones de borde y del solver, luego se resuelve el sistema de ecuaciones a través de un proceso iterativo, aquí debemos verificar el cumplimiento de la conservación de las ecuaciones y una vez que estas se cumplan se procederá a analizar los resultados.

2.2 Métodos numéricos de discretización

Los métodos numéricos son aplicaciones de algoritmos que permiten formular y solucionar problemas matemáticos usando operaciones aritméticas menos complejas, entre sus puntos positivos se tiene el tiempo, costo y fidelidad de resultados (soluciones aproximadas a problemas complejos).

Un algoritmo es un grupo finito de operaciones organizadas y ordenadas que permiten solucionar un determinado problema, por medio de una sucesión de etapas que permiten obtener una aproximación de la solución real con un mínimo de operaciones (ESSS, 2017).

Los métodos numéricos de discretización más empleados en la ingeniería son los métodos de diferencias finitas (MDF), métodos de volúmenes finitos y el método de elementos finitos.

2.2.1 Método de diferencias finitas (FDM)

El método de diferencias finitas resuelve ecuaciones diferenciales mediante aproximaciones de diferencia, en las cuales las diferencias finitas se aproximan a las derivadas; este método cubre el dominio con una malla estructurada (reja) y en las intersecciones (Nodos) se resuelven las ecuaciones diferenciales.

FDM es ideal para geometrías sencillas, en las cuales es posible un mallado estructurado que nos proporcionará una solución sencilla y efectiva, cabe señalar que este método es puramente matemático puesto que no garantiza la preservación de las propiedades físicas de conservación.

2.2.2 Método de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos es un método numérico que soluciona problemas de ingeniería y física matemática, en disciplinas de ingeniería como estructural, térmica y electromagnética. Este método es adecuado para resolver problemas de cargas y propiedades de materiales complejos.

Para resolver los problemas de interés es necesario discretizar el dominio continuo en pequeños cuerpos denominados elementos finitos, estos a su vez se interconectan por nodos (puntos en común), generando un sistema de ecuaciones que son reducidos a sistemas de ecuaciones diferenciales, su solución es aproximada y de forma lineal.

Un punto muy importante que debemos tener en cuenta es que en este método cuando se tiene un dominio con un elemento malo, los resultados obtenidos serán fidedignos en todo el dominio a excepción de los resultados obtenidos en el elemento malo.

2.2.3 Método de volúmenes finitos (FVM)

El método de volúmenes finitos es el código más usado en la investigación de la mecánica de fluidos, algunos complejos como lo son los flujos multifásicos, reactivos o fuertemente turbulentos; en este método el dominio continuo es discretizado en pequeños volúmenes de control (su centroide vendría a ser el nodo del mallado) en los que se resolverán las ecuaciones integrales de conservación.

Para hallar la solución se genera un conjunto de ecuaciones integrales, su número varía de acuerdo a la cantidad de volúmenes de control en los que se ha discretizado el dominio, estas son linealizadas para obtener un sistema algebraico y resueltas de manera aproximada e iterativa.

En la dinámica de fluidos computacional, un elemento de malla defectuoso genera una respuesta de todo el dominio deficiente, como un teléfono inalámbrico donde la información se ha perdido y no se puede encontrar más tarde.

Este método se adapta tanto en mallas estructuradas como en mallas no estructuradas.

2.3 Teorema de transporte de Reynolds

El teorema de Reynolds es la relación entre las razones de cambio respecto al tiempo de una propiedad extensiva entre un sistema y un volumen de control; pues resulta más conveniente trabajar con volúmenes de control, ya que los fluidos se deforman y distorsionan constantemente haciendo difícil seguir la misma masa todo el tiempo.

Según (Çengel y Cimbala, 2018) un sistema puede cambiar de tamaño y forma, pero siempre tendrá una masa de materia fija; mientras que el volumen de control es una región de espacio que puede moverse y deformarse en el cual la masa es capaz de ingresar y salir de dicho volumen de control, tal como se observa en la Figura 6.

La deducción del teorema es muy complicada pues considera que el sistema posee una forma e iteraciones arbitrarias, es por ello que la deducción se realiza a partir de una configuración sencilla y que finalmente es generalizada. Consideremos un flujo uniforme delimitado por dos líneas de corriente que fluye de izquierda a derecha cuya sección transversal diverge y es perpendicular a la dirección del flujo; en un instante t tanto el

sistema y el volumen de control se encuentran entre las secciones I y II es decir coinciden (región gris claro), luego de un intervalo de tiempo Δt el sistema se mueve en la dirección del flujo (región con líneas inclinadas) y cubre la región II mientras que la sección I queda al descubierto; por lo tanto en el instante $t + \Delta t$ el sistema es igual al volumen de control (siempre permanece fijo entre las secciones I y II) menos la región I y más la región II, ver Figura 7.

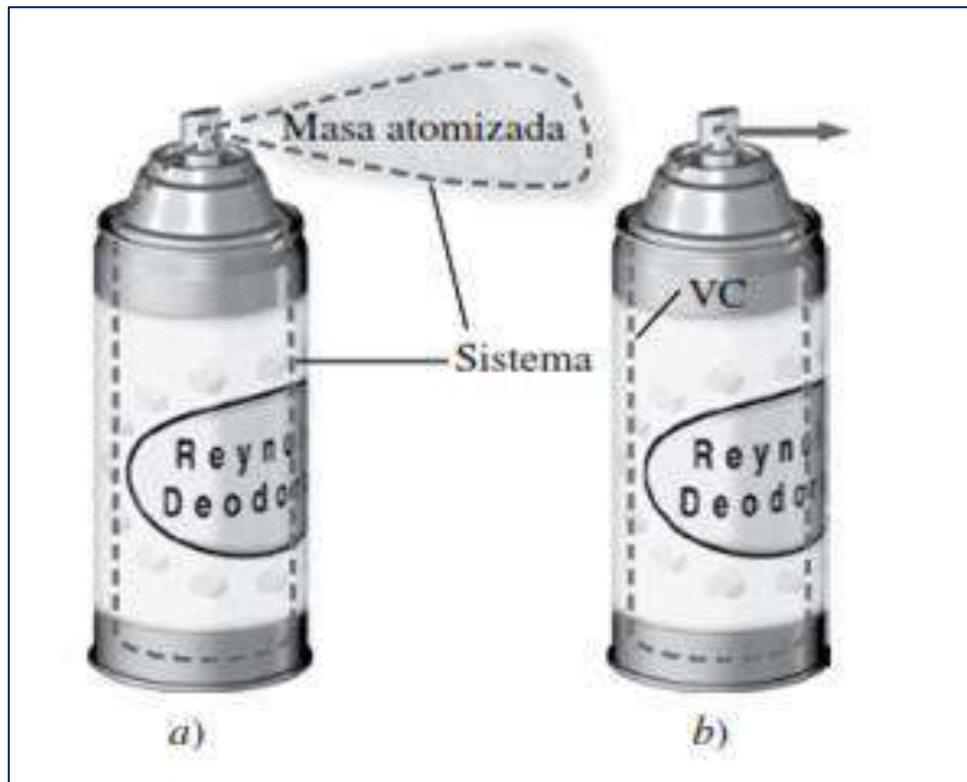


Figura 6. A la izquierda se ilustra un sistema y a la derecha un volumen de control.

Fuente: (Çengel y Cimbala, 2018).

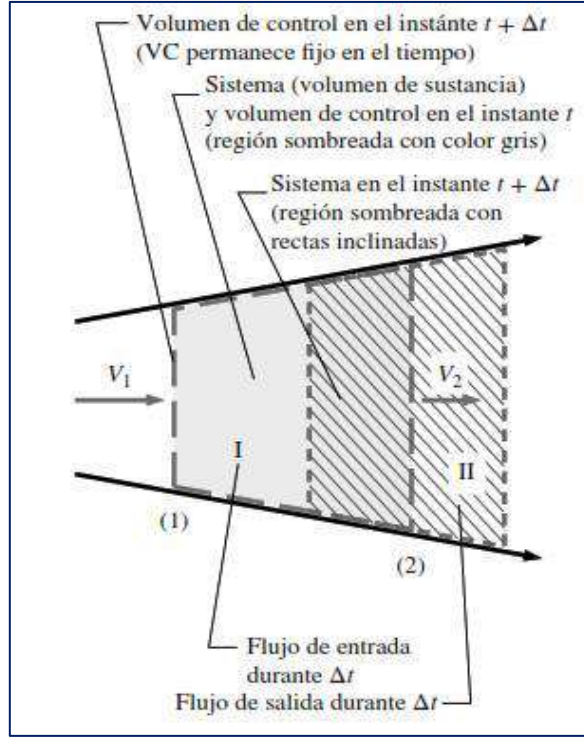


Figura 7. Relación entre un sistema y un volumen de control

Fuente: (Çengel y Cimbala, 2018)

En nuestro análisis **B** representa una propiedad extensiva tales como la masa, energía o cantidad de movimiento y **b** representa la misma propiedad por unidad de masa (propiedad intensiva); la propiedad extensiva de un sistema en el instante **t** y **t + Δt** se expresa en las ecuaciones **2.2a** y **2.2b**.

$$B_{\text{Sist. } t} = B_{\text{VC. } t} \quad (2.2a)$$

$$B_{\text{Sist. } t+\Delta t} = B_{\text{VC. } t+\Delta t} - B_{\text{I. } t+\Delta t} + B_{\text{II. } t+\Delta t} \quad (2.2b)$$

Si a la ecuación 2.2b se le resta la ecuación 2.2a y luego se divide entre Δt se tiene:

$$\frac{B_{\text{Sist. } t+\Delta t} - B_{\text{Sist. } t}}{\Delta t} = \frac{B_{\text{VC. } t+\Delta t} - B_{\text{VC. } t}}{\Delta t} - \frac{B_{\text{I. } t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{B_{\text{II. } t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (2.3)$$

Aplicando la definición de la derivada cuando la Δt tiende a 0, se tiene:

$$\dot{B}_I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\dot{B}_I / \Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (b_1 \rho_1 V_1 A_1 \Delta t / \Delta t) = b_1 \rho_1 V_1 A_1 \quad (2.4a)$$

$$\dot{B}_{II} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (\dot{B}_{II} / \Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (b_2 \rho_2 V_2 A_2 \Delta t / \Delta t) = b_2 \rho_2 V_2 A_2 \quad (2.4b)$$

$$\frac{\partial B_{\text{Sist.}}}{\partial t} = \frac{\partial B_{\text{VC.}}}{\partial t} - \dot{B}_I + \dot{B}_{II} = \frac{\partial B_{\text{VC.}}}{\partial t} - b_1 \rho_1 V_1 A_1 + b_2 \rho_2 V_2 A_2 \quad (2.5)$$

El flujo de entrada y salida no siempre son perpendiculares ni tampoco su velocidad lo es en las regiones I o II, es por ello que generalizando se tiene un área superficial $d\mathbf{A}$ sobre el volumen de control, cuyo vector normal exterior unitario viene dado por \vec{n} , ver Figura 8.

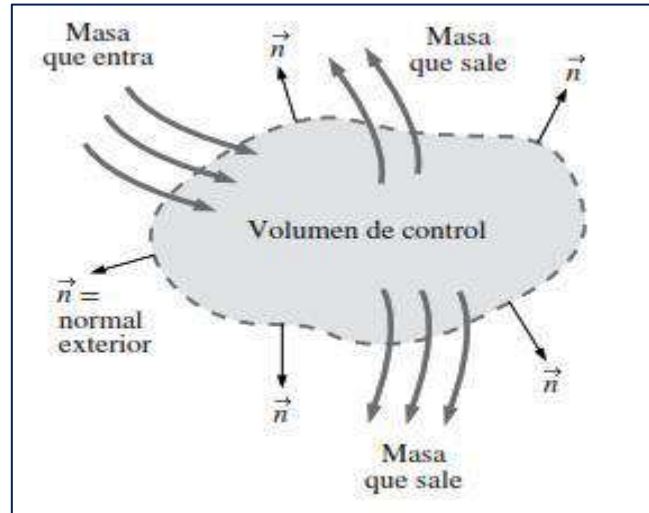


Figura 8. Representación de un volumen de control

Fuente: (Çengel y Cimbala, 2018)

El producto punto entre el vector velocidad y el vector exterior resulta ser la componente horizontal de la velocidad; en consecuencia, el gasto neto de la propiedad queda expresado en una superficie de control de la siguiente manera:

$$\dot{B}_{II} - \dot{B}_I = \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (2.6)$$

Por otro lado, la propiedad extensiva dentro del volumen de control se expresa a continuación:

$$B_{VC} = \int_{VC} \rho b dV \quad (2.7)$$

Por consiguiente, la variación de la propiedad extensiva B en el sistema es igual a la acumulación de B dentro del volumen de control más el flujo neto a través de la superficie de control, se expresa en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial B_{Sist.}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (2.8)$$

Donde:

$B_{Sist.}$: Propiedad extensiva

b : Propiedad intensiva

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]

\vec{V} : Velocidad del fluido [m/s]

\vec{n} : Vector unitario normal

VC : Volumen de control

SC : Superficie de control

2.3.1 Conservación de la masa

Este principio establece que la masa no se puede crear ni destruir. La masa en un sistema cerrado permanece constante, mientras que en un volumen de control existe libertad, pues la masa puede ingresar y salir del volumen de control, sin embargo, el cambio neto de la masa es igual a cero, de esta manera se garantiza el cumplimiento de la ecuación de continuidad.

La ecuación de conservación de masa se obtiene de reemplazar la propiedad extensiva B por la masa, en consecuencia, el valor de la propiedad intensiva b es 1, pues b es igual a la propiedad extensiva por unidad de masa, de esta manera obtenemos el caso general de la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial B_{Sist.}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (2.9)$$

Ahora bien, se tiene que el primer término es igual a cero, pues la masa en un sistema permanece constante y la derivada de una constante es igual a cero. Esta ecuación expresa que la razón de cambio de masa respecto al tiempo dentro del volumen de control más la razón neta del flujo de masa a través de la superficie de control es igual a cero.

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (2.10)$$

Para deducir la forma diferencial de la ecuación de continuidad es necesario transformar el segundo término en una integral de volumen y ello se realiza a través del teorema de divergencia, cabe señalar que solo se aplica cuando la superficie rodea y envuelve el volumen de control, es decir es cerrada.

$$\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) dV \quad (2.11)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido [kg/ m³]

\vec{V} : Velocidad del fluido [m/s]

\vec{n} : Vector unitario normal

$\vec{\nabla}$: Divergencia del campo vectorial

Al sumar las dos integrales de volumen se tiene:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) dV = \int_{VC} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) \right] dV \quad (2.12)$$

El resultado de la integral de volumen debe ser cero y debe cumplirse para cualquier volumen de control; finalmente la forma de la ecuación de continuidad queda expresada a continuación:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.13)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido [kg/ m³]

\vec{V} : Velocidad del fluido [m/s]

$\vec{\nabla}$: Divergencia del campo vectorial

u : Componente de la velocidad en x [m/s]

v : Componente de la velocidad en y [m/s]

w : Componente de la velocidad en z [m/s]

En flujos incompresibles, la densidad es constante, por lo tanto, su derivada es igual a cero, dicha ecuación se muestra a continuación:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{V}) = \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (2.14)$$

2.3.2 Conservación de momento

La cantidad de movimiento en un sistema es el producto entre su masa y la velocidad, este principio es una reafirmación de la Segunda ley de Newton, el cual afirma que la aceleración de un cuerpo es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre el sistema e inversamente proporcional a su masa; por lo tanto, la cantidad de movimiento en un sistema es constante y se conserva.

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \quad (2.15)$$

Donde:

\vec{F} : Fuerza neta en un volumen de control [N]

\vec{a} : Aceleración del fluido [m/s²]

m : Masa del volumen de control [kg]

La fuerza total actuante sobre el volumen de control está dada por las fuerzas que actúan sobre el cuerpo (gravedad, eléctrica y magnética) y las fuerzas que actúan sobre la superficie (como la presión, viscosidad y fuerzas en los puntos de contacto).

$$\Sigma \vec{F} = \Sigma \vec{F}_{\text{cuerpo}} + \Sigma \vec{F}_{\text{superficie}} \quad (2.16)$$

La fuerza de cuerpo más común que actúa sobre un volumen de control es el peso del mismo, la cual depende de la masa y del vector de la aceleración de la gravedad.

$$\Sigma \vec{F}_{\text{cuerpo}} = \int_{VC} \rho \vec{g} dV \quad (2.17)$$

Por otro lado, la fuerza superficial está representada por el tensor de esfuerzos σ_{ij} y este a su vez se conforma de esfuerzos normales y esfuerzos cortantes, los primeros son esfuerzos de presión y viscosidad (conforman la diagonal del tensor de esfuerzos), mientras los restantes son esfuerzos de viscosidad.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

La fuerza neta superficial que actúa sobre el volumen de control queda expresada como:

$$\Sigma \vec{F}_{\text{superficie}} = \int_{SC} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA \quad (2.19)$$

Finalmente, la fuerza neta sobre el volumen de control es la siguiente:

$$\Sigma \vec{F} = \Sigma \vec{F}_{\text{cuerpo}} + \Sigma \vec{F}_{\text{superficie}} = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SC} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA \quad (2.20)$$

La ecuación de conservación de momento se obtiene de reemplazar la propiedad extensiva B por el producto de la masa y velocidad, en consecuencia, el valor de la propiedad

intensiva b es \vec{V} , pues b es igual a la propiedad extensiva por unidad de masa, de esta manera obtenemos el caso general de la ecuación de conservación de momento.

$$\frac{\partial(m\vec{V})_{\text{Sist.}}}{\partial t} = \sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.21)$$

Ahora bien, si igualamos las ecuaciones 2.20 y 2.21 se tiene la forma general de conservación de momento en un volumen de control.

$$\int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SC} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.22)$$

La forma diferencial de conservación de momento se obtiene al aplicar el teorema de divergencia en las integrales de superficie cerrada, transformándola en una integral de volumen.

$$\int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) dV \quad (2.23)$$

Reagrupando los términos en una sola integral, se tiene:

$$\int_{VC} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \right] dV = 0 \quad (2.24)$$

La suma de los términos de la integral debe ser igual a cero, pues es indiferente al tamaño y forma del volumen de control; este resultado es la ecuación diferencial de conservación de momento, la cual es conocida como ecuación de Cauchy y es aplicable tanto a fluidos newtonianos como no newtoniano.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} = 0 \quad (2.25)$$

Si desarrollamos las derivadas de producto tanto del primer y segundo término de la ecuación 2.25, teniendo en cuenta que la derivada de un producto es igual al primer término por la derivada del segundo más el segundo término por la derivada del primero, entonces la ecuación de conservación de momento se expresa como:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (\vec{V}) + \rho \vec{V} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) - \rho \vec{g} - \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} = 0 \quad (2.26)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido [kg/ m³]

\vec{V} : Velocidad del fluido [m/s]

$\vec{\nabla}$: Divergencia del campo vectorial

\vec{g} : Vector de la aceleración de la gravedad [m/s²]

σ_{ij} : Tensor de esfuerzos [N/m²]

La forma diferencial extendida de la ecuación de momento se expresa a continuación:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} - \rho g_x - \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} - \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (2.27a)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} - \rho g_y - \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} = 0 \quad (2.27b)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} - \rho g_z - \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \quad (2.27c)$$

Ecuaciones de Navier Stokes

Estas ecuaciones son un grupo de derivadas parciales que describen el comportamiento del flujo de los fluidos, además son una forma particular de la ecuación de conservación de momento que se aplican a fluidos newtonianos; estos fluidos son aquellos que poseen una viscosidad constante, ello permite relacionar el esfuerzo cortante y su velocidad de deformación (reología), ver Figura 9.

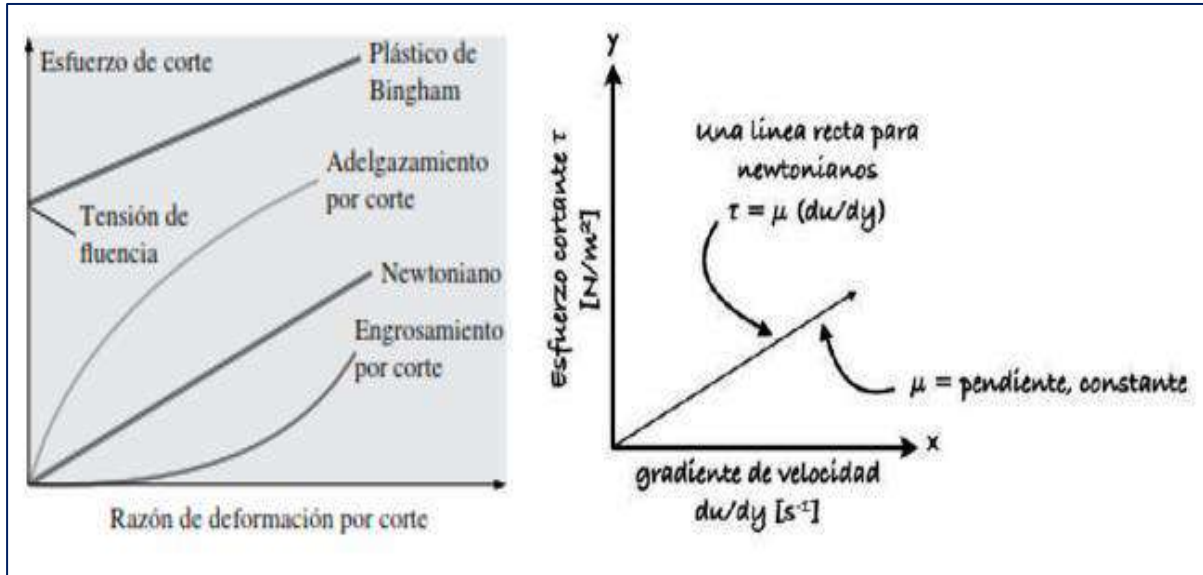


Figura 9. Comportamiento reológico de los fluidos (a la izquierda), relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad (a la derecha)

Fuente: (Çengel y Cimbala, 2018)

Como ya se había mencionado anteriormente el tensor de esfuerzos σ_{ij} está conformado por esfuerzos de presión que actúan en dirección normal y hacia dentro del de la superficie del volumen de control y por esfuerzos de viscosidad; por lo tanto:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

Aplicando la ley de Newton de la viscosidad para relacionar los esfuerzos viscosos con la velocidad de deformación, se tiene.

$$\begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) & \mu(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}) \\ \mu(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}) \\ \mu(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}) & \mu(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Reemplazando las ecuaciones 2.28 y 2.29 en la ecuación de momento en x (ecuación 2.27a), se tiene:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} - \rho g_x + \frac{\partial P}{\partial x} - 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ - \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Reagrupando los términos viscosos y teniendo en cuenta que el orden de la derivada no afecta el resultado, se tiene:

$$u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - u \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - u \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + u \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = u \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2.31)$$

El término entre paréntesis vendría a ser la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles, por lo tanto, es cero y en consecuencia la ecuación de momento en x resulta:

$$u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - u \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - u \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + u \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = u \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2.32)$$

Por consiguiente, la ecuación de conservación de momento en x resulta:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + u \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2.33a)$$

Finalmente, las ecuaciones de conservación de momento en y y z, se expresan:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + u \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2.33b)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + u \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2.33c)$$

2.3.3 Conservación de la energía

Este principio es una reafirmación de la Primera Ley de la Termodinámica, la cual establece que: la energía no se crea ni se destruye solo se transforma durante el proceso, o dicho en otras palabras la variación o razón de cambio de energía interna en un volumen de control es igual a la diferencia entre las razones de transferencia de calor y trabajo.

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.34)$$

La variación de energía está dada por la razón de transferencia de energía en forma de calor y de trabajo; la primera se define como la variación de energía térmica en un volumen de control, mientras que la razón de transferencia de trabajo es ocasionada por las

fuerzas de presión y de viscosidad; en ambos casos se representa mediante una integral de superficie cerrada, ver ecuación 2.35a y 2.35b.

$$\dot{Q} = \int_{SC} k \nabla T dA \quad (2.35a)$$

$$\dot{W}_{\text{presión}} + \dot{W}_{\text{viscosidad}} = - \int_{SC} P(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA + \int_{SC} (\tau \cdot \vec{V}) \cdot \vec{n} dA \quad (2.35b)$$

A partir del teorema de transporte de Reynolds, la ecuación de conservación de energía se obtiene al reemplazar la propiedad extensiva B por la energía E, en consecuencia, el valor de la propiedad intensiva b es "e" y representa la propiedad extensiva por unidad de masa, de esta manera obtenemos la siguiente expresión.

$$\frac{\partial E_{\text{sist}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \rho dV + \int_{SC} e \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (2.36)$$

Al sustituir las ecuaciones 2.35a, 2.35b y 2.36 en la ecuación 2.34, reagrupar y aplicar el teorema de divergencia a las integrales de superficie para convertirlas en integrales en volumen se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \rho dV + \int_{VC} \nabla \cdot [\rho \vec{V} (e + \frac{P}{\rho})] dV = \int_{VC} \nabla \cdot [k \nabla T + (\tau \cdot \vec{V})] dV \quad (2.37)$$

Finalmente, para satisfacer la ecuación de conservación de energía la suma de los valores integrados debe ser igual a cero, resultando la forma diferencial de la ecuación.

$$\frac{\partial(e\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \vec{V} \left(e + \frac{P}{\rho} \right) \right] = \nabla \cdot [k \nabla T + (\tau \cdot \vec{V})] \quad (2.38)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

e: Energía por unidad de masa

\vec{V} : Velocidad del fluido [m/s]

∇ : Divergencia del campo vectorial

P: Presión

k: conductividad térmica [W/m-k]

T: Temperatura

τ : Tensor de esfuerzos viscosos [N/m²]

En simulaciones de modelos con fluidos incompresibles y donde no se evalué la transferencia de calor, podemos asumir un flujo isotérmico (temperatura constante) y por lo tanto no requerirá la ecuación de conservación de energía, tal como es nuestro caso.

2.4 Acoplamiento presión-velocidad en flujos constantes

Para resolver problemas que involucren a fluidos newtonianos, incompresibles e isotérmicos, se tiene cuatro ecuaciones que son la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier Stokes (caso particular de las ecuaciones de conservación de momento) y cuatro incógnitas que son la presión y la velocidad en sus tres dimensiones; sin embargo, el sistema no puede ser resuelto a menos que se emplee algoritmos de acoplamiento de presión y velocidad; estos algoritmos usan ecuaciones adicionales que permiten enlazar las variables de presión y velocidad.

Los algoritmos asumen una distribución provisional de presión para resolver las velocidades del fluido utilizando las ecuaciones de conservación de momento, luego este campo de velocidad se verifica que cumpla la ecuación de continuidad, caso no cumpla la distribución de presiones es corregida iterativamente hasta que el campo de velocidad cumpla la ecuación de continuidad (Versteeg y Malalasekera, 2007).

2.4.1 El algoritmo Simple

Este algoritmo resuelve las ecuaciones de Navier Stokes a través de un método iterativo que calcula las presiones y velocidades; para ello deriva una ecuación de presión a partir de las ecuaciones de momento y de continuidad y además deriva una ecuación para corregir las velocidades de tal manera que satisfaga la ecuación de continuidad (Fluid Mechanics 101, 2018).

El proceso de solución inicia con un campo de presiones estimado que resuelve las ecuaciones discretizadas de momento obteniendo los valores estimados de las velocidades, luego corrige la presión restando la presión real menos la supuesta y finalmente corrige las presiones y velocidades y halla los valores reales de las variables, el proceso iterativo termina siempre y cuando los valores hallados satisfagan las ecuaciones de momento y continuidad (Versteeg y Malalasekera, 2007)

2.4.2 El algoritmo SIMPLER

Este algoritmo obtiene directamente un campo de presión intermedio al utilizar la ecuación discretizada de continuidad para obtener la ecuación discretizada de presión, es decir realiza una corrección interna obteniendo un valor mucho más aproximado al real; en el caso de las velocidades se obtienen aplicando los mismos pasos que en el algoritmo SIMPLE (Versteeg y Malalasekera, 2007).

2.4.3 El algoritmo SIMPLEC

Este algoritmo posee un proceso similar al algoritmo SIMPLE para determinar las velocidades y presiones y en consecuencia dar solución a las ecuaciones de momento y continuidad; sin embargo, se diferencia al omitir términos significativos en la ecuación de corrección de velocidad (Versteeg y Malalasekera, 2007).

2.4.4 El algoritmo PISO

De acuerdo a (Versteeg y Malalasekera, 2007), este algoritmo a pesar de haberse desarrollado para resolver flujos compresibles inestables, resuelve problemas en estado estacionario con una alta precisión, debido a que emplea un paso predictor y dos pasos correctores; por lo tanto obtiene el valor de las variables que cumplan las ecuaciones de transporte sin necesidad de realizar tantas iteraciones como en los otros algoritmos.

2.5 Turbulencia

Para Hinze (1975) un flujo turbulento es "...una condición irregular de flujo en la que las diversas cantidades muestran una variación aleatoria con las coordenadas de tiempo y espacio, de modo que se pueden discernir valores promedio estadísticamente distintos".

En la naturaleza es posible observar flujos turbulentos como los huracanes, tornados, olas, etc.; estos poseen en común números de Reynolds cuya magnitud es muy grande, es decir las fuerzas inerciales son mayores a las fuerzas viscosas; estos números son superiores al número de Reynolds crítico, haciendo que el flujo tenga un comportamiento inestable y caótico, de tal manera que si se quiere medir la velocidad instantánea en un punto específico dentro de un flujo turbulento, notaríamos que es impredecible, ver Figura 10; además estos flujos se caracterizan por su gran capacidad de mezcla, no solo de sustancia, sino también de propiedades extensivas como masa, momento, energía, etc.

En la Figura 10 se observa que la velocidad puede representarse como un valor medio y otro fluctuante, si aplicamos este mismo principio a las demás variables del flujo turbulento tendríamos un valor medio y otro que fluctúa de cada una de ellas al transcurrir el tiempo.

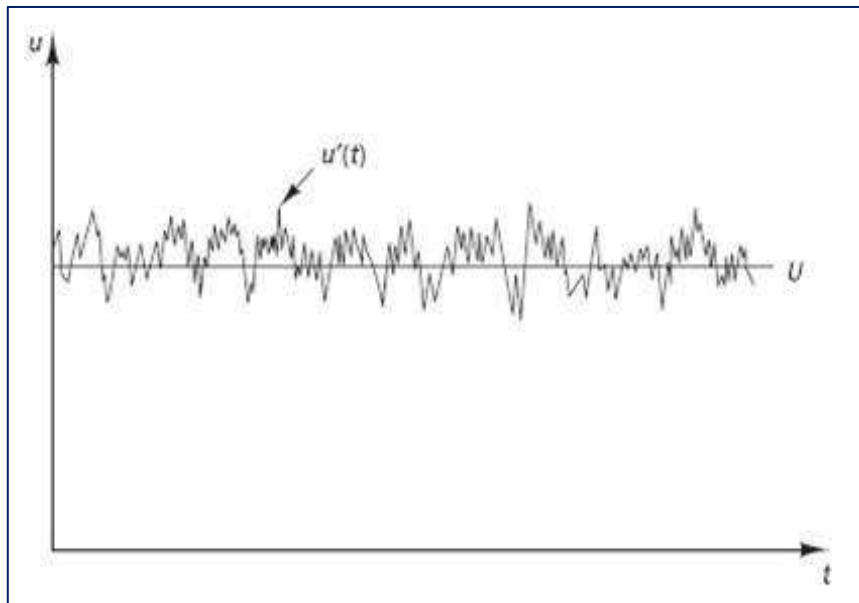


Figura 10. Velocidad instantánea en un punto al interior de un flujo turbulento
Fuente: (Versteeg y Malalasekera, 2007)

La no linealidad de las ecuaciones de Navier Stokes produce en el dominio fluido remolinos con diferentes escalas de tiempo y duración, en donde producto de la inestabilidad los remolinos grandes generan remolinos pequeños y transfieren energía a estos últimos, formando una cascada de energía y llegando a su fin cuando las escalas de estos remolinos son demasiadas pequeñas que disipan la energía en forma de calor, a estas escalas también se les conoce como escala de Kolmogorov (Zikanov, 2010). Los remolinos más pequeños son aquellos donde se cumple que las fuerzas inerciales son de igual magnitud a las fuerzas viscosas, por lo tanto, el número de Reynolds es igual a la unidad (Versteeg y Malalasekera, 2007).

Actualmente es difícil calcular con precisión los flujos turbulentos, para ello sería necesario realizar una discretización con volúmenes de control del tamaño de los remolinos más pequeños existentes en el fluido, ello demandaría un alto costo computacional, sin embargo, se tiene la certeza de que en un futuro esto será posible, pues el crecimiento computacional es constante y acelerado; de acuerdo a (Our World in Data, 2021) la cantidad de cálculos que puede realizar las supercomputadoras por segundo se ha visto incrementado de manera significativa en muy pocos años, ver Figura 11.

Si bien es difícil calcular con precisión los flujos turbulentos, existen modelos de turbulencia como DNS, LES y RANS que nos permiten obtener información muy valiosa. Las simulaciones DNS resuelve la dinámica de todos los remolinos, mientras que los modelos LES resuelven solo la de los remolinos grandes y simula los remolinos pequeños, por ultimo los modelo RANS realizan un modelamiento tanto de los remolinos grandes como pequeños (Crowe, 2006) , en la Figura 12 se aprecia el alcance que tiene cada uno de estos modelos de turbulencia.

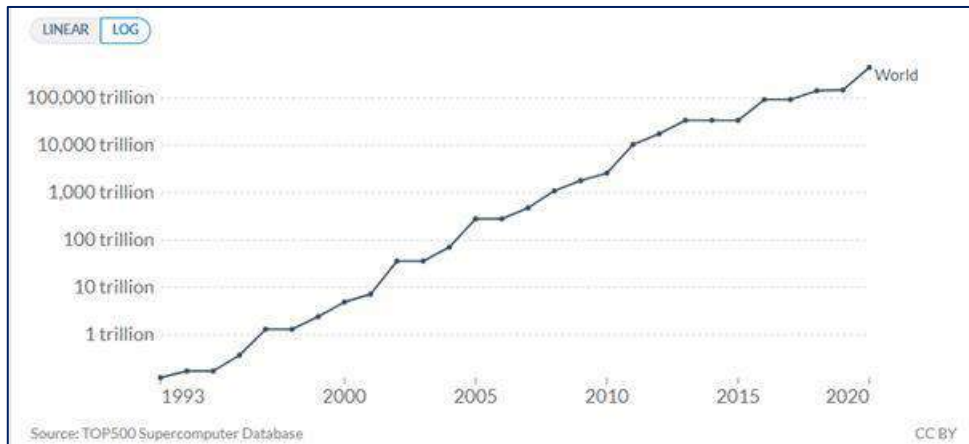


Figura 11. Rendimiento de las computadoras (Flops)

Fuente: (Our World in Data, 2021)

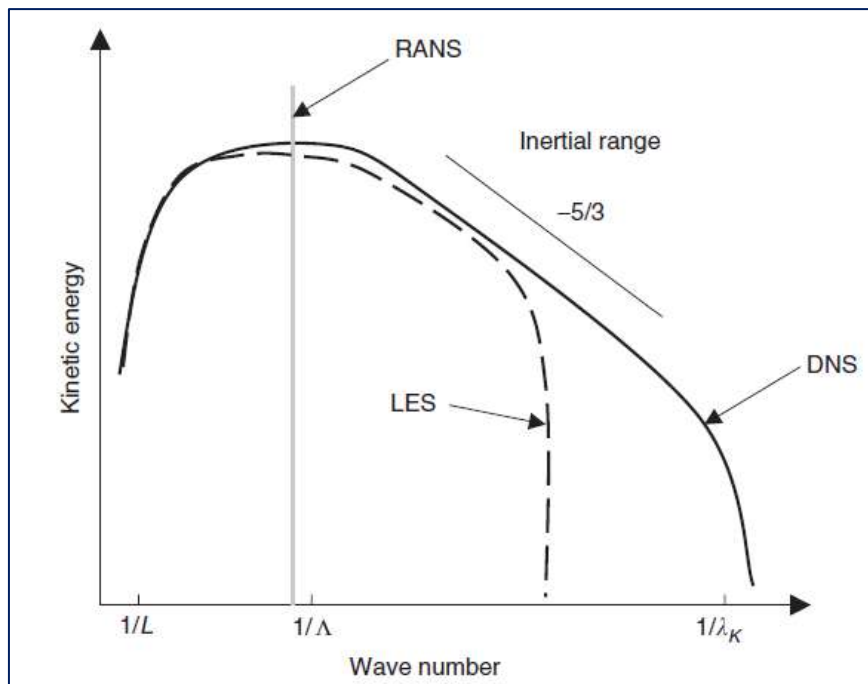


Figura 12. Alcance de los modelos de turbulencia en la simulación de flujos turbulentos

Fuente: (Crowe, 2006)

2.5.1 Direct Numerical Simulation

En realidad, no es un modelo de turbulencia, sin embargo, se suele mencionar ya que presenta una solución completa a las ecuaciones de Navier Stokes, esto es posible gracias a un mallado lo suficientemente fino (dimensiones menores a la escala de Kologorov) capaz de capturar hasta los remolinos más pequeños (ver Figura 13); a pesar de ello la solución de la simulación posee un alto costo computacional que solo es posible para problemas con números de Reynolds pequeños, lo cuales se desarrollan con supercomputadoras y en pocas instituciones alrededor del mundo.

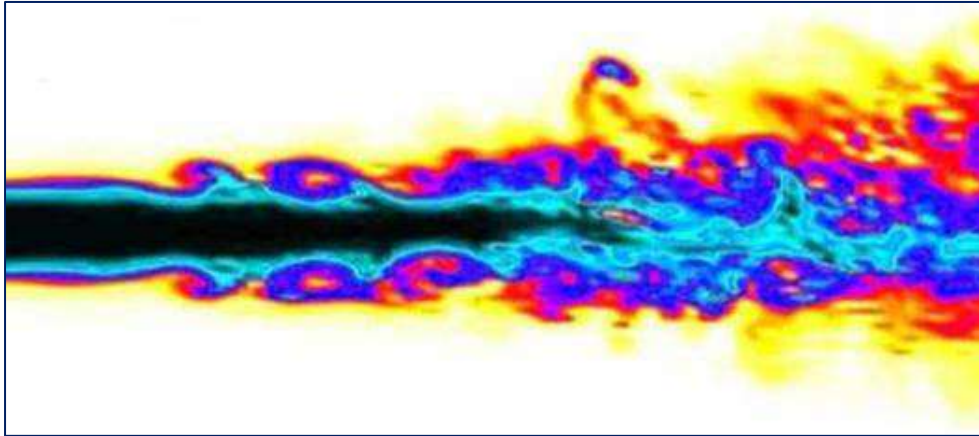


Figura 13. Modelo de un chorro con simulación DNS

Fuente: (IdealSimulations, 2019)

2.5.2 *Large Eddy Simulation*

LES aplica un filtro entre los remolinos grandes y pequeños y genera una tensión residual similar a las tensiones de Reynolds al promediar el tiempo, ello induce en un error, sin embargo, es mucho más pequeño que el error de los modelos RANS, además se reduce significativamente el costo computacional abarcando incluso problemas con números de Reynolds grandes.

Para grandes números de Reynolds los remolinos pequeños poseen un comportamiento similar, mientras que el comportamiento de los grandes remolinos se ve influenciado por la geometría del dominio, esta característica de los flujos turbulentos hace difícil capturar con precisión la turbulencia con un único modelo, sin embargo la esencia de LES radica en capturar el comportamiento de los remolinos más pequeños con un modelo compacto y el de los remolinos grandes a través de una simulación que depende del tiempo, es decir resuelve el comportamiento de los remolinos grandes y simula el de los pequeños, ver Figura 14.

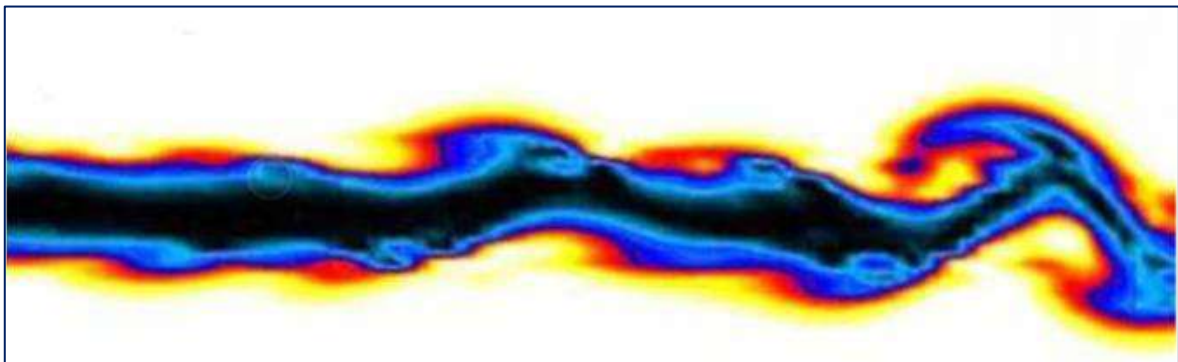


Figura 14. Modelo de un chorro con simulación LES

Fuente: (IdealSimulations, 2019)

Al simular los remolinos pequeños la cascada de energía turbulenta se ve afectada produciéndose un problema de cierre (ver Figura 15), sin embargo, existen modelos que

resuelven este problema tales como el modelo Smagorinsky, el cual es muy utilizado debido a su simplicidad y eficiencia, existen otros mucho más precisos sin embargo demandan un costo computacional más alto.

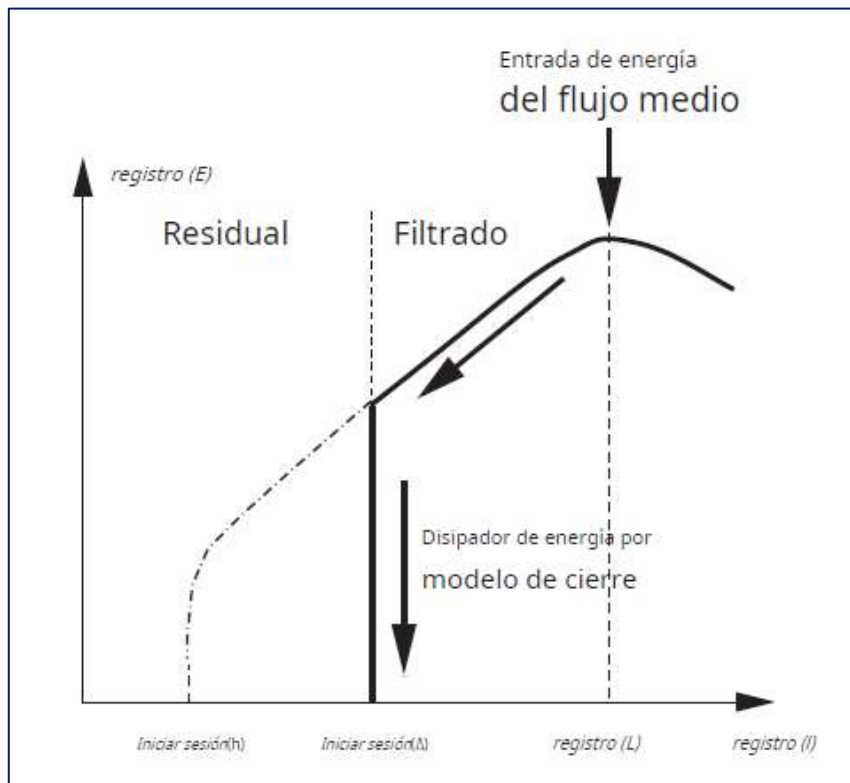


Figura 15. Cascada de energía en modelos LES

Fuente: (Zikanov, 2010)

2.5.3 Reynolds Averaged Navier Stokes

Estos modelos son la solución al alto costo computacional que conlleva aplicar tanto modelos LES como DNS; a pesar de solo simular el comportamiento de los remolinos grandes y pequeños, nos proporcionan información muy valiosa acerca del comportamiento físico de los fluidos. Los modelos RANS se caracterizan por su bajo costo computacional, sencillas y precisión; ver Figura 16.

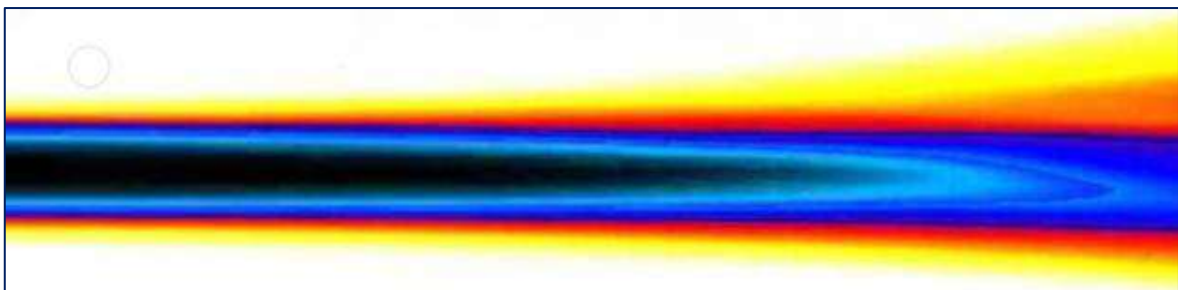


Figura 16. Modelo de un chorro con simulación RANS

Fuente: (IdealSimulations, 2019)

RANS resuelve los problemas de fluidos a partir de las ecuaciones promediadas de Reynolds, el cual consiste en la descomposición de las variables en un valor medio y otro fluctuante, ver Figura 17.

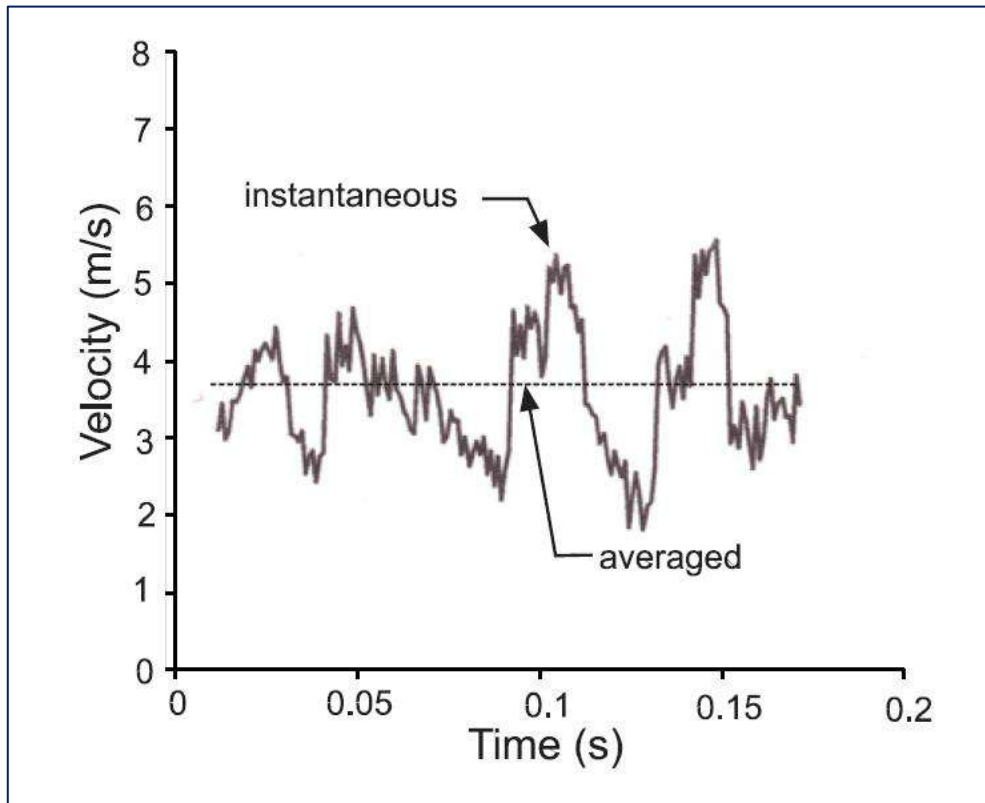


Figura 17. Variación de la velocidad a lo largo del tiempo en un punto del espacio.

Fuente: (Crowe, 2012)

El resultado de promediar en el tiempo las ecuaciones de Navier Stokes y continuidad, es un conjunto de 4 ecuaciones y 10 incógnitas, de estas se tiene la densidad promediada, la velocidad promediada en sus tres dimensiones y las seis incógnitas restantes son las componentes de tensiones de Reynolds; esto genera un problema de cierre.

El problema del cierre puede ser solucionado mediante la el uso de ecuaciones para resolver el esfuerzo de Reynolds o mediante las aproximaciones de Boussinesq, este último asume que las tensiones de Reynolds tienen un comportamiento igual a las tensiones de viscosidad. Muchos modelos RANS (k-e, k-w, etc.) utilizan estas aproximaciones para dar solución al tensor de esfuerzos de Reynolds.

2.5.3.1 Modelo de turbulencia k- ϵ . El modelo K- ϵ es el más utilizado para realizar simulaciones en el campo de la ingeniería, debido a su simplicidad para ejecutarlo, robustez y su bajo costo computacional; posee dos ecuaciones de transporte k y ϵ , la primera resuelve la energía cinética turbulenta, mientras que la segunda se encarga de resolver la tasa de disipación de la energía turbulenta.

El modelo es muy fiable en zonas con bajos gradientes de presión, dando buenos resultados en flujos internos, sin embargo, no ocurre lo mismo en flujos con rotación, fuerte separación, puntos de estancamiento, flujos con números de Reynolds bajos (ANSYS, Inc., 2021b).

2.5.3.2 Modelo de turbulencia k-w. Este modelo está basado en el modelo k-w de Wilcox, que incorpora modificaciones para números de Reynolds bajos, a pesar de que ello es una ventaja en las zonas cercanas a las paredes, es una desventaja en los flujos internos (ANSYS, Inc., 2021d).

En el modelo k-w, la ecuación de transporte para la tasa de disipación turbulenta ϵ , es reemplazada con la ecuación para la tasa de disipación específica w; últimamente tiene una gran aceptación en aplicaciones de ingeniería, debido a un mejor rendimiento en flujos con capa límite (número de Reynolds relativamente bajos) que el modelo k- ϵ , requiriendo un $Y_{plus} (y^+) < 2$ en comparación con el $Y_{plus} (y^+) < 0.2$ del modelo k- ϵ (ANSYS, Inc., 2021b); esto sin duda significa un considerable ahorro computacional ya que se requerirá un refinamiento menor en las paredes para capturar los fenómenos de capa límite.

2.5.3.3 Modelo de turbulencia SST. A menudo los modelos no predicen adecuadamente los fenómenos de capa límite, ante ello se han desarrollado modelos de turbulencia (Familia k-w) capaces de predecir adecuadamente la separación. El modelo SST está basado en el cizallamiento de esfuerzo de transporte y brinda predicciones muy precisas del inicio y separación de flujo en condiciones de gradiente adversas (ANSYS, Inc., 2021b). Este modelo es mucho más preciso y robusto que los dos modelos anteriores, ya que combina las ventajas del modelo k-epsilon y k-w, es decir la precisión en flujos internos y la captura de fenómenos cercanos a la pared (capa límite) respectivamente.

2.6 Programas de simulación de fluidos

2.6.1 Ansys CFX

Es un software CFD conocido por su amplia robustez de solución, precisión y su interfaz amigable, intuitiva y flexible. Ha sido ampliamente validado con resultados muy confiables y precisos que permiten ahorrar tiempo y dinero. Es capaz de modelar los siguientes problemas relacionados a la dinámica de fluidos computacional: Flujos en estado transitorio y estable; flujos laminares y turbulentos; flujos subsónicos, transónicos y supersónicos; transferencia de calor y radiación térmica; flotabilidad, flujos no newtonianos, flujos multifásicos; transporte de partículas, etc. (ANSYS, Inc., 2021a).

2.6.2 Ansys Fluent

Ansys Fluent ha sido validado en una amplia gama de aplicaciones proporcionando simulaciones con resultados precisos y confiables. Permite la creación de modelos con físicas avanzadas y variedad de fenómenos ligados a los fluidos con simulaciones rápidas que ayudan en la toma de decisiones en el proceso de innovación. Fluent simula los siguientes casos: Flujos en estado estacionario o transitorio; flujos compresibles e incompresibles; flujos inviscidos, laminares y turbulentos; flujos newtonianos y no newtonianos; gases ideales y reales; transferencia de calor (convección forzada, natural y mixta); transferencia de calor fluido/sólido; mezcla y reacciones químicas homogéneas y no homogéneas; modelos a superficie libre y multifásicos; transporte de partículas; medios porosos, etc. (ANSYS, Inc., 2021e) .

2.6.3 ANSYS Discovery

Es un software de la familia Ansys, que abarca problemas de diferentes físicas como dinámica de fluidos computacional, análisis de elementos finitos y electrónica tanto de baja como alta frecuencia. Está conformado a su vez por: SpaceClaim que es un software CAD para crear, editar y reparar geometrías que luego serán utilizadas en la simulación; Discovery Live que permite la simulación de prototipos de manera instantánea con simulaciones rápidas de diversos escenarios, proporcionando resultados cualitativos que influyen positivamente en la toma de decisiones para realizar modificaciones que conlleven a la mejora del prototipo; finalmente se tiene Discovery AIM que realiza simulaciones de alta fidelidad con resultados cuantitativos de las diferentes físicas que abarca la familia Discovery. Cabe señalar que Discovery resuelve problemas en un rango más pequeño que los softwares tradicionales de dinámica de fluidos computacional, análisis de elementos finitos y electrónica; por ejemplo, en Ansys CFX y Fluent se puede resolver problemas multifásicos mientras que en Discovery únicamente resuelve problemas monofásicos.

2.6.4 Flow 3D

Es un software de modelamiento computacional con 40 años de historia, es una herramienta poderosa que optimiza y reduce el tiempo de solución, posee una gran precisión al resolver problemas relacionados a flujos incompresibles internos y externos a superficie libre, transferencia de calor, turbulencia, tensión superficial, cambios de fase, etc., abarcando una diversa gama de investigaciones en diferentes campos de la industria como la aerodinámica, automotriz, ingeniería hidráulica, ingeniería naval, ingeniería ambiental, etc. Entre los casos que simula se tiene: Flujos transitorios; flujos laminares, viscosos, y turbulentos, flujos internos y externos y de superficie libre; flujos bifásicos; transferencia de calor; medios porosos; fluidos compresibles e incompresibles; transporte de partículas; etc (FLOW-3D, 2021).

2.6.5 *OpenFoam*

Es el software CFD más importante de código abierto y ofertado de manera gratuita. Fue puesto en el mercado en el 2004 por Open CFD, estudia problemas sobre el comportamiento de fluidos como reacciones químicas, turbulencia y transferencia de calor. Su código es puesto a prueba y validado a través de cientos de pruebas diarias que dan garantía de su calidad; puede modelar flujos incompresibles y compresibles; transferencia de calor y convección natural; flujos a superficie libre; etc. (OpenFOAM, 2021).





Capítulo 3

Ansyes CFX

3.1 Introducción a Ansyes CFX

Ansyes CFX es un programa CFD de modelamiento tridimensional que posee una interfaz amigable y de fácil comprensión, resuelve problemas relacionados al comportamiento de fluidos proporcionando resultados de gran fidelidad y precisión.

Ansyes CFX se basa en el método de volúmenes finitos, el cual consiste en la discretización del dominio a través de los volúmenes de control, en los cuales se resolverá cada una de las ecuaciones de conservación. El código está conformado por tres etapas de simulación bien definidas, que son: Preprocesamiento, solución y postprocesamiento; la primera consiste en la elaboración/importación de la geometría, creación del mallado y la configuración del dominio, de las condiciones de borde y del solucionador; la segunda etapa comprende la ejecución de la solución y finalmente la última etapa consiste en la obtención y análisis de los resultados a través de las herramientas de postprocesamiento, ver Figura 18.



Figura 18. Etapas de la simulación en Ansyes CFX.

Fuente: (Carrera Galárraga, 2019)

3.2 Fluidos multifásicos

En CFX cuenta con los modelos multifásicos euleriano-euleriano y el modelo lagrangiano; cada uno estudia, explica y describe el flujo de los fluidos desde sus puntos de vista. El flujo multifásico consiste en la existencia de dos o más fluidos, estos fluidos pueden compartir un mismo campo de flujo como también pueden tener uno propio. Se suele realizar una mezcla macroscópica entre los fluidos sin embargo suelen ser discernibles a través de una interfaz. Ansys CFX permite la simulación de modelos multifásicos como corrientes de fluidos, burbujas, partículas sólidas y flujos a superficie libre, en los que es posible la simulación de burbujas de gas en un líquido, gotas de líquido en un gas u otro líquido inmiscible, etc (ANSYS, Inc., 2021b).

3.2.1 *Flujo multifásico Lagrangiano*

Haciendo una comparación con la cinemática, este método estudia el comportamiento de los fluidos al seguir la trayectoria de los objetos independientemente a través del vector posición y del vector velocidad como funciones de tiempo, permite conocer el intercambio de cantidad de movimiento y energía entre los objetos: De igual manera si es comparado a un análisis de sistema se tendría que rastrear la posición y velocidad de una pequeña masa fija a lo largo de su recorrido por el dominio y más difícil se vuelve si estudiamos cada molécula de fluido a lo largo de su trayectoria, pues recordemos que el fluido es un conjunto de miles de millones de moléculas que son difíciles de identificar y peor aún de describir su interacción con otras moléculas (Çengel y Cimbala, 2018). Este enfoque suele ser empleado en el estudio de transporte de partículas, sin embargo, el estudio de los fluidos a través de este enfoque es muy difícil de poner en práctica y de hacerlo demandaría un enorme gasto computacional.

3.2.2 *Flujo multifásico Euleriano*

Es el método más común para estudiar el comportamiento de los fluidos, el cual consiste en determinar un volumen de control en el que se definen variables de campo, funciones de espacio y tiempo. En este enfoque es más importante lo que ocurre en cierto punto del espacio y en un determinado tiempo que lo que sucede a cierta partícula durante su trayectoria (Çengel y Cimbala, 2018).

3.2.2.1 Modelo no homogéneo. En este modelo cada fluido posee su propio campo de flujo y un campo de solución para cada fase; estos interactúan a través de la interfase. Por ejemplo, dos fases pueden tener campos de velocidad y temperatura separados, pero habrá una tendencia a que estos lleguen al equilibrio a través de términos de transferencia de calor y arrastre de interfase. En Ansys CFX se encuentran disponibles tres modelos de múltiples fases no homogéneos, tales como: El modelo de partículas, el modelo de mezcla, el modelo de superficie libre (ANSYS, Inc., 2021b).

3.2.2.2 Modelo homogéneo. Es un caso particular del modelo multifásico euleriano, en el cual la transferencia entre fases es muy grande, dando como resultado que los fluidos compartan un campo de flujo común, así como otros campos relevantes como la turbulencia, por ejemplo, un flujo a superficie libre que está expuesto a los efectos de la gravedad, posee sus fases bien definidas (ANSYS, Inc., 2021b).

3.2.3 Flujo a superficie libre

Es la aplicación más común del flujo multifásico homogéneo, consiste en una situación donde las fases se encuentran separadas y bien definidas por una interfaz; esto es gracias al modelo VOF que aplica Ansys CFX en la solución de flujos multifásicos, este consiste en asignar como fracción de volumen el valor de uno o cero en cada volumen de control a excepción en la interfase donde toma un valor entre cero y uno.

La interfaz se mantiene unida gracias a la fuerza de tensión superficial; cuando la interfaz toca una pared, esta puede atraer o repeler el líquido dependiendo si la pared se encuentra humectada o no respectivamente y es similar a la formación de un menisco en tubos capilares, para habilitar este efecto en Ansys CFX es necesario introducir el valor de tensión superficial y el fluido primario. Un claro ejemplo son los canales abiertos, flujo alrededor de barcos, problemas de llenado de tanques, turbinas, etc. (ANSYS, Inc., 2021b).

3.3 Modelo multicomponente

En un flujo multicomponente está presente más de un fluido, pero a diferencia de los flujos multifásicos, estos se mezclan a escala microscópica e incluso los fluidos pueden ser una mezcla química de otros. Por ejemplo, son las burbujas de aire en el agua en las que el gas ozono se disuelve tanto en la fase gaseosa como en la líquida (ANSYS, Inc., 2021b).

3.4 ANSYS Workbench

Ansys Workbench es un banco de trabajo de diferentes softwares de Ansys tales como dinámica de fluidos computacional, análisis de elementos finitos, electrónica, entre otros. Permite la gestión de proyectos mediante la transferencia de datos entre los sistemas de análisis como Flow CFX, Flow Fluent, etc. o entre los componentes de sistemas, por ejemplo, la geometría, la malla y CFX; ver Figura 19. Simplifica el flujo de trabajo; pues existe una asociación entre la geometría, la malla, la configuración y los resultados (ver Figura 20), permitiendo actualizar el proyecto cuando se realizan cambios en alguno de sus

componentes; además reduce el gasto computacional al ejecutar los programas como Ansys CFX, Fluent o cualquier otro dentro del entorno de Workbench. (Ansys Workbench)

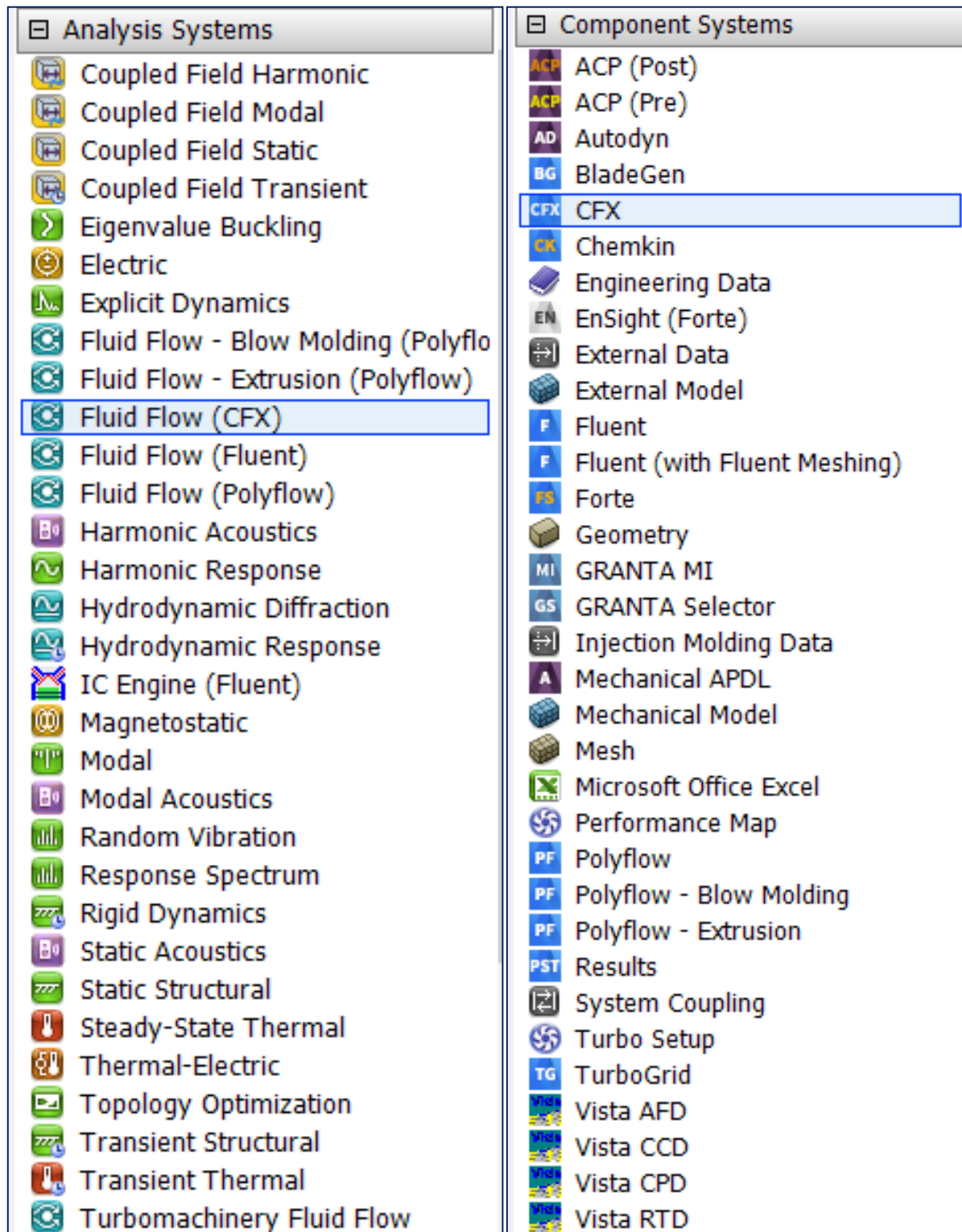


Figura 19. A la izquierda los análisis de sistemas. A la derecha los componentes de sistemas

Fuente: Elaboración propia

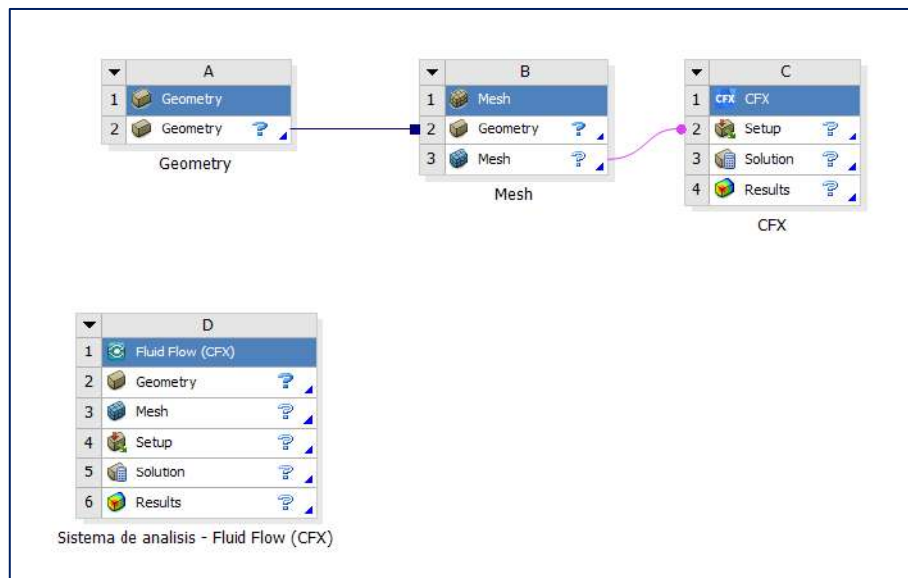


Figura 20. Flujo de trabajo en Ansys Workbench

Fuente: Elaboración propia

3.5 Pre-Procesamiento

3.5.1 Geometría

Ansys posee dos softwares CAD para la realización de geometrías, los cuales son DesignModeler y SpaceClaim, siendo el primero el más utilizado y el que ofrece mejores herramientas para la realización de geometrías complejas. DesignModeler permite la creación de geometrías 2D y 3D de manera intuitiva y rápida, modela piezas 3D, importa y repara geometrías importadas de otros softwares CAD, simplifica las geometrías mediante la edición e incluso parametriza alguna característica de la geometría, como por ejemplo un ángulo, permitiendo automatizarlo de manera rápida mediante la introducción de determinados valores o parámetros ya definidos.

Cabe señalar que el volumen del dominio es únicamente el volumen del fluido y no la estructura en sí, las características de esta son asignadas en la condición de frontera pared en la cual se asigna el valor de la rugosidad absoluta del material; además es importante definir el dominio que se requiere modelar y del cual se tiene información de sus condiciones de frontera, con la finalidad de obtener información relevante en el dominio.

3.5.2 Malla

El mallado se realiza en Ansys Meshin y consiste en la discretización del dominio, es decir la geometría es seccionada en pequeños volúmenes de control en los cuales se resolverán cada una de las ecuaciones de conservación; por lo tanto, es muy importante generar un mallado con buenos parámetros de calidad en la simulación ya que de ella depende la convergencia de las ecuaciones de conservación, resolución y fiabilidad de resultados, el tiempo de solución y costo computacional.

Existen mallas estructuradas y no estructuradas; las primeras se emplean en geometrías regulares y consisten en una malla compuesta por un arreglo de elementos cuadriláteros/hexaédricos que siguen un patrón reticular, mientras las mallas no estructuradas se emplean en geometrías irregulares y complejas ya que se adaptan mejor a las superficies irregulares, estas generan un mallado compuesto por elementos triangulares/tetraédricos.

Entre los parámetros más significativos a la hora de evaluar la calidad del mallado, se tiene:

3.5.2.1 Calidad del elemento. Este parámetro de calidad varía entre 0 y 1, un valor de 1 indica un cubo o cuadrado perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo. El valor se determina a través de la razón entre el volumen y la raíz cuadrada del cubo de la suma de las longitudes de las aristas al cuadrado para elementos tridimensionales (ANSYS, Inc., 2021f).

3.5.2.2 Relación de aspecto. La relación de aspecto es la relación entre un lado más largo y un lado más corto tanto para cuadriláteros como triángulos. La mejor relación de aspecto es el valor de 1, sin embargo, se recomienda y acepta que este valor no supere a 3; una relación elevada de este parámetro implica una malla con equipamientos excesivos y debe evitarse en lo posible debido a las repercusiones negativas en la convergencia y presión de los resultados. Por ejemplo, en la Figura 21 se presenta tanto un cuadrado y un triángulo con relación de aspecto de 1 y 20 (ANSYS, Inc., 2021f).

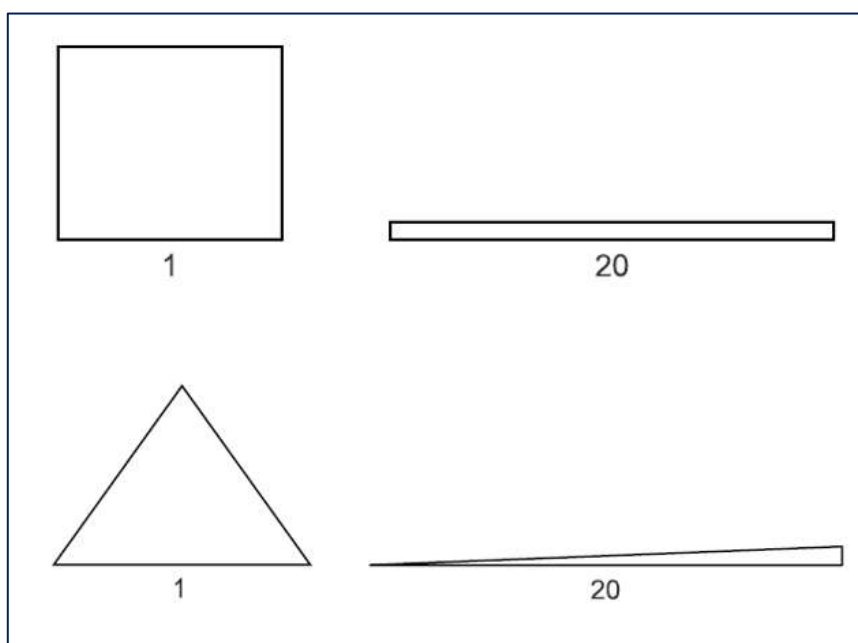


Figura 21. Relación de aspecto de una celda de forma cuadrada y triangular

Fuente: (ANSYS, Inc., 2021f)

3.5.2.3 Oblicuidad. Este parámetro evalúa la asimetría del elemento. Esta determina que tan cerca esta una cara o celda de una figura ideal (equilátero o equiángula); en el que un valor de 0 indica una celda equilátera y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada (astilla); de acuerdo a expertos del instituto ESSS el valor máximo que se debe tolerar es 0.97 y de ninguna manera tener una celda con un valor de 1 ya que ello conlleva a que el elemento no transmita la información correcta a las celdas adyacentes (ANSYS, Inc., 2021f), ver Figura 22.

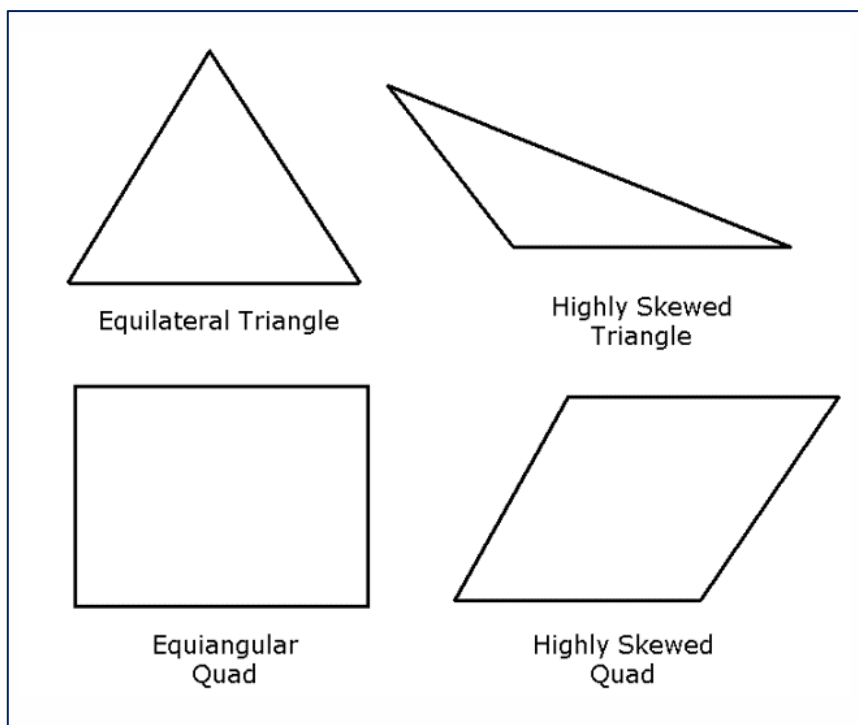


Figura 22. Triángulos y cuadriláteros ideales y sesgados

Fuente: (ANSYS, Inc., 2021f)

3.5.2.4 Ortogonalidad. El rango de ortogonalidad varía entre 0 y 1. Se recomienda que este valor este cercano a la unidad, esto indica que los ángulos en las celdas tienden a 90 grados; su valor se determina mediante vectores normales a las caras y vectores que parten del centroide de la celda (ANSYS, Inc., 2021f), ver Figura 23.

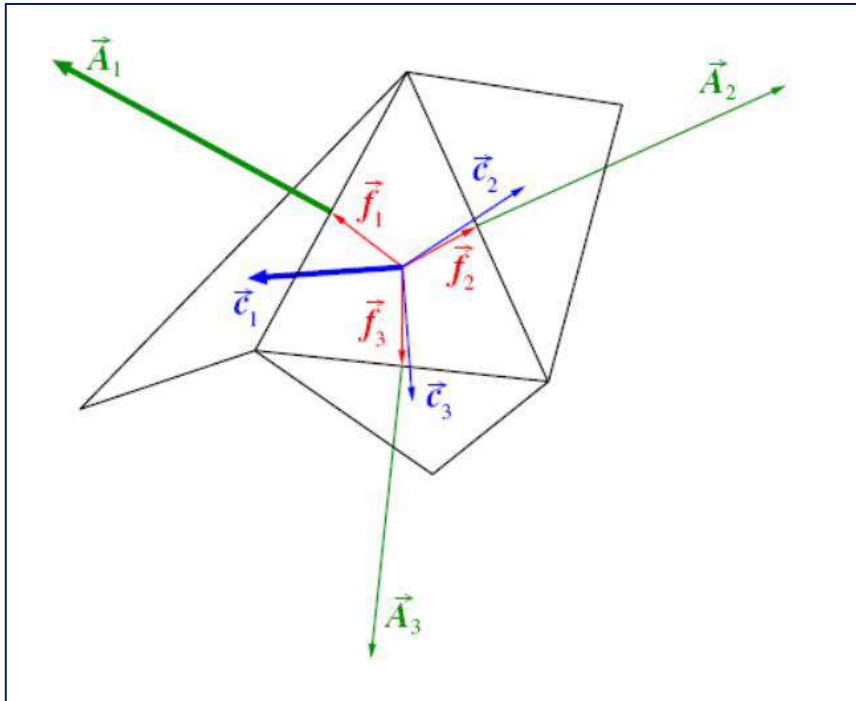


Figura 23. Vectores utilizados para calcular la calidad ortogonal de una celda

Fuente: (ANSYS, Inc., 2021f)

En la Tabla 5 y Tabla 6 se presenta un resumen de los parámetros de calidad del mallado.

Tabla 5. Parámetros de calidad

Parámetro	Rango	Valor optimo
Calidad	0-1	Cercano a 1
Relación aspecto	1-3	Cercano a 1
Oblicuidad	0-1	Ver tabla 6
Ortogonalidad	0-1	Cercano a 1

Fuente: (ANSYS, Inc., 2021f)

Tabla 6. Calidad del parámetro Skewness

Valor de skewness	Cell quality
1	degenerate
0.9-<1	Bad(silver)
0.75-0.9	Por
0.5-0.75	Fair
0.25-0.5	Good
>0-0.25	Excellent
0	Equilateral

Fuente: (ANSYS, Inc., 2021f)

3.5.3 Physis

En esta etapa se define el tipo de análisis de la solución, las propiedades de los materiales; los modelos físicos apropiados como turbulencia, flotabilidad, multifase, superficie libre, etc.; se introduce las condiciones de contorno en las fronteras del dominio y se proporciona los valores iniciales en cada una de las condiciones de contorno, estas son muy importantes ya que una información errónea conllevaría a obtener resultados erróneos.

3.5.4 Configuración del Solver

En esta etapa se configura; los controles de convergencia, los cuales se suponen como un número máximo de iteraciones en las que el modelo alcanza la convergencia; además deben establecerse los criterios de convergencia tales como: los valores promedio de los residuales que deben alcanzar un valor menor a 10 E-4 (valor mínimo recomendable) entre dos iteraciones consecutivas y un imbalance menor al 1% en las ecuaciones de conservación.

3.6 Ejecución del solver

Comprende la configuración de la ejecución y la verificación de la convergencia; en la primera presenta la opción de doble precisión con la que se tendrá mejores resultados y una solución en paralelo que permitirá reducir el tiempo de solución de una manera significativa, sin embargo, estas opciones demandan un mayor costo computacional; mientras que en la segunda se verifica el cumplimiento de los controles y criterios de convergencia, en caso no cumplirse y siempre que haya una tendencia hacia esta, se recomienda ejecutar nuevamente el solucionador ya sea manteniendo el número de iteraciones o cambiándolo, caso contrario realizar un mallado de mejor calidad con el que se alcance la convergencia.

3.7 Post-Procesamiento

Es la última etapa en la simulación; consiste en la obtención de resultados a través de diferentes herramientas como planos, vectores, líneas de corriente, isosuperficies, volúmenes de control, animaciones, gráficas, calculadora, etc.; en la que se visualizara los resultados de la variable de interés como velocidades, presiones, esfuerzos de corte, temperatura, etc.



Capítulo 4

Simulación numérica

4.1 Descripción del problema

El Reservorio Poechos en la actualidad no solo atraviesa el problema de colmatación de sedimentos acarreados por las grandes avenidas de los fenómenos extraordinarios y épocas de verano, sino que también presenta problemas de erosión en las proximidades de los cimientos de la presa. El problema surge luego de que el chorro evacuado a través de las compuertas es impulsado por el salto de esquí para luego impactarse en un cerro ubicado al frente de este, lo cual provoca el recirculamiento del flujo rediriéndose hacia los cimientos de la presa y provocando erosión en la misma, ver Figura 24.



Figura 24. Recirculamiento en la poza de disipación

Fuente: (Reyes, 2018)

Con la finalidad de reproducir los fenómenos que ocurren en la poza de disipación se ha realizado una simulación de un modelo que abarca el aliviadero de compuertas, el salto de esquí y la poza de disipación del Reservorio Poechos; para así obtener información relevante sobre estos. El modelo comprende la evaluación del problema en el caso más crítico, el cual se desarrolla cuando se evacua los 5400 m³/s, es decir la máxima capacidad de flujo a través de las 3 compuertas.

4.2 Geometría

La geometría ha sido elaborada en componente de Ansys llamado DesignModeler, esta herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) es de fácil implementación y posee una interfaz amigable con el usuario; permite crear e incluso editar e importar geometría realizadas en otros softwares CAD compatibles.

Para realizar la geometría es necesario haber identificado previamente el dominio a simular. Luego se ingresa a Ansys Workbench y se selecciona y arrastra hacia el banco de trabajo el sistema de análisis Ansys CFX, finalmente ingresar a geometría seleccionando DesignModeler; ver Figura 25.

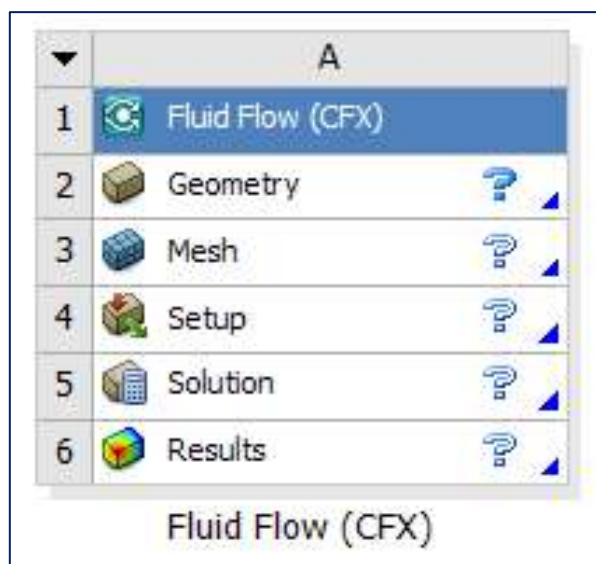


Figura 25. Sistema de análisis Ansys CFX

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la creación de la geometría, debemos ubicarnos en uno de los 3 planos por defecto (X, Y y Z) o en cualquier otro plano creado, estos a su vez alojan uno o más sketch que luego se convierten en bocetos de acuerdo a la sección/perfil transversal o longitudinal de una parte determinada del modelo, finalmente se aplica herramientas de modelado para convertirlos en sólidos volumétricos. En caso la geometría del modelo sea compleja, esta debe dividirse en geometrías más simples, es decir realizar diferentes sketches, que en su conjunto conformarán la geometría complicada.

El modelo elaborado posee las siguientes características:

- Ha sido elaborado en una escala 1/100, puesto que a escala real superaba 8.8 veces el volumen admitido por el software, siendo 100 km cúbicos el volumen máximo permitido (ANSYS, Inc., 2021g).
- Con la finalidad de garantizar que el fluido se mantenga contenido en el dominio, se ha asignado al modelo una altura mayor al tirante del fluido a lo largo del recorrido en el dominio.
- La altura en la entrada es de 9.233 m (escalado sería 9.233 cm), esta representa el tirante del flujo, ya que este al atravesar la compuerta se ve afectado por un coeficiente de contracción de 0.754; este ha sido determinado, considerando un coeficiente de velocidad igual a 0.98 y a partir de la siguiente fórmula.

$$Q = C_v * C_c * \left(2g \left(H - \frac{a}{2} \right) \right)^{0.5} * b * a \quad (4.1)$$

Donde:

Q: Caudal [m³]

H: Altura del fluido [m]

C_v : Coeficiente de velocidad

a: Altura de la compuerta [m]

C_c : Coeficiente de contracción

b: Ancho de la compuerta [m]

G: Aceleración de la gravedad [m/s²]

- Entre las herramientas utilizadas para la elaboración de la geometría se tiene: *plane, sketch, extrude, Skin/loft, boolean, slice, delete, spline, fasesplit, deletet, transform, name selectiont*, etc., ver Figura 26.

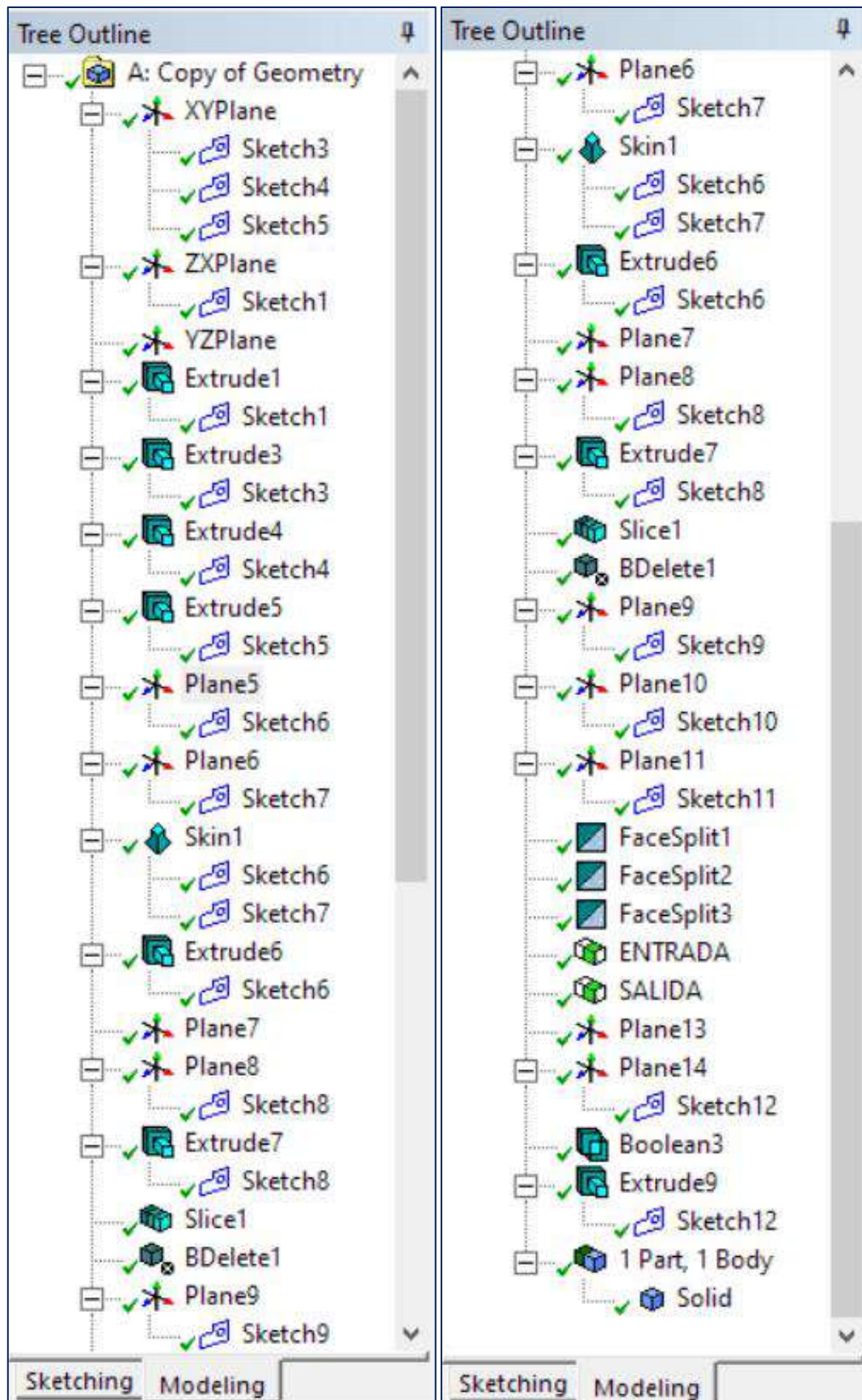


Figura 26. Herramientas usadas en la elaboración del modelo CAD

Fuente: Elaboración propia

- La geometría está conformada por el aliviadero de compuertas que posee una pendiente de 10%, un salto de esquí y la poza de disipación con una profundidad de 25 m a partir de la parte inferior del salto de esquí y un talud de 2, el cual es característico de suelos como grava arenosa, arena limosa y limos de los cuales está conformado el cauce del Río Chira; ver Figura 27.

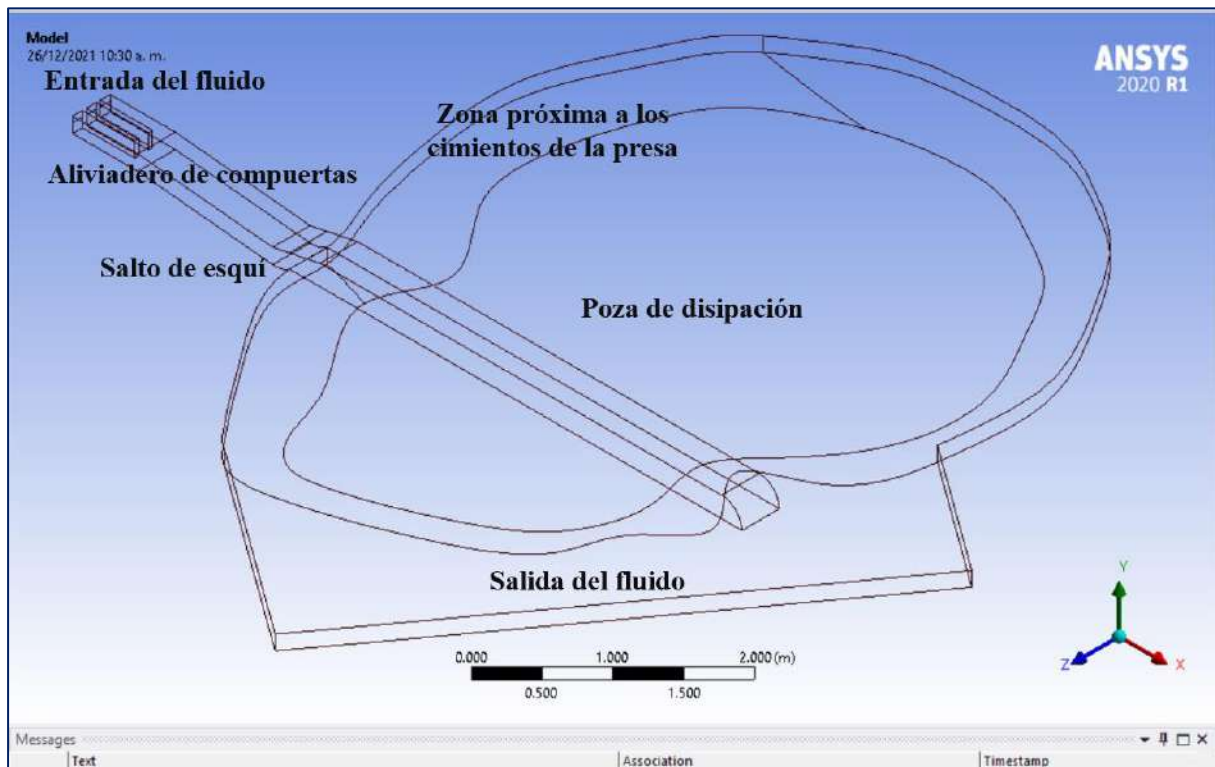


Figura 27. Geometría del modelo

Fuente: Elaboración propia

4.3 Malla

El mallado se ha desarrollado con el componente Ansys Meshing perteneciente al banco de trabajo Workbench, este es la parte más importante cuando se desarrolla una simulación, puesto que la calidad influye directamente en la solución de las ecuaciones de conservación, el tiempo que demanda la solución y el costo computacional; es por ello que los parámetros de calidad sean muy buenos. El mallado realizado es tetraédrico debido a que se adapta mejor en geometrías irregulares, tal como es nuestro caso, además se ha asignado un dimensionamiento “sizing” igual a 0.035 m con el cual se ha obtenido 331 337 nodos en todo el dominio.

En las Figura 28 y Figura 29 se muestra la configuración global y local del mallado respectivamente.

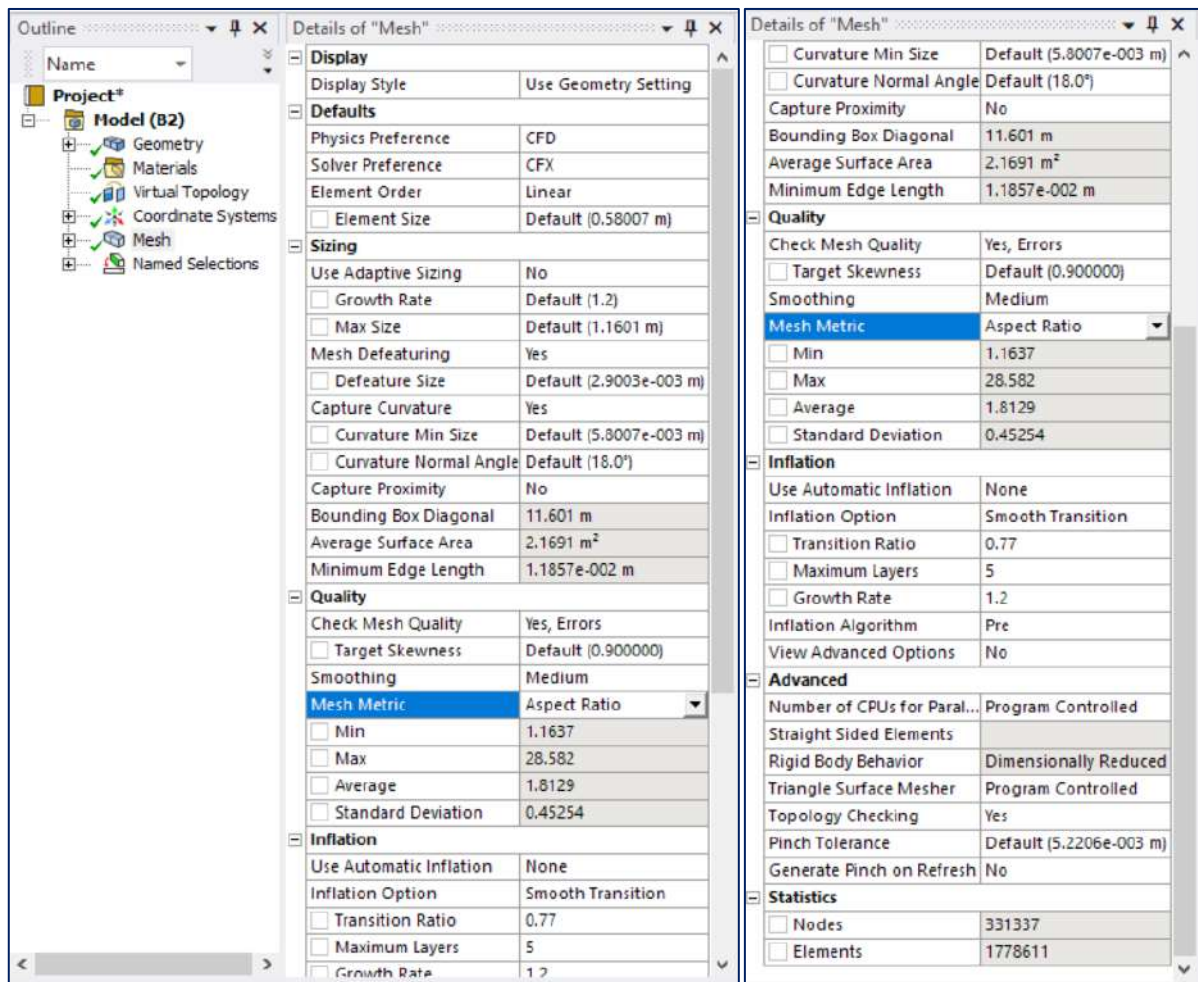


Figura 28. Configuración global del mallado

Fuente: Elaboración propia

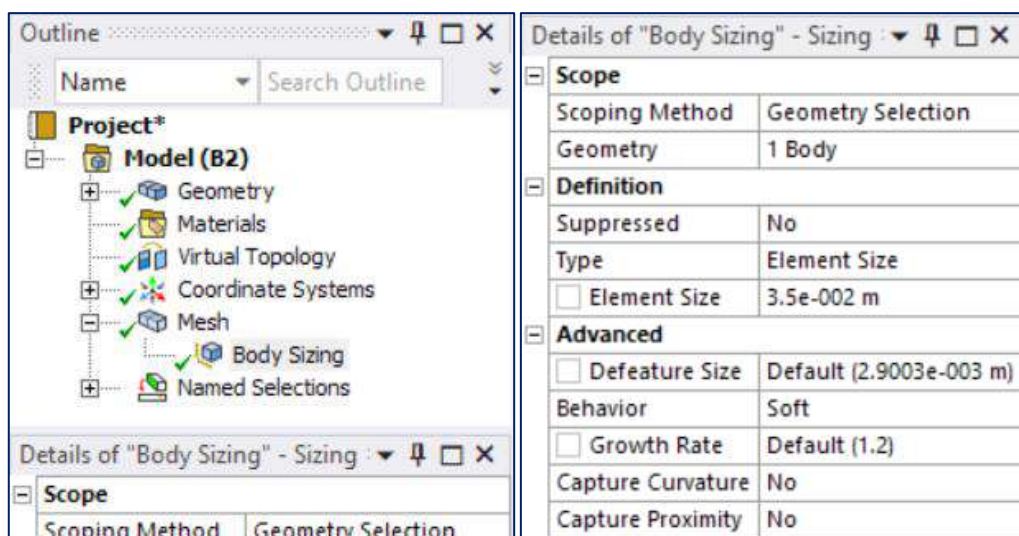


Figura 29. Configuración local del mallado (Body sizing - 0.035m)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de los parámetros de calidad, a partir de la configuración global y local del mallado, son muy buenos y se presentan en la Tabla 7, Figura 30, Figura 31, Figura 32 y Figura 33; estos se pueden corroborar en la Tabla 5 y Tabla 6 abordados en el tema de mallado del capítulo 3.

Tabla 7. Parámetros de calidad del mallado

Parámetro	Valor promedio de calidad	Cell quality
Calidad del elemento	0.84654	Ok
Relación aspecto	1.81290	Ok
Oblicuidad	0.21292	Excelente
ortogonalidad	0.78587	Ok

Fuente: Elaboración propia

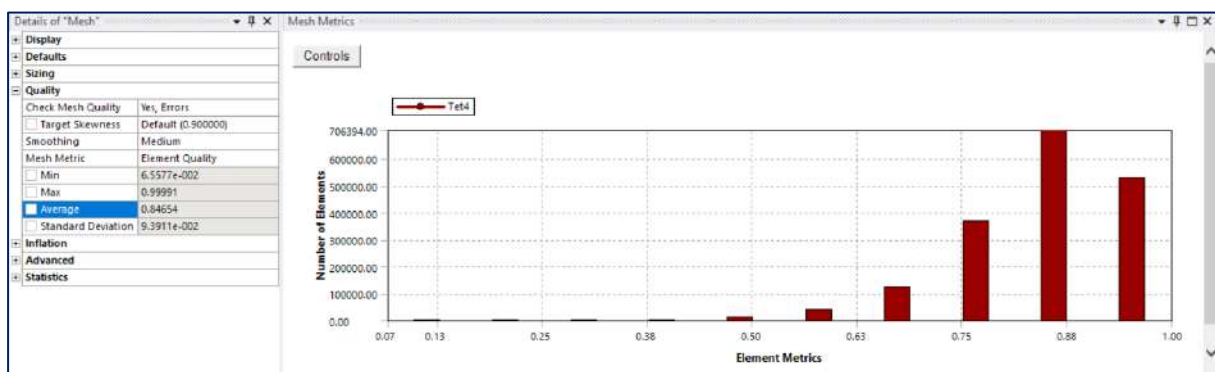


Figura 30. Calidad del elemento

Fuente: Elaboración propia

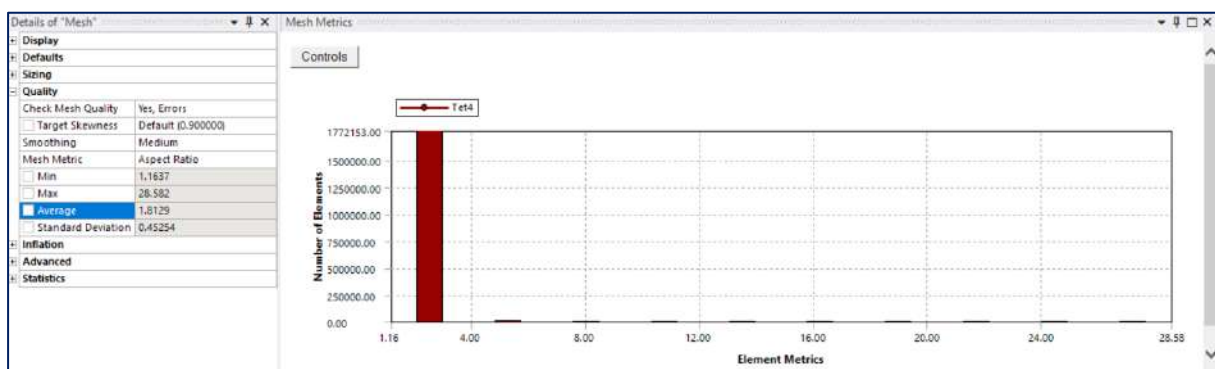


Figura 31. Relación aspecto

Fuente: Elaboración propia

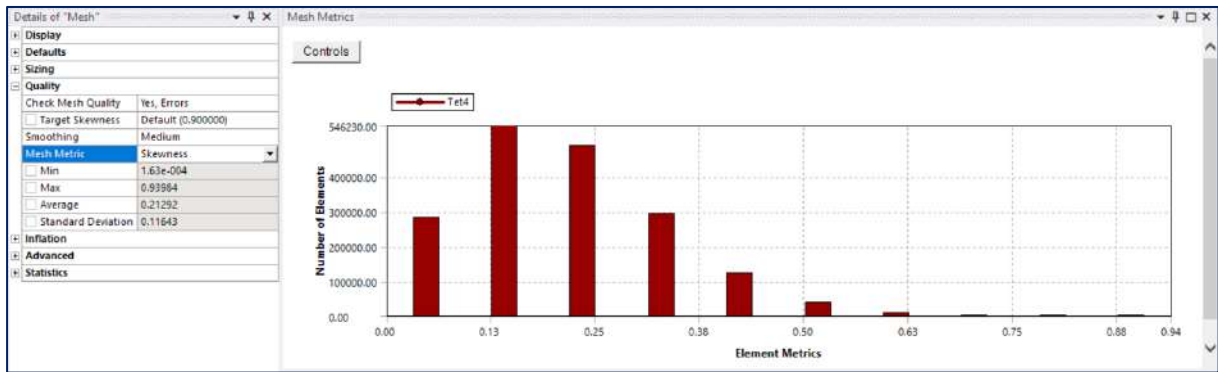


Figura 32. Oblicuidad

Fuente: Elaboración propia



Figura 33. Ortogonalidad

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el mallado obtenido en la geometría se presenta en la Figura 34.

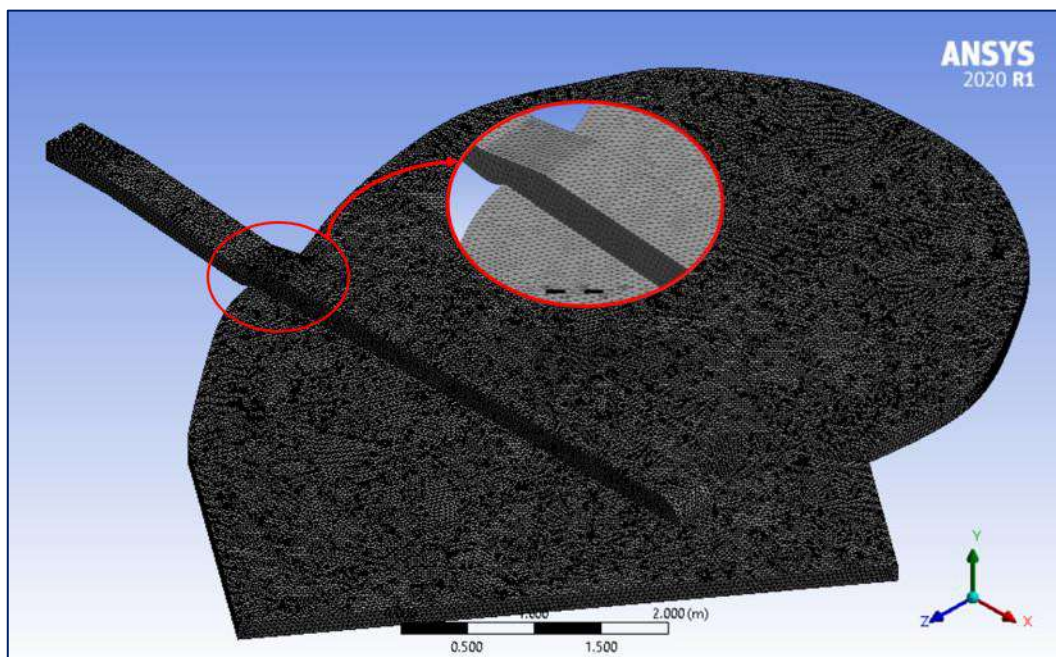


Figura 34. Mallado de la geometría

Fuente: Elaboración propia

4.4 CFX-pre

En esta etapa se realiza la configuración del dominio, las condiciones de borde y del solucionador.

4.4.1 Tipo de análisis

El modelo se ha realizado con un tipo de análisis estable, donde se evalúa el caso más crítico el cual vendría a ser cuando se evacue un caudal de $5400 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de las tres compuertas, ver Figura 35.

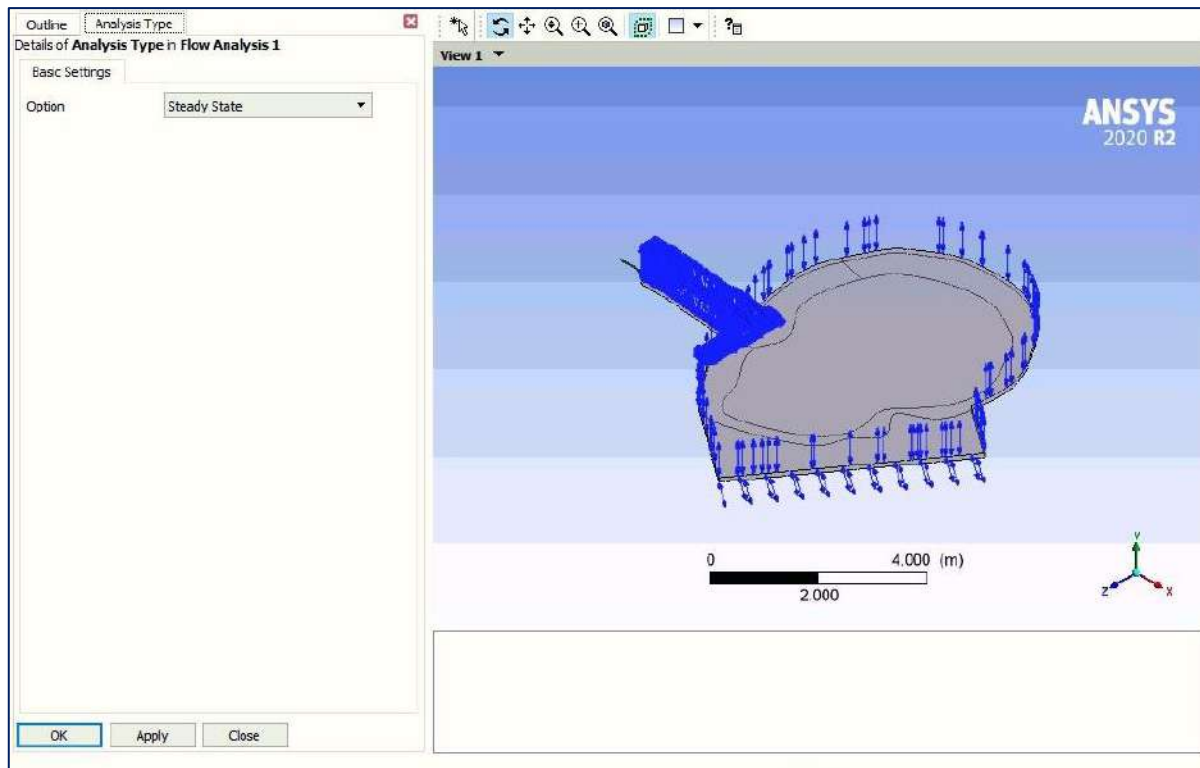


Figura 35. Análisis estable del modelo

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Configuración del dominio

El dominio del modelo multifásico presenta la siguiente configuración.

- El tipo de dominio es fluido, pues la geometría del modelo representa el volumen únicamente del fluido.
- El dominio está compuesto por los fluidos agua y aire ambos se encuentran a temperatura ambiente y son considerados continuos en el mismo.
- La presión absoluta es 1 atm y es a partir de la cual se establecen las presiones relativas establecidas en las condiciones de borde de la simulación.
- La gravedad en el eje "Y" es igual a -9.81 m/s^2 , mientras que en los otros ejes es cero.

- La flotabilidad es una fuerza que surge cuando la gravedad actúa sobre fluidos con diferentes densidades, está determinada por la densidad de referencia de flotabilidad que posee un valor aproximado de 1.2 kg/m^3 y permite compensar la presión hidrostática en el dominio.
- Modelo homogéneo multifásico a superficie libre estándar.
- La transferencia de calor no se evalúa, puesto que el análisis no involucra variación de temperatura.
- Se selecciona como modelo de turbulencia el modelo K-épsilon, con la finalidad de predecir el comportamiento turbulento del flujo de los fluidos. (Ruiz, 2017), en su tesis de pregrado titulada “Calibración Hidráulica del desarenador San Gaban II analizando los modelos de turbulencia con Telemac 3D”, concluyó que el modelo de turbulencia K-épsilon representa mejor el comportamiento hidráulico, siendo este el motivo de la elección del dicho modelo de turbulencia.
- El coeficiente de tensión superficial 0.072 N/m , permite modelar la fuerza de tensión superficial que existe en una interfaz de superficie libre, teniendo en cuenta el fluido primario que es el agua. La interfase forma un ángulo a través del fluido primario cuando este entra en contacto con la pared y se da a través de la superficie libre; ver Figura 36.

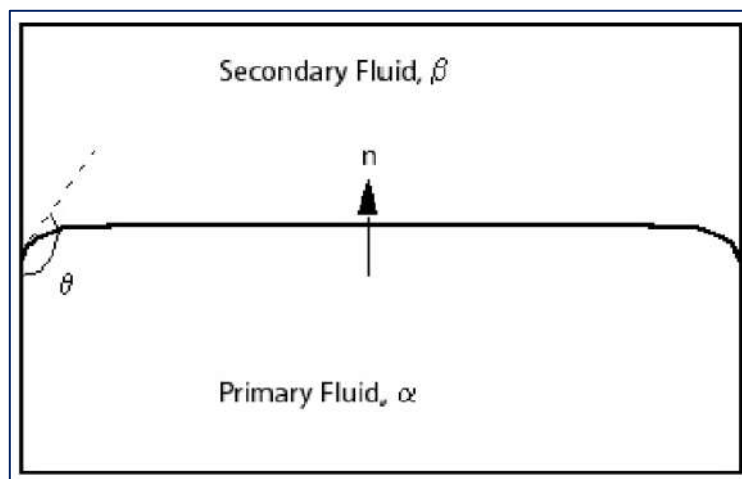


Figura 36. Ángulo en el fluido primario entre la interfase y la pared

Fuente: (ANSYS, Inc., 2021c)

En la Figura 37, Figura 38 y Figura 39 se presenta la configuración del dominio.

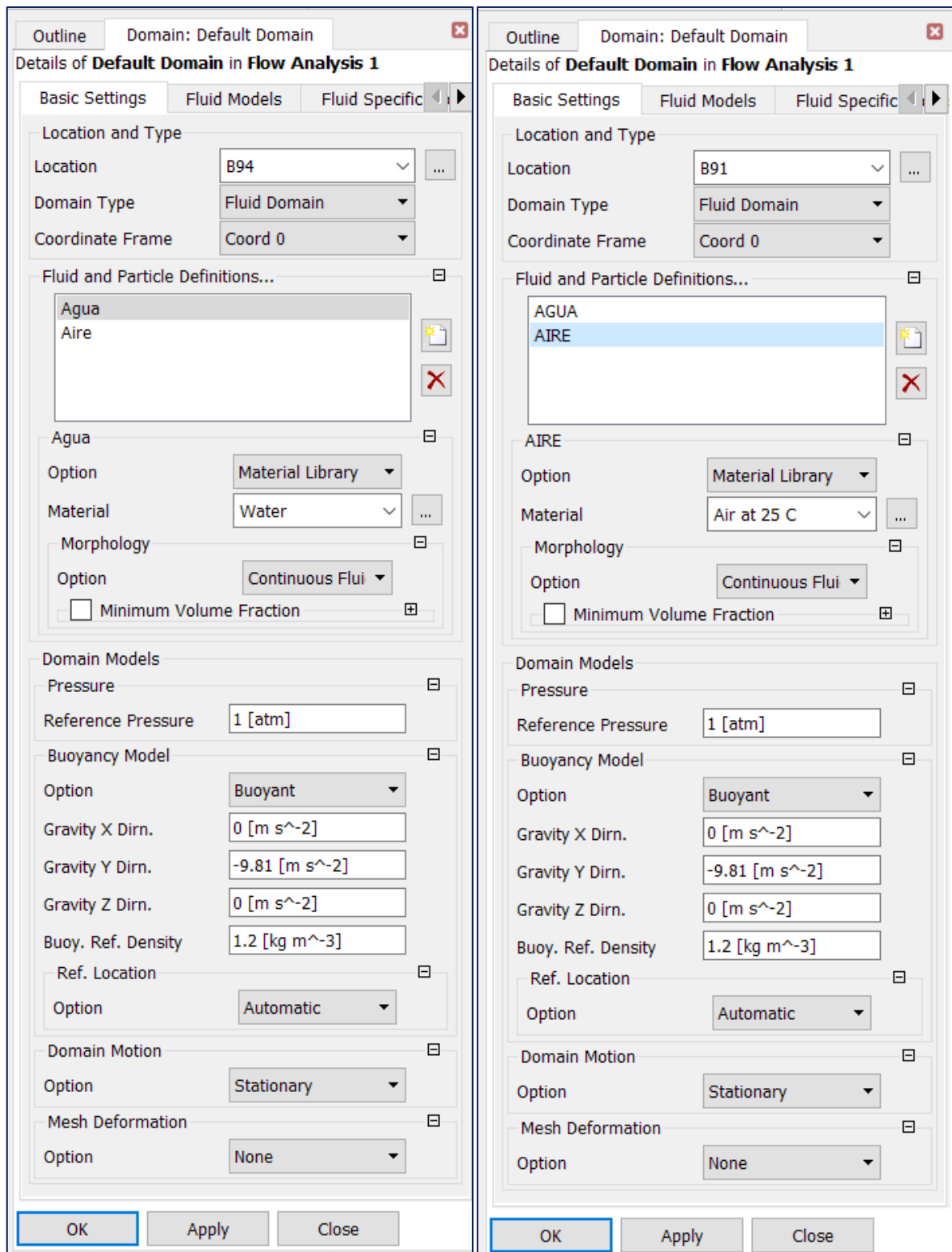


Figura 37. Configuración básica del dominio

Fuente: Elaboración propia

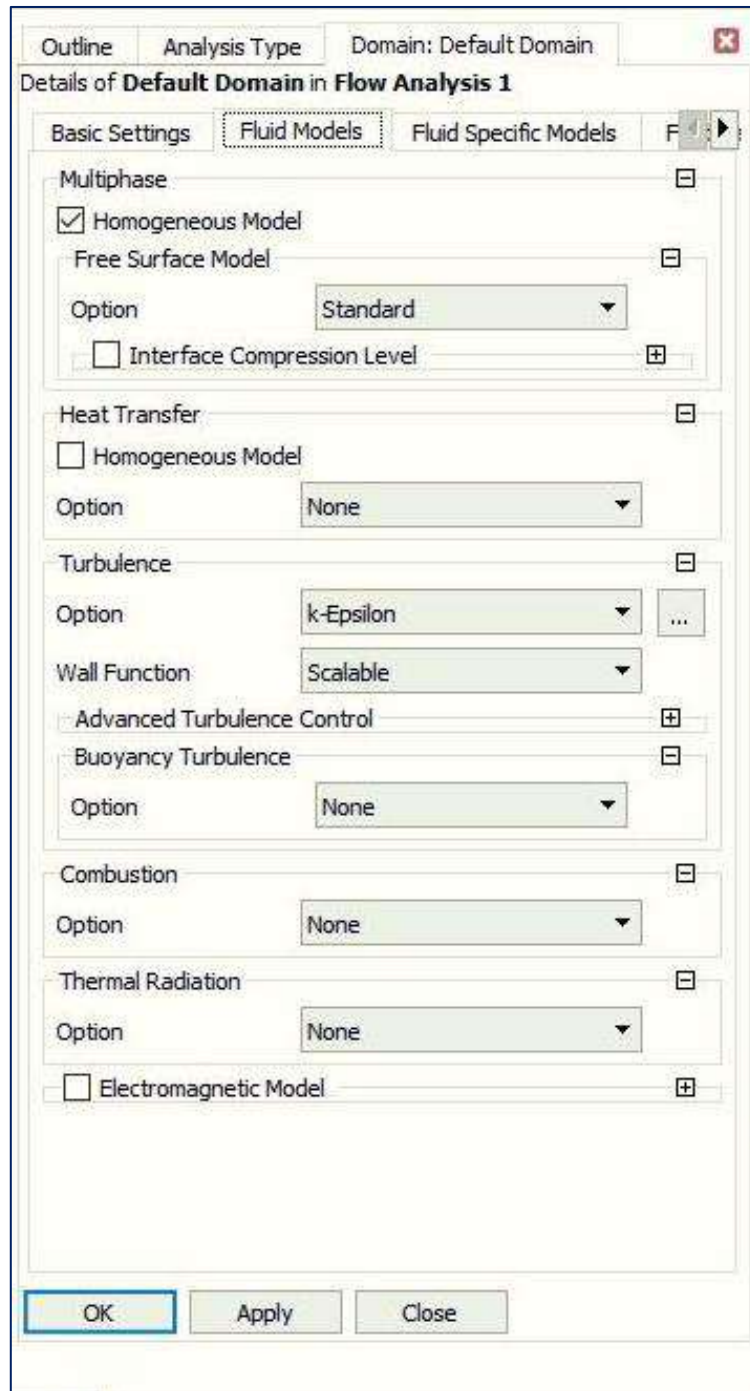


Figura 38. Configuración de los modelos del dominio

Fuente: Elaboración propia

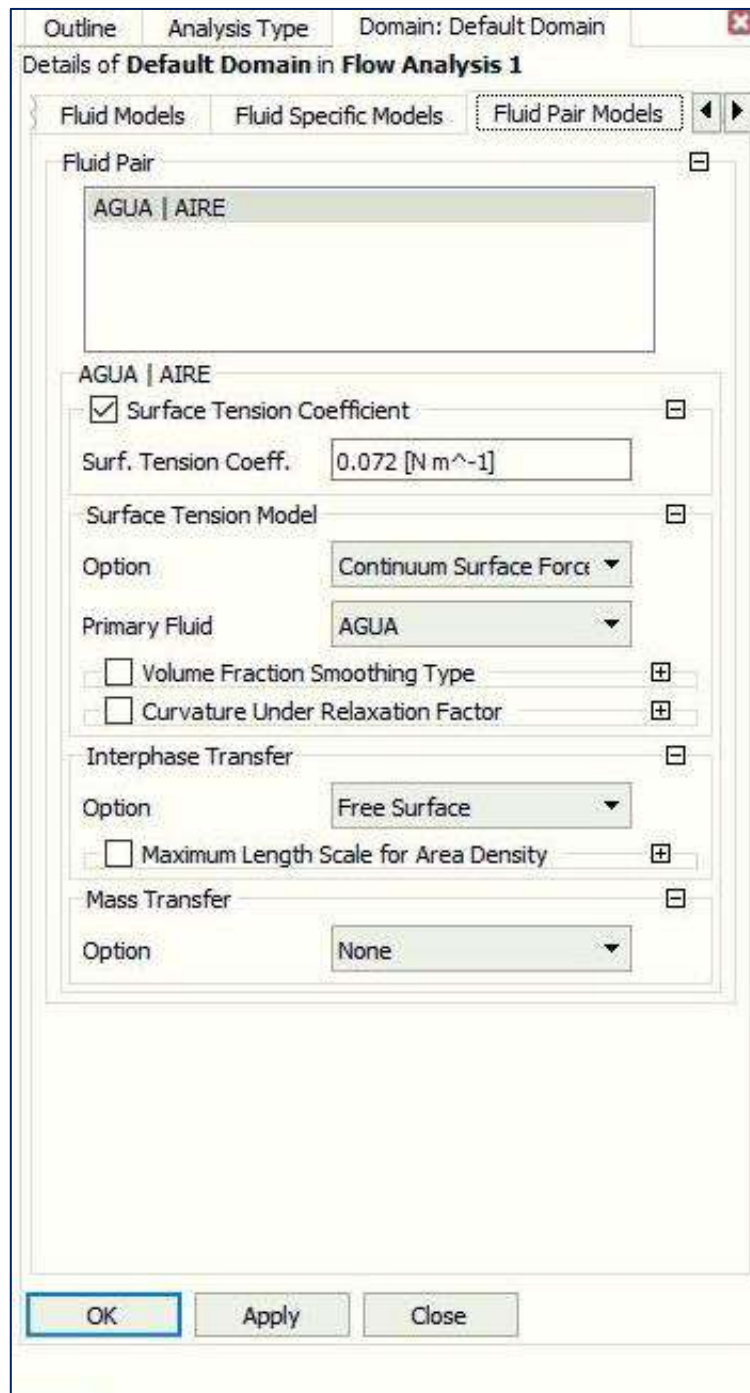


Figura 39. Fluid pair Models

Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Configuración de las condiciones de borde

En esta etapa se identifica los límites del modelo tales como entrada, salida, superficie libre y paredes; con la finalidad de proporcionar información a las condiciones de borde.

- En la entrada se asignó una condición de borde inlet, con una velocidad normal de ingreso del fluido igual a 1.989228988 m/s (cabe señalar que este valor es

el resultante de haber escalado el modelo y obtenido a través de las fórmulas de similitud de Froude), turbulencia del 5% y como fracción de volumen en el agua 1 y en el aire 0; asimismo la configuración y ubicación de la condición de borde entrada se presenta en la Figura 40 y Figura 41.

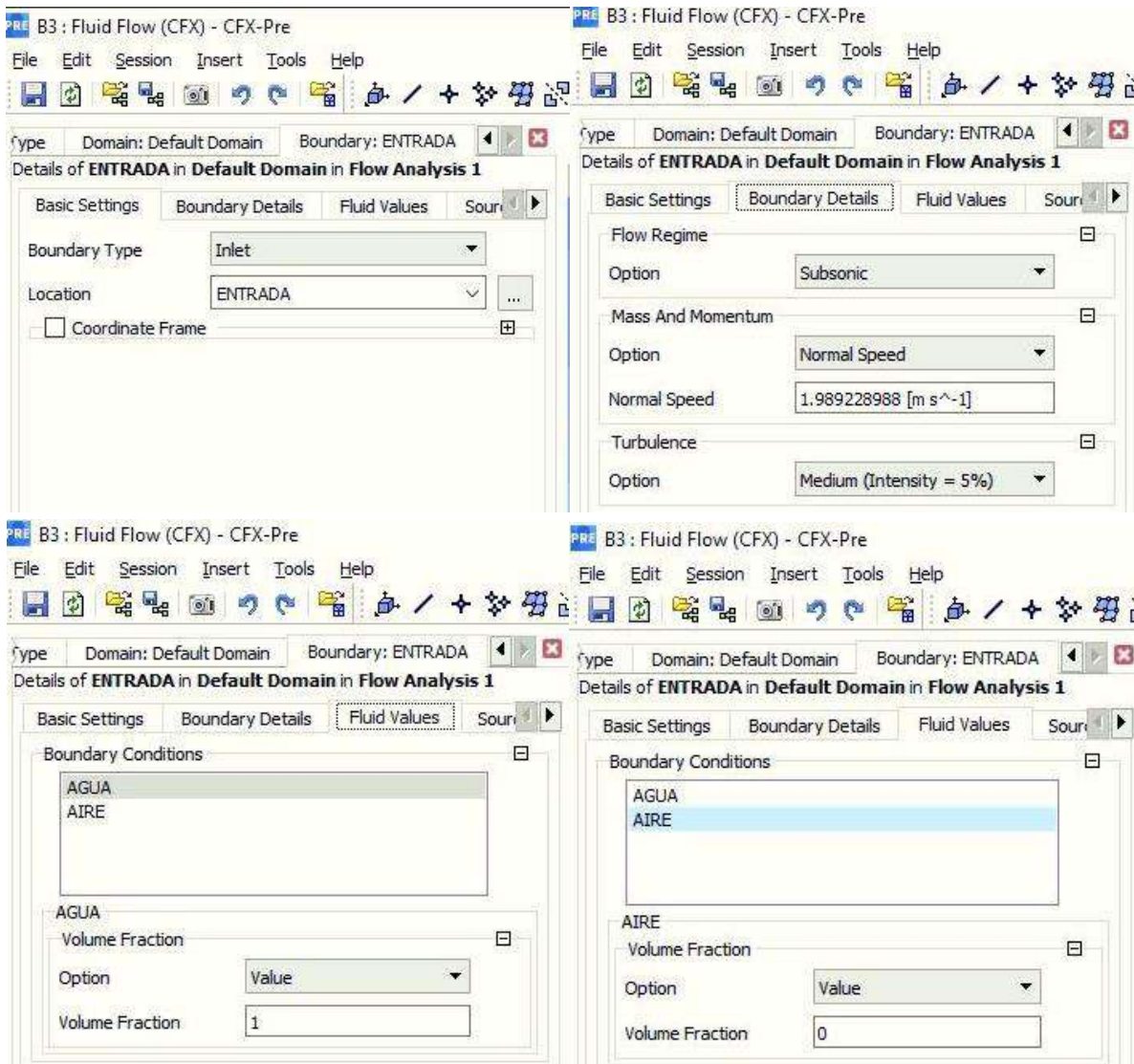


Figura 40. Configuración de la condición de borde entrada

Fuente: Elaboración propia

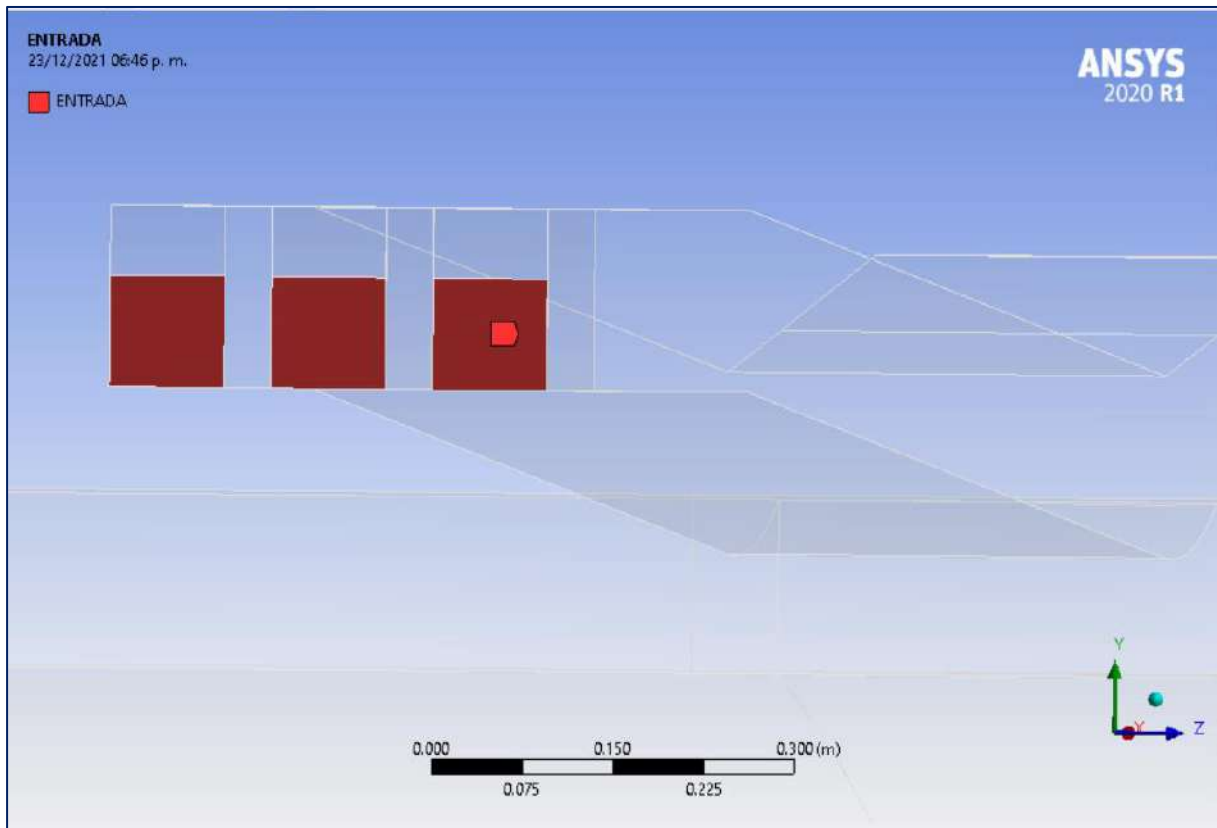


Figura 41. Ubicación de la condición de borde entrada

Fuente: Elaboración propia

- Tanto en la salida como en la superficie se asignó la condición de borde opening, con una presión de referencia de 0 Pa, una fracción de volumen en el agua de 0 y en el aire de 1 y una turbulencia del 5% para la salida y del 1% para la superficie libre debido a que en esta última no se encuentra agua; asimismo la configuración y ubicación de las condición de borde salida y superficie libre se presenta en la Figura 42, Figura 43, Figura 44 y Figura 45.

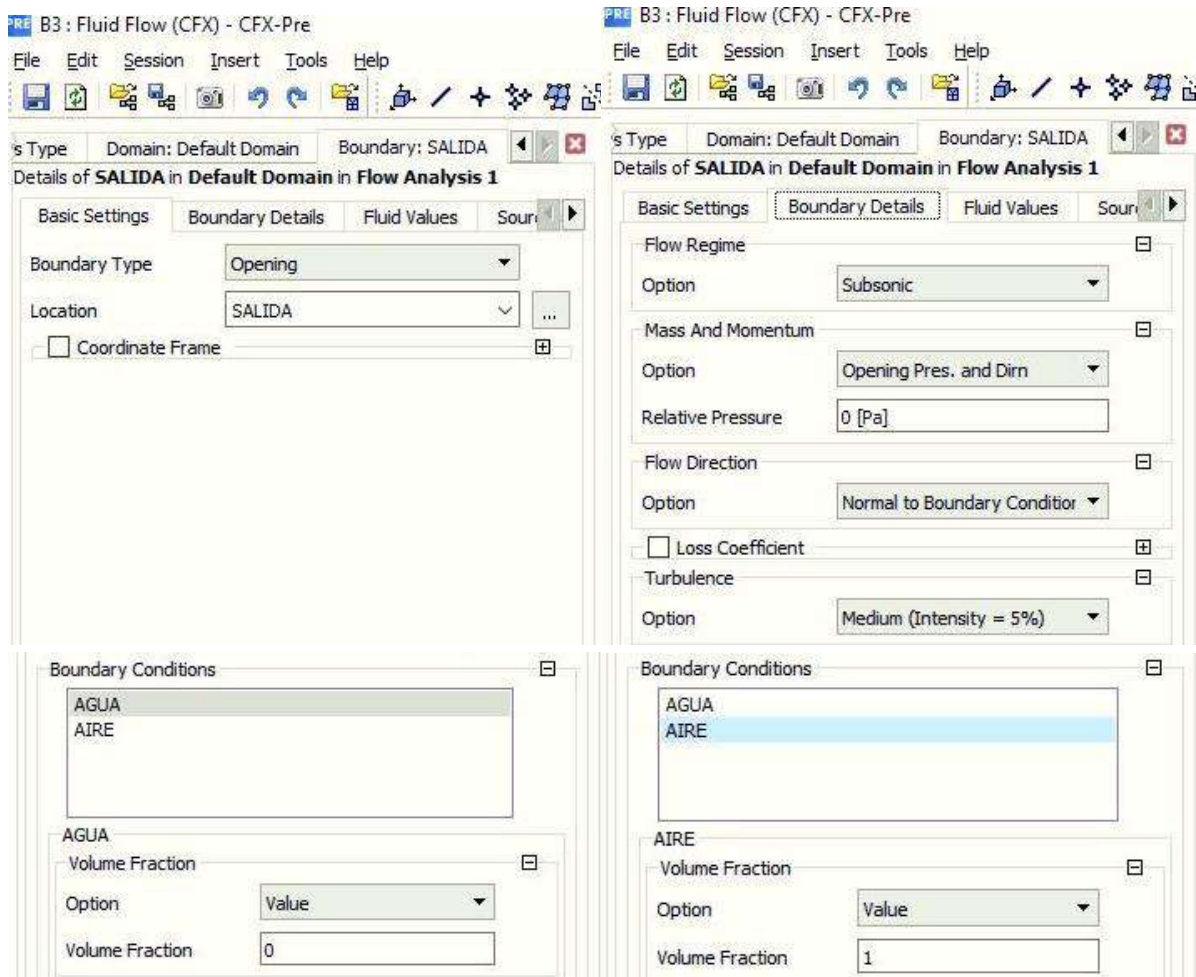


Figura 42. Configuración de la condición de borde salida

Fuente: Elaboración propia

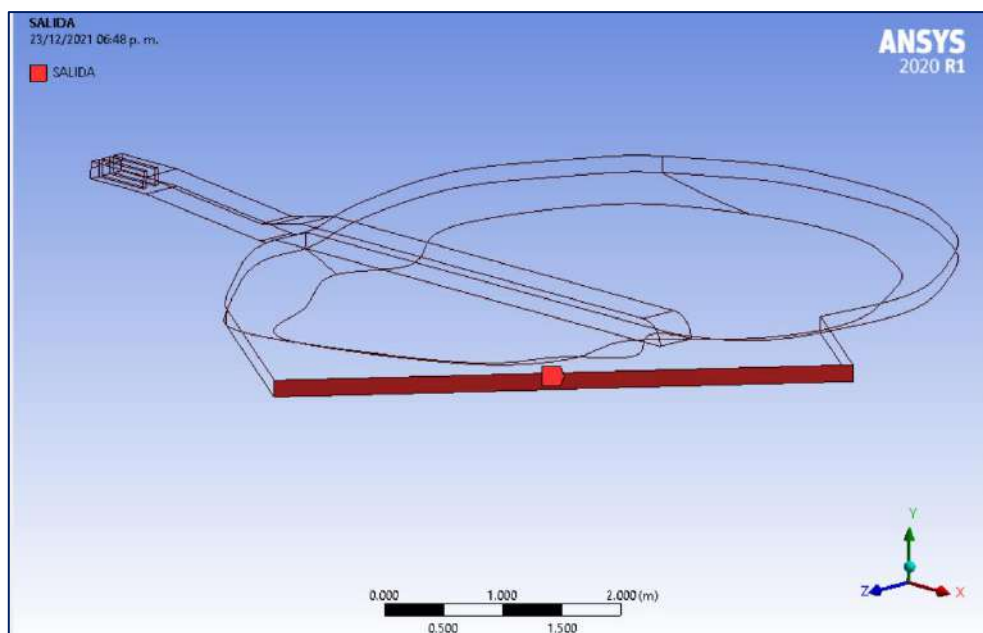


Figura 43. Ubicación de la condición de borde salida

Fuente: Elaboración propia

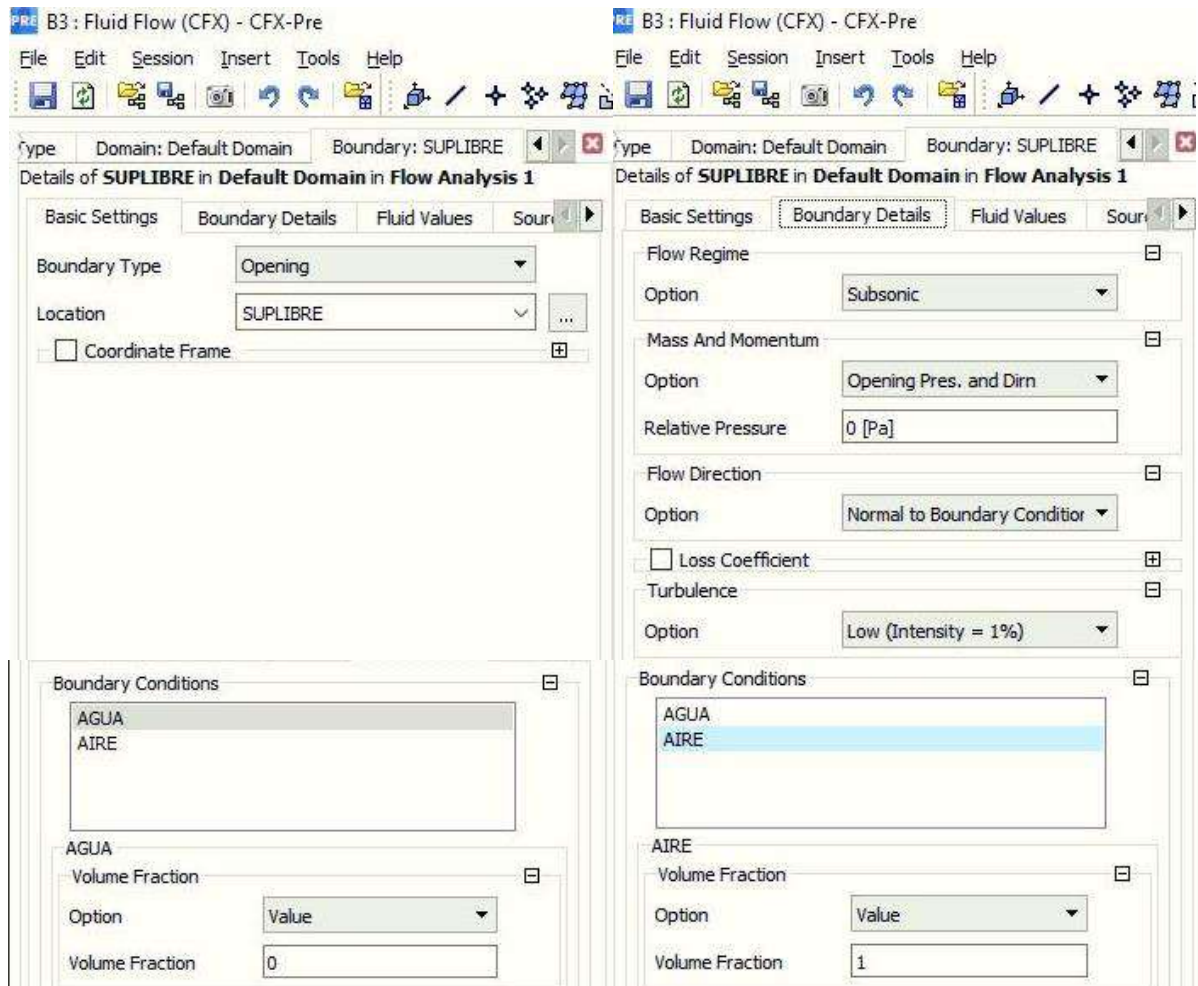


Figura 44. Configuración de la condición de borde superficie libre

Fuente: Elaboración propia

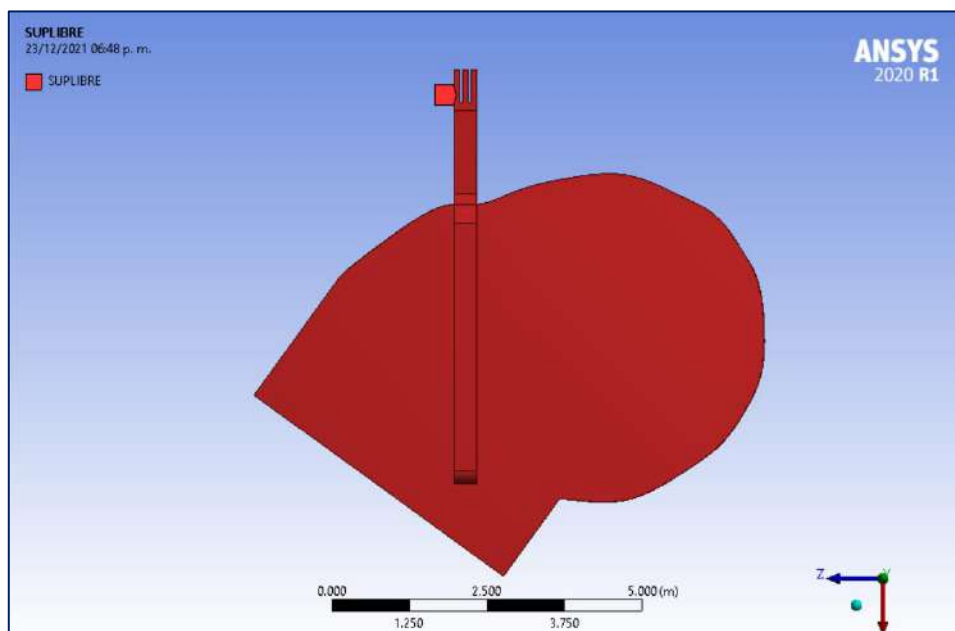


Figura 45. Ubicación de la condición de borde superficie libre

Fuente: Elaboración propia

- En las paredes se asignó una condición de pared, teniendo concreto en el aliviadero de compuertas y el salto de esquí, arena en la poza de disipación y en la zona denominada “región de interés” ubicada en las proximidades de los cimientos de la presa; la rugosidad absoluta para el concreto es de 0.0036 mm y 5 mm para la arena y la región de interés; tener en cuenta que los valores de rugosidad absoluta han sido afectados por la escala del modelo y convertidos a través de las ecuaciones de similitud de Froude; asimismo la configuración y ubicación de las condiciones de borde se presenta en la Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50 y Figura 51.

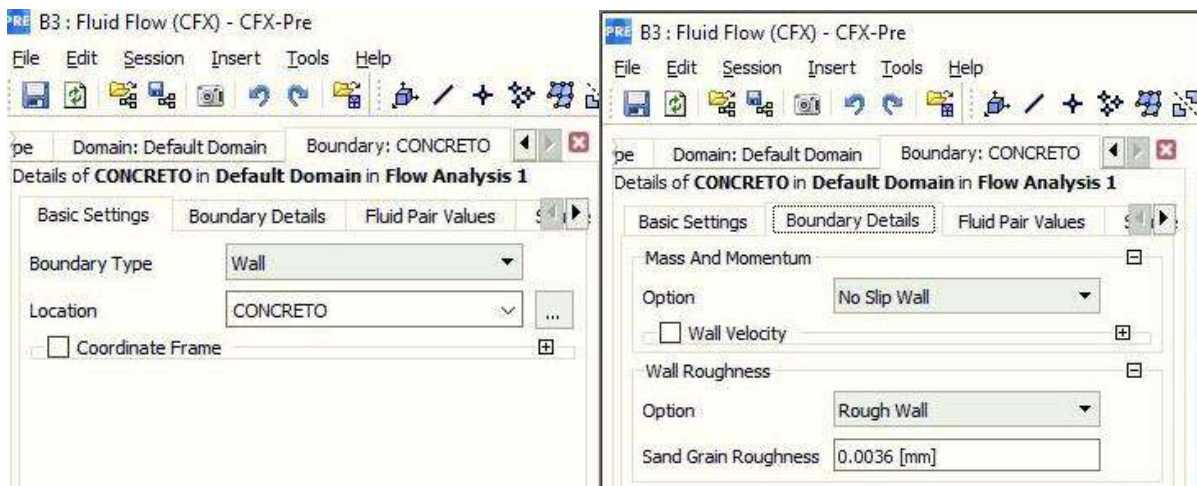


Figura 46. Configuración de la condición de borde concreto

Fuente: Elaboración propia

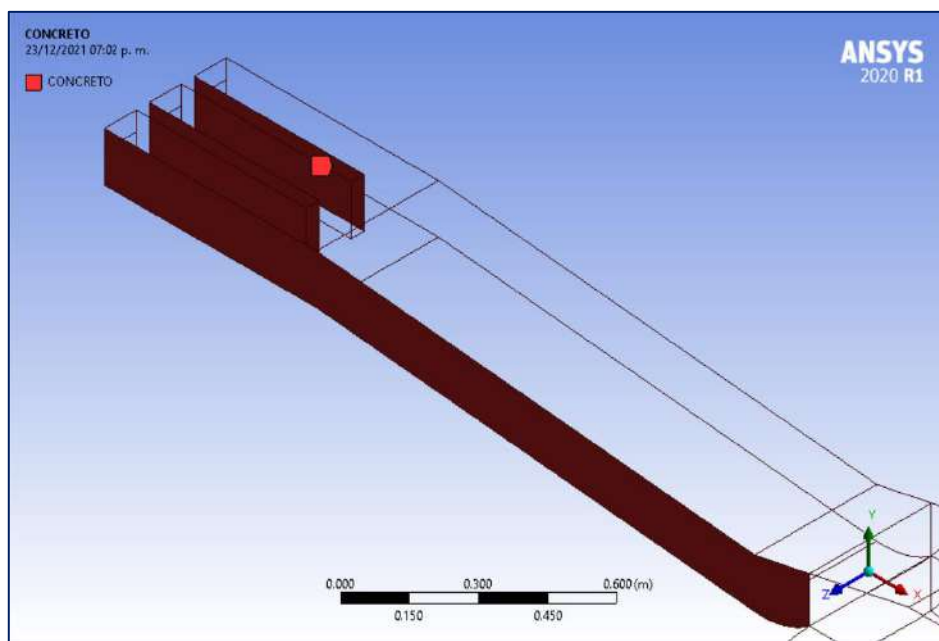


Figura 47. Ubicación de la condición de borde concreto

Fuente: Elaboración propia

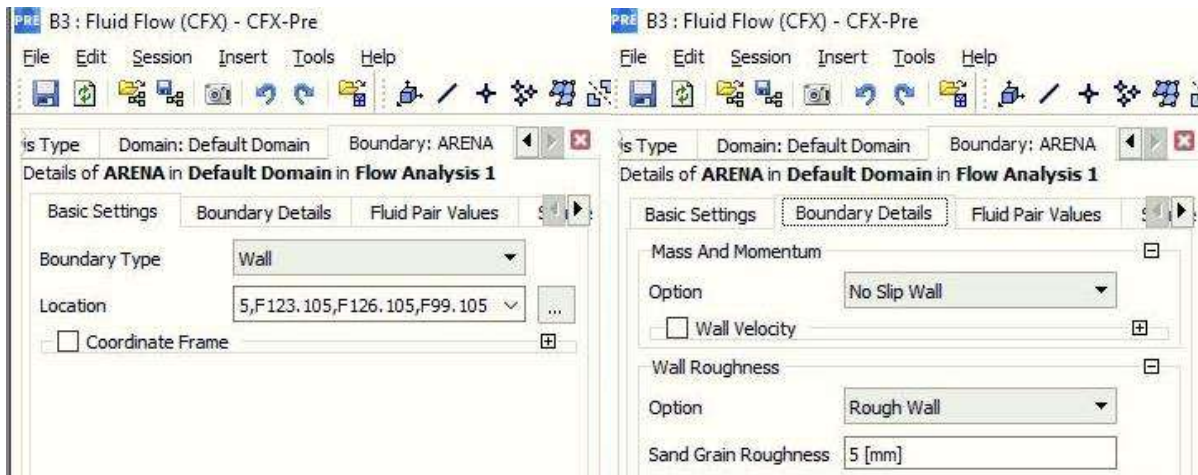


Figura 48. Configuración de la condición de borde arena

Fuente: Elaboración propia

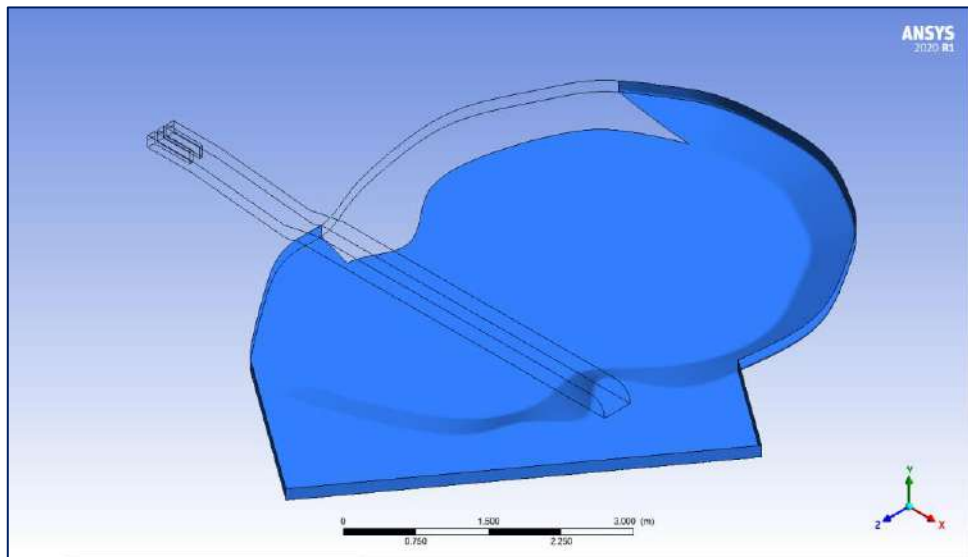


Figura 49. Ubicación de la condición de borde arena

Fuente: Elaboración propia

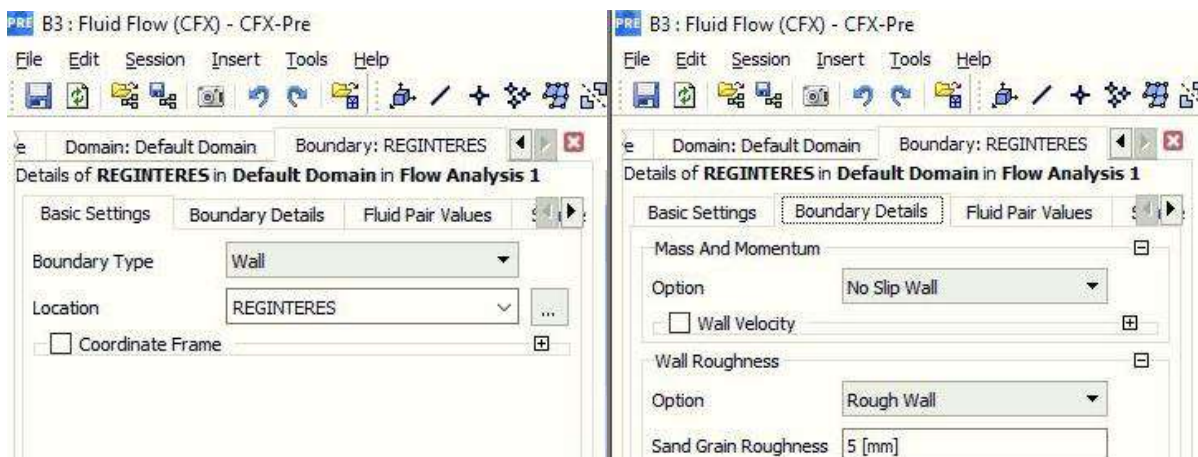


Figura 50. Configuración de la condición de borde región de interés

Fuente: Elaboración propia

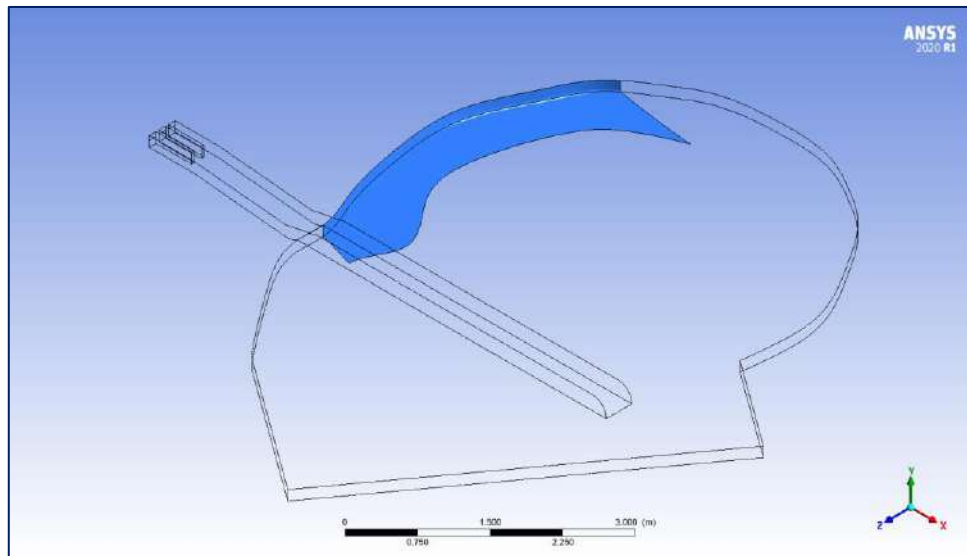


Figura 51. Ubicación de la condición de borde región de interés.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4 Configuración del Solver

La configuración de solucionador, permite establecer criterios que influyen en el comportamiento del solucionador otorgando mayor precisión en la solución, estabilidad y un menor tiempo para obtener la solución del problema, estos criterios se presentan a continuación:

- La opción de esquema de advección se digita como alta resolución, esto permitirá que los resultados tengan una amplia gama y precisión.
- En la turbulencia numérica de las ecuaciones es suficiente con la selección de first order, sin embargo, se debe tener en cuenta que high resolution otorga una mayor precisión.
- Se estableció que el número de iteraciones en el modelo final sea de 2500 iteraciones, con la finalidad de alcanzar la convergencia.
- Para concluir que la solución ha alcanzado la convergencia es necesario evaluar los valores residuos promediados (RMS) alcancen un valor de $1E-4$ como mínimo; además se debe configurar como objetivo de conservación un valor menor al 1% en los imbalances de las ecuaciones de continuidad y momento.
- La configuración de estos criterios se presenta en la Figura 52.

Outline Solver Control

Details of **Solver Control** in **Flow Analysis 1**

Basic Settings Equation Class Settings Ad

Advection Scheme

Option High Resolution

Turbulence Numerics

Option High Resolution

Convergence Control

Min. Iterations 1

Max. Iterations 2500

Fluid Timescale Control

Timescale Control Auto Timescale

Length Scale Option Conservative

Timescale Factor 1.0

☐ Maximum Timescale

Convergence Criteria

Residual Type RMS

Residual Target 0.000001

☒ Conservation Target

Value 0.01

☐ Elapsed Wall Clock Time Control

Interrupt Control

Option Any Interrupt

Convergence Conditions

Option Default Conditions

User Interrupt Conditions

OK Apply Close

Figura 52. Configuración del solucionador

Fuente: Elaboración propia

4.5 CFX-Solver

En esta etapa de la simulación se realiza la configuración de la ejecución del solucionador y luego que esta finalice se verifica la convergencia de las ecuaciones a través de los valores residuales promedio y los imbalances.

Se ha establecido una solución con doble de precisión, de esta manera los cálculos se realizarán con un mayor número de cifras significativas y en consecuencia una mayor precisión de los resultados; además se ha configurado una solución en forma paralela con 4 particiones, esto demandará el uso de múltiples núcleos/procesadores y de mayor capacidad de memoria RAM en la computadora, es decir una mayor demanda computacional, sin embargo el tiempo de solución se reduce de manera significativa; ver Figura 53.

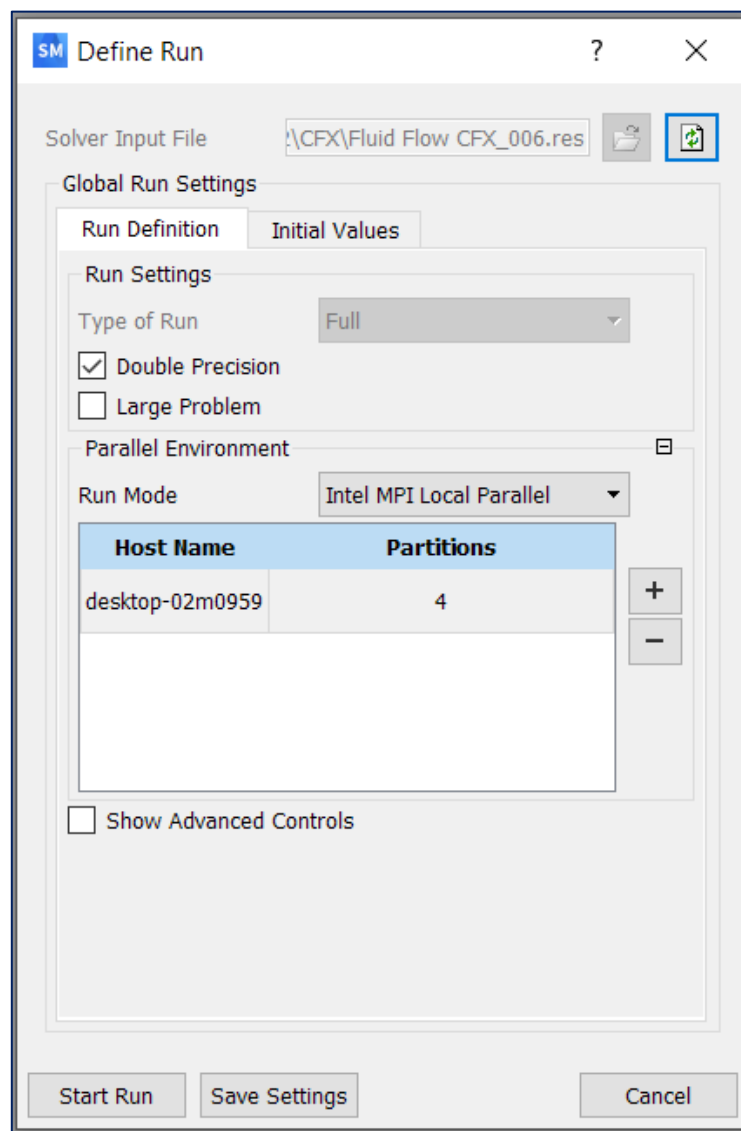


Figura 53. Configuración de la ejecución de la solución del modelo

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 54 se observa la información de las particiones realizadas al dominio, esta se realiza de manera equitativa detallándose el número de nodos, caras y vértices que han sido asignados a cada una de las particiones.

Partitioning Information								
Partitioning information for domain: Default Domain								
	Elements			Vertices			Faces	
Part	Number	%		Number	%	%Ovlp	Number	%
Full	1778611			331337			133168	
1	453110	25.2		84736	24.9	2.3	31137	23.1
2	455318	25.3		85181	25.0	2.7	30777	22.8
3	439522	24.4		84666	24.9	2.4	39919	29.6
4	453312	25.2		85531	25.1	2.9	32982	24.5
Min	439522	24.4		84666	24.9	2.3	30777	22.8
(part)		(3)			(3	1)		(2)
Max	455318	25.3		85531	25.1	2.9	39919	29.6
(part)		(2)			(4	4)		(3)
Ave	450316	25.0		85029	25.0	2.6	33704	25.0
Sum	1801262	100.0		340114	100.0		134815	100.0

Figura 54. Particiones realizadas a la ejecución de la solución

Fuente: Elaboración propia

✓ Verificación de la convergencia

En esta etapa verificamos que los criterios de convergencia establecidos en la configuración del solucionador se hayan cumplido.

Por un lado, tenemos los valores residuales promedio de las ecuaciones de continuidad, momento, turbulencia y de la fracción volumen (ver Figura 55, Figura 56 y Figura 57 respectivamente); estos han logrado alcanzar un valor residual menor a 1 E-4 entre dos iteraciones consecutivas, por lo tanto, este criterio se ha cumplido luego de dos mil doscientos veinte y un iteraciones.

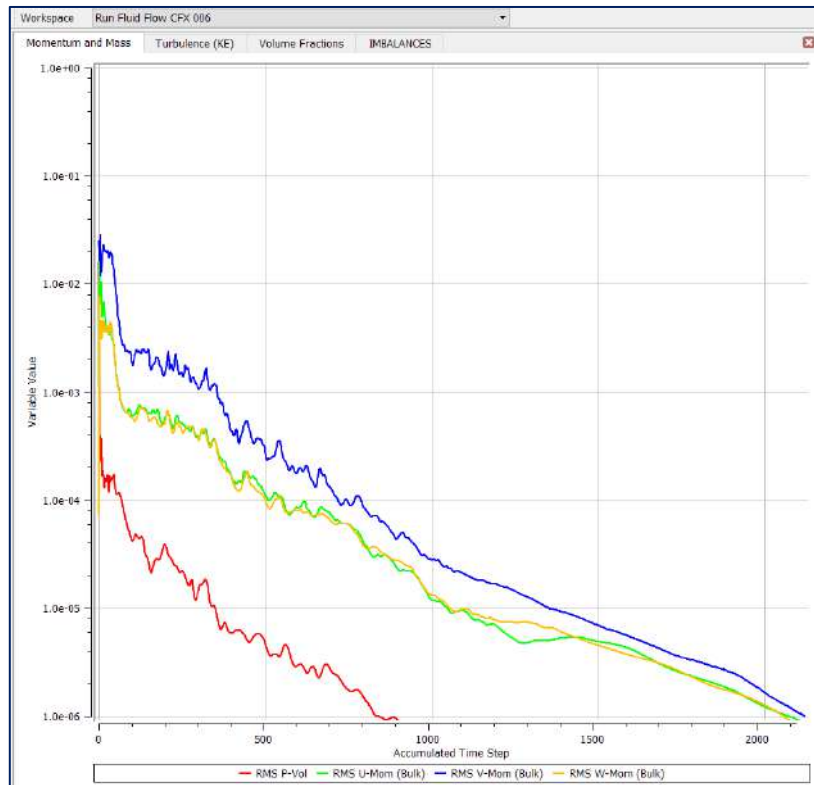


Figura 55. Valores residuales promedio de las ecuaciones de volumen y momento del fluido

Fuente: Elaboración propia

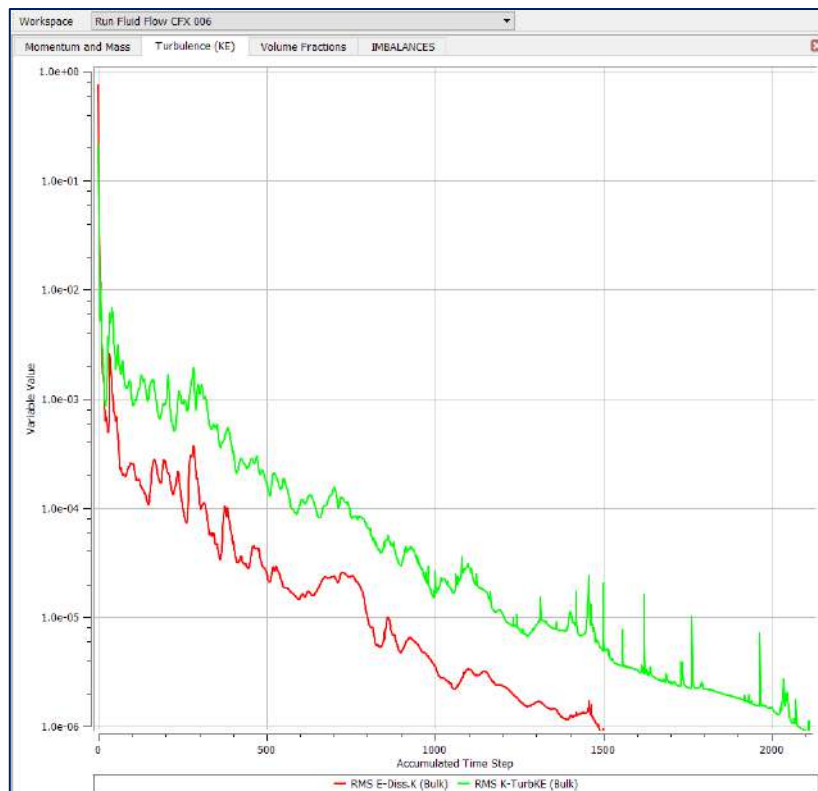


Figura 56. Valores residuales promedio del modelo de turbulencia

Fuente: Elaboración propia

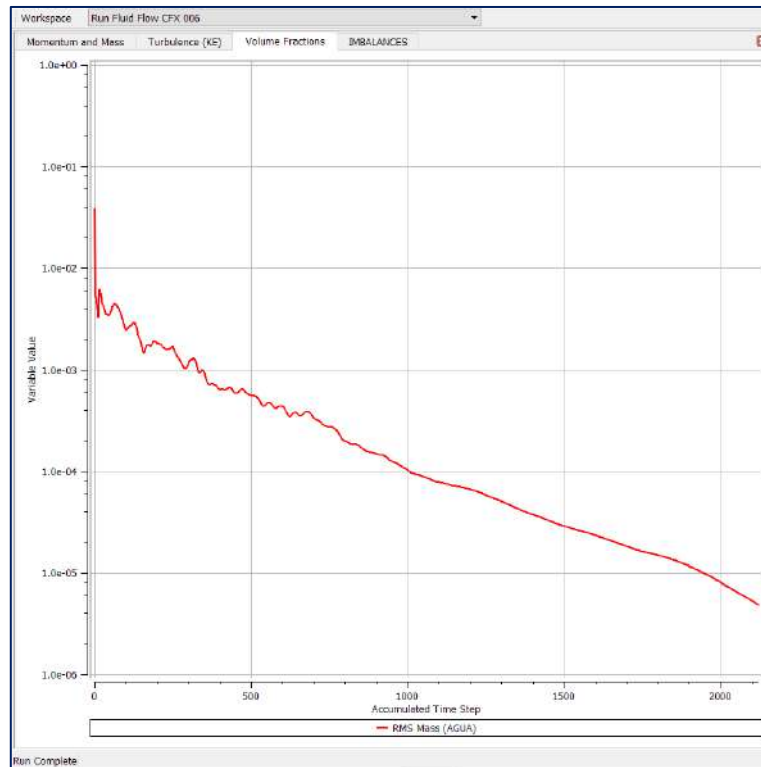


Figura 57. Valores residuales promedio de la ecuación de continuidad

Fuente: Elaboración propia

Los imbalances son el criterio más importante para determinar la convergencia del modelo; estos representan a cada propiedad extensiva del modelo como la masa, el momento y la energía si fuese el caso y se expresan en la siguiente ecuación.

$$\%Imbalances = \frac{P_{ingreso} - P_{salida}}{P_{ingreso}} * 100 \quad (4.2)$$

Donde P representa a cada propiedad extensiva. Asimismo, los imbalances deben ser menores al 1% y tener una tendencia u oscilar de manera convergente hacia un valor igual a cero, tal como se presenta en la Figura 58, Figura 59, Figura 60 y Figura 61. Además, debe garantizarse que la masa del fluido escape por la condición de borde salida, tal como se presenta en la Figura 60.

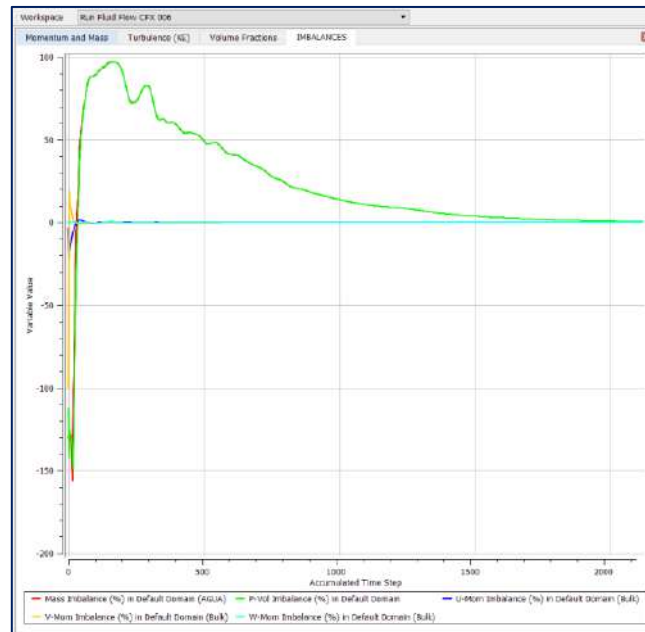


Figura 58. Imbalances de las ecuaciones de conservación

Fuente: Elaboración propia

U-Mom-Bulk	
Boundary : ARENA	-6.2366E+02
Boundary Sources : ARENA	-3.2441E-04
Boundary : CONCRETO	-1.9953E+00
Boundary Sources : CONCRETO	-5.2553E-04
Boundary : ENTRADA	1.2026E+02
Boundary : REGINTERES	5.4813E+02
Boundary Sources : REGINTERES	-2.9355E-04
Boundary : SALIDA	-4.1913E+01
Boundary : SUPLIBRE	-8.1993E-01
Domain Src (Neg) : Default Domain	-2.4137E-01
Domain Src (Pos) : Default Domain	2.3872E-01
Domain Imbalance :	6.6445E-03
V-Mom-Bulk	
Boundary : ARENA	3.6688E+04
Boundary Sources : ARENA	-2.3279E-02
Boundary : CONCRETO	5.9033E+02
Boundary Sources : CONCRETO	-4.6174E-03
Boundary : ENTRADA	1.3193E-05
Boundary : REGINTERES	2.0221E+03
Boundary Sources : REGINTERES	-2.2213E-03
Boundary : SALIDA	8.4700E+00
Boundary : SUPLIBRE	-2.2611E-01
Domain Src (Neg) : Default Domain	-3.9311E+04
Domain Src (Pos) : Default Domain	1.7746E+00
Domain Imbalance :	-1.8768E-01
W-Mom-Bulk	
Boundary : ARENA	-6.3192E+01
Boundary Sources : ARENA	-6.8907E-04
Boundary : CONCRETO	7.8280E-01
Boundary Sources : CONCRETO	-5.8780E-07
Boundary : ENTRADA	-3.1379E-06
Boundary : REGINTERES	9.2015E+01
Boundary Sources : REGINTERES	-4.5397E-05
Boundary : SALIDA	-2.9614E+01
Boundary : SUPLIBRE	3.3204E-02
Domain Src (Neg) : Default Domain	-3.1917E-01
Domain Src (Pos) : Default Domain	3.0754E-01
Domain Imbalance :	1.2588E-02

Figura 59. Imbalances de la ecuación de momento en los ejes X, Y y Z

Fuente: Elaboración propia

P-Vol		
Boundary	: ENTRADA	5.3838E+01
Boundary	: SALIDA	-5.3363E+01
Boundary	: SUPLIBRE	-2.1692E-01
Domain Imbalance :		2.5821E-01
Mass-AGUA		
Boundary	: ENTRADA	5.3838E+01
Boundary	: SALIDA	-5.2827E+01
Boundary	: SUPLIBRE	-7.5350E-01
Domain Imbalance :		2.5780E-01

Figura 60. Imbalances de la ecuación de continuidad

Fuente: Elaboración propia

Normalised Imbalance Summary		
Equation	Maximum Flow	Imbalance (%)
U-Mom-Bulk	3.9311E+04	0.0000
V-Mom-Bulk	3.9311E+04	-0.0005
W-Mom-Bulk	3.9311E+04	0.0000
P-Vol	5.3838E+01	0.4796
Mass-AGUA	5.3838E+01	0.4788

Figura 61. Resumen de los imbalances de las ecuaciones de conservación

Fuente: Elaboración propia

Otra característica que indica que el modelo ha alcanzado la convergencia es el estado de la solución, esta se verifica en la última iteración al corroborar que el ratio sea cercano a 1 y que el estado de la solución lineal indique OK en mayúsculas, ya que ok en minúsculas o F indican que la solución del modelo se encuentra al límite o ha fallado respectivamente, ver Figura 62.

OUTER LOOP ITERATION = 2121 (121) CPU SECONDS = 2.013E+05 (1.140E+04)					
Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution	
U-Mom-Bulk	1.00	8.7E-07	2.3E-05	1.1E-02	OK
V-Mom-Bulk	1.00	1.0E-06	2.2E-05	1.5E-02	OK
W-Mom-Bulk	1.00	7.6E-07	4.6E-05	8.3E-03	OK
P-Vol	0.99	3.4E-08	4.2E-06	8.5 5.6E-02	OK
Mass-AGUA	1.00	4.8E-06	3.3E-04	9.9 3.7E-04	OK
K-TurbKE-Bulk	0.99	8.3E-07	4.5E-05	9.9 3.4E-03	OK
E-Diss.K-Bulk	1.00	1.6E-07	2.2E-05	12.7 4.1E-04	OK

Figura 62. Estado de la solución

Fuente: Elaboración propia



Capítulo 5

Artículo

Simulation of the flow chart of the ski jump and the dissipation pond of the Poechos Reservoir using the Ansys CFX program

El presente artículo ha sido presentado y aceptado en el 39th *IAHR World Congress* que se desarrolló en la ciudad de Granda-España durante los días 19 y 24 de junio del 2022. La Asociación Internacional para Ingeniería e Investigación Hidroambiental (IAHR), es una organización fundada en 1935, que reúne a expertos ingenieros y profesionales en un evento donde se comparte, estimula y promueve la investigación y su aplicación en campos relacionados con el medio ambiente, recursos hídricos, desarrollo sostenible, etc.

El artículo se presenta a continuación en su versión en inglés.

Simulation of the flow chart of the ski jump and the dissipation pond of the Poechos Reservoir using the Ansys CFX program

Brayand Daniel Mendoza Cruzado ⁽¹⁾ and Jorge Demetrio Reyes Salazar ⁽²⁾

^(1,2) Universidad de Piura, Piura, Perú.
brayand.mendoza@alum.udep.edu.pe; jorge.reyes@udep.pe

Abstract

The Poechos reservoir is one of the largest hydraulic works in Peru, it regulates the great avenues of the Chira River and supplies water to the Chira and Piura valleys. It has a spillway with three radial gates with a maximum evacuation of 5,400 m³/s, through a ski jump to a dissipation pond. However, the flow hits a hill located in front, preventing a direct outlet to the Chira riverbed, located to the right. This recirculates the flow in the dissipation pond and consequently generates erosion in the vicinity of the dam foundation, where a protective rockfill has now been placed. The main objective is to model the phenomena that occur in the dissipation pond and study the erosion in the vicinity of the dam foundations, to propose an alternative solution. The model has been elaborated on a 1/100 scale in the Ansys CFX program, covering the ski jump and the dissipation pool, therefore, the results obtained have been converted by using the Froude similarity. These show average velocities of 1.6 m/s and maximum velocities of up to 6 m/s, located in the vicinity of the dam foundation. The existence of erosion is confirmed, since the surface of the dissipation pond is made up of soils such as sandy gravel, silty sand and silt, these materials do not resist velocities greater than 0.5 m/s.

Keywords Reservorio Poechos; salto de esquí; poza disipadora; erosión; Ansys CFX; Poechos reservoir.

1. INTRODUCCIÓN

The Poechos reservoir is located in the course of the Chira River, 40 km northeast of the city of Sullana in the department of Piura-Peru; It is part of the Chira Piura Special Project (PECHP), which began its operation in 1976. This project consists of 3 stages, of which the reservoir, together with other works that comprise it, was built during the first stage (Chira Piura Special Project, 2021).

The importance of this reservoir lies in the storage and subsequent supply of water to irrigate 100,000 hectares of crops in both the Chira and Piura valleys; provides 774 thousand inhabitants with drinking water; generate electricity through 3 hydroelectric plants: Poechos I, Poechos II and Curumuy, producing 16 MW, 12 MW, 13 MW respectively and also the regulation of the great avenues of the Chira River thus avoiding flooding in the Chira valleys (Special Project Chira Piura, 2021).

The crown of the reservoir dam is at a height of 108 m.a.s.l. (total height 48 m) and has a length of 11 km; The initial storage capacity was 887 million cubic meters, however currently around 60% of its capacity has been clogged by the sediments carried by the great avenues of the El Niño and El Niño Coastal phenomena (Universidad de Piura, 2021); Another serious problem that this research deals with is erosion in the vicinity of the foundations of the dam, a product of recirculation caused by the flow of water when it hits a hill located in front of the ski jump.

The model carried out considers the most critical case, which occurs when the operating elevation is 105 m.a.s.l. (maximum safety level of operation in the dam), consequently, there would be a maximum discharge of 5400 m³/s through the 3 radial gates 10 m wide, 12 m high and 210 tons each (More, 2019). This study will allow representing through a numerical model the erosion phenomena that occur at the outlet of the jet (specifically in the pool), in addition to obtaining relevant information such as velocities, streamlines, shear stresses, etc. To achieve this objective, the following specific objectives will be necessary:

- Carry out the numerical model of the flow, both in the ski jump and in the dissipation pond in the Ansys CFX program.

- Carry out a discretization of the domain with good quality parameters, without falling into an excessive refinement of it.
- Achieve convergence of the continuity and momentum equations as this is an indicator that the model will provide reliable results.

2. METHODS

Ansys CFX is an Ansys program that solves computational fluid dynamics problems. It is a tool that has great fidelity and is also widely used around the world. Ansys CFX is made up of different components such as geometry, mesh, setup, solution, and result, that together form a system analysis and are managed through the Ansys Workbench, allowing data transfer between the components that make up the analysis of the system, see Figura 1.

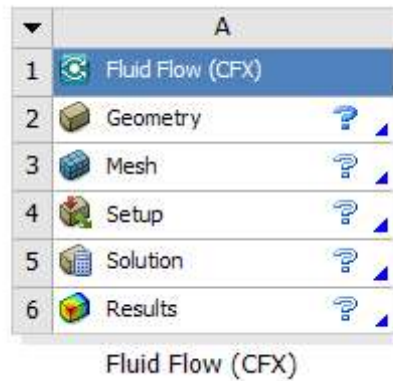


Figura 1. Sistema de análisis CFX.

2.1 Geometry

The geometry has been made with Ansys Designmodeler, which allows creation, editing and import of geometries. Its interface is intuitive and through the use of different tools it allows creation of 2D sketches, which are then converted into 3D solids through modeling tools. The geometry comprises the area where information is required to be obtained. This has been prepared at a 1/100 scale in order to avoid the existing volume limitation, which is 1000 km³ (Ansys, Inc., 2021b). It includes the ski jump, the dissipation pool with a depth of 25 m and a slope with a ratio of 1:2, characteristic of soils made up of sandy gravel, silty sand and silt (Oficina Regional de Desarrollo del Norte [ORDEN] and International Engineering Company [IECO], 1968). The gate spillway has a 10% slope. The height of the gates is 12 m, with a contraction coefficient of 0.754 and a velocity coefficient of 0.98, obtaining an entry depth equal to 9.233 m, applying Eq. [1].

$$Q = C_v * C_c * \left(2g \left(H - \frac{a}{2} \right) \right)^{0.5} * b * a \quad [1]$$

Where,

$Q = \text{Flow [m}^3\text{]}$

$C_v = \text{Velocity coefficient}$

$C_c = \text{Contraction coefficient}$

$H = \text{Fluid height [m]}$

$a = \text{Gate height [m]}$

$b = \text{Gate width [m]}$

$g = \text{Gravity acceleration } \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$

The different solids have been joined to produce a coupling and continuity in the discretization of the domain, since in this way the results will be transmitted between the control volumes correctly, see Figura 2.

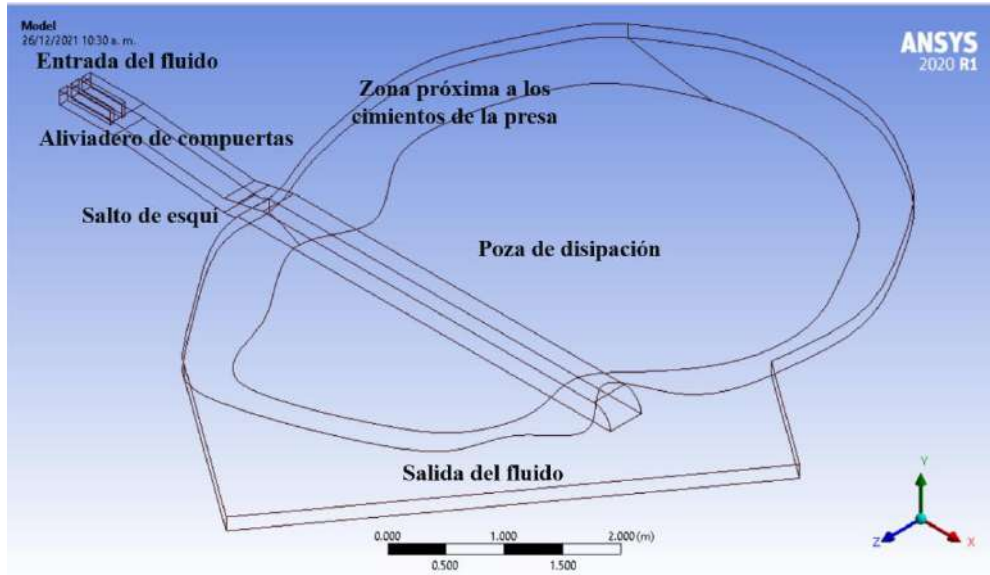


Figura 2. Model geometry

2.2 Meshing

The discretization was carried out with Ansys Meshing. This consists of dividing the domain into small control volumes in which each of the continuity and momentum equations is solved. An adequate discretization leads to a better resolution and precision in the results, and optimizes the solution time and the convergence of the transport equations (equation of continuity and momentum). However, one should not fall into excessive refinement as this directly impacts the solution time.

Ansys Meshing has both global and local meshing tools; the first is applied to the entire domain, while the second is applied to specific areas in order to obtain better results. The meshing generated in the domain is tetrahedral because it adapts better to irregular geometries, as is our case. In addition, a local refinement called body sizing was applied, which creates small control volumes according to the assigned sizing, in this case case is 0.035 m, creating 331 337 control volumes in which each of the conservation equations must be solved.

Mesh quality is evaluated using the quality parameters shown in Table 1 and Table 2.

Tabla 1. Quality parameters (Ansys, Inc., 2021)

Parameter	Range	Optimal value
Quality	0-1	Near 1
Aspect ratio	1-3	Near 1
Obliquity	0-1	See Table 2
Orthogonality	0-1	Near 1

Tabla 2. Skewness parameter quality (Ansys, Inc., 2021)

Skewness value	Cell quality
1	degenerate
0.9-<1	Bad(silver)
0.75-0.9	Por
0.5-0.75	Fair
0.25-0.5	Good
>0-0.25	Excellent
0	Equilateral

The results obtained from the mesh quality are shown in Table 3 and, as can be seen, they are close to the optimum value and therefore very good.

Tabla 3. Mesh quality

Parameter	Average quality value	Cell quality
Quality	0.84654	Ok
Aspect ratio	1.81290	Ok
Obliquity	0.21292	Excellent
Orthogonality	0.78587	Ok

2.3 Configuración

It is done in the setup component, and includes the configuration of the domain, boundary conditions and solver.

Ansys CFX considers the phases of water and air belonging to the domain as continuous and independent media (immiscible) and therefore it calculates the volume fraction of the fluids in each control volume. In the domain configuration, the fluids water and air, the reference density (1.2 kg/m^3), atmospheric pressure (1 atm), gravity (9.81 m/s^2), k-epsilon turbulence model, the coefficient of surface tension (0.072 N/m), and the transfer from interface to free surface are assigned. Regarding the turbulence model (Ruiz, 2017), it was concluded that the K-e turbulence model better represents the hydraulic behavior in his undergraduate thesis entitled "Hydraulic Calibration of the San Gaban II sand trap analyzing the turbulence models with Telemac 3D".

The configuration of the boundary conditions at the inlet is as follows: normal inlet velocity of $1,989 \text{ m/s}$, turbulence intensity of 5%, and volume fraction for water of 1 and for air of 0. For the outlet, relative pressure of 0 Pa, turbulence intensity of 5% and volume fraction for water of 0 and for air of 1. The free surface condition has the same configuration as the outlet condition, except for the intensity value of turbulence which, in this case, is 1% since there is no water present. The boundary conditions for concrete and sand have the absolute roughness value of 0.0036 mm and 0.5 mm , respectively.

The velocity and roughness values inserted in the configuration have been scaled according to the Froude similarity factors, see Table 4.

Tabla 4. Similitud de Froude (Lenin Maldonado y Pallares Darío, 2012)

Magnitud física	Similitud de Froude
Longitudes	$L_r = L_p/L_m$
Superficies	$A_r = L_r^2$
Velocidades	$V_r = L_r^{1/2}$
Tiempo	$t_r = L_r^{1/2}$
Caudales	$Q_r = L_r^{5/2}$
Aceleración	$a_r = 1$
Presión	$(p/\gamma)_r = L_r$

Finally, the configuration of the solver is carried out. It consists of assigning the number of iterations and the convergence criteria such as the averaged residuals (RMS) and Conservation Target, which are 2500 iterations with an average residual value of 1 E-4 and 1% respectively. If these criteria are achieved, the convergence of the model will have been achieved.

2.4 Solución

Among the solver configurations we set double precision in the solution and a parallel solution with 4 partitions that allow to reduce the solution time significantly.

Figura 3 shows that, through an iterative process, the conservation equations and the K-epsilon turbulence model have reached convergence, since the average residual values (RMS) are less than 1 E-4, as previously specified in the setup configuration.

The residual values are important to determine the convergence of the model, however, they must be combined with other parameters such as the imbalances. These are defined as the input flux minus the output flux divided by the input flux, and determine the percentage of error in the conservation equations. Figura 4 shows the imbalances obtained, where the momentum conservation equations achieve a value of almost 0%, while the continuity equation achieves 0.47%. In addition these values have achieved a trend towards them, therefore, we conclude that the convergence of the model has been achieved.

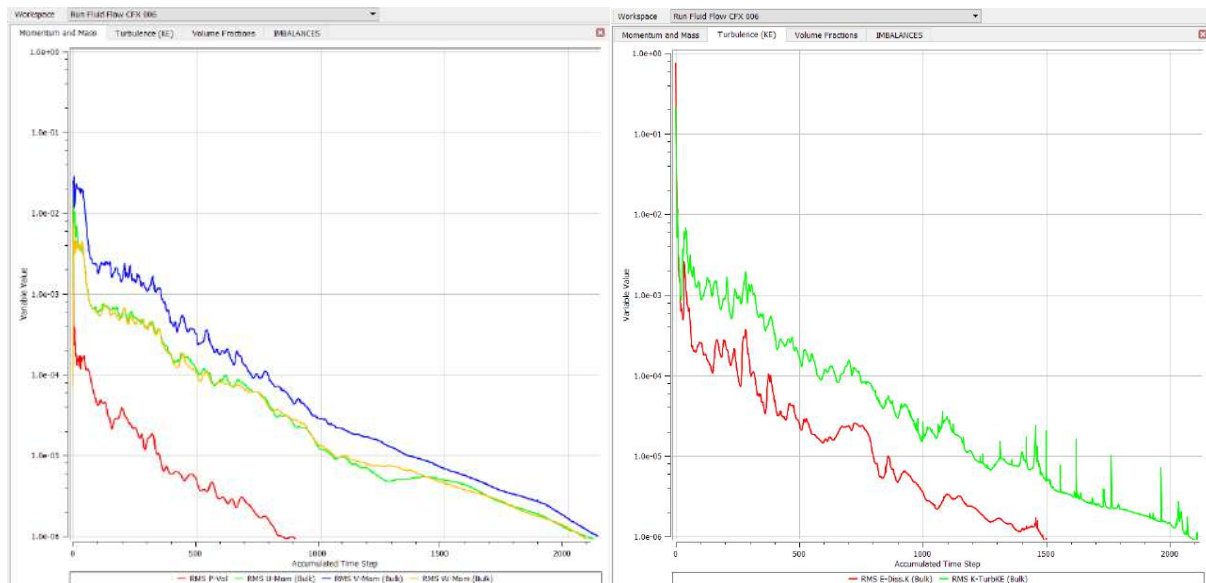


Figura 3. On the left, the convergence of the continuity and momentum equations. On the right, the convergence of the turbulence model

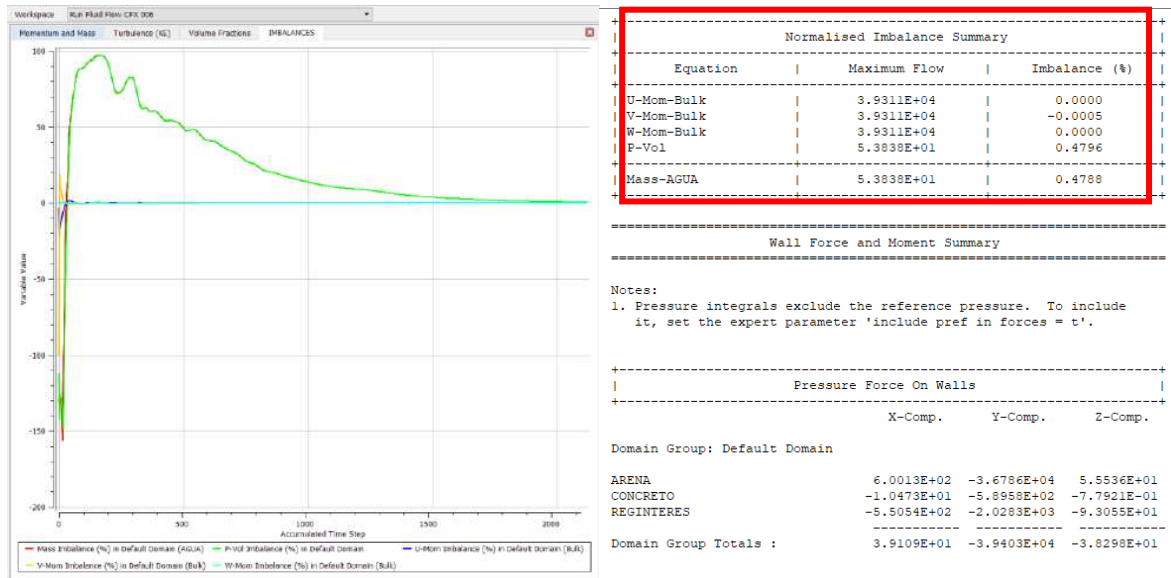


Figure 4. Imbalances of the equations of continuity and momentum

2.5 Results

The visualization and obtaining of results were carried out in the post-processing stage. We managed to obtain isosurfaces, vectors, and streamlines of the velocity and flow of the fluid.

The vectors and streamlines show the path of the fluid flow, as shown in Figura 5, where the recirculation of the fluid after it hit the hill and its redirection towards the dam foundations is observed.

In Figura 6 there are contours of the shear stresses produced in the region of interest. In it there is a maximum shear stress equal to 92.15 N/m^2 produced on the left side of this region. In addition an average stress has been calculated of 30.24 N/m^2 in this region.

In Figura 7 there are velocity vectors, that show that flow impacts on the region of interest with velocities of up to 6 m/s in the superficial part of the dissipation pond. In addition, the average velocity equals to 1.6 m/s in the region of interest. On the other hand, in Figura 8 it is observed in the isosurfaces that the maximum velocity of 6 m/s develops at specific points on the surface of the fluid. In addition there is a stagnation of the fluid as a result of its recirculation.

It should be noted that these values have been converted with the Froude similarity formulas, therefore, they are at real scale.

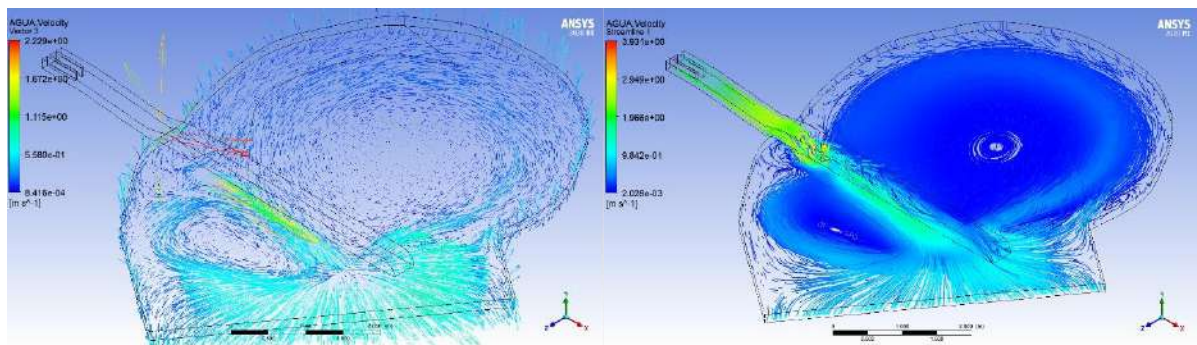


Figure 5. Vectors and streamlines of the fluid flow path

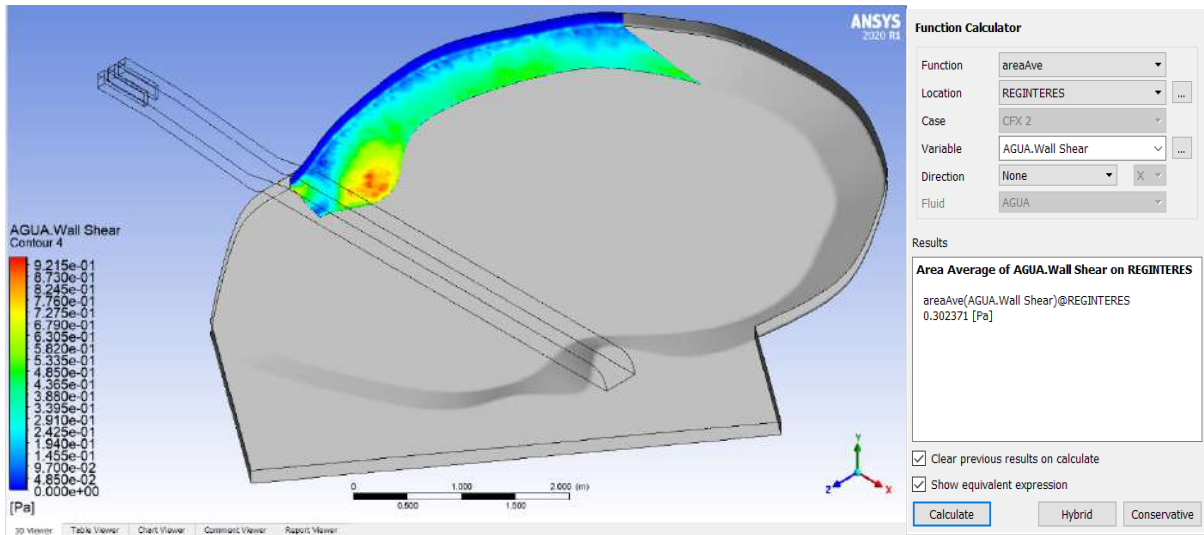


Figura 6. Shear stresses in the region of interest

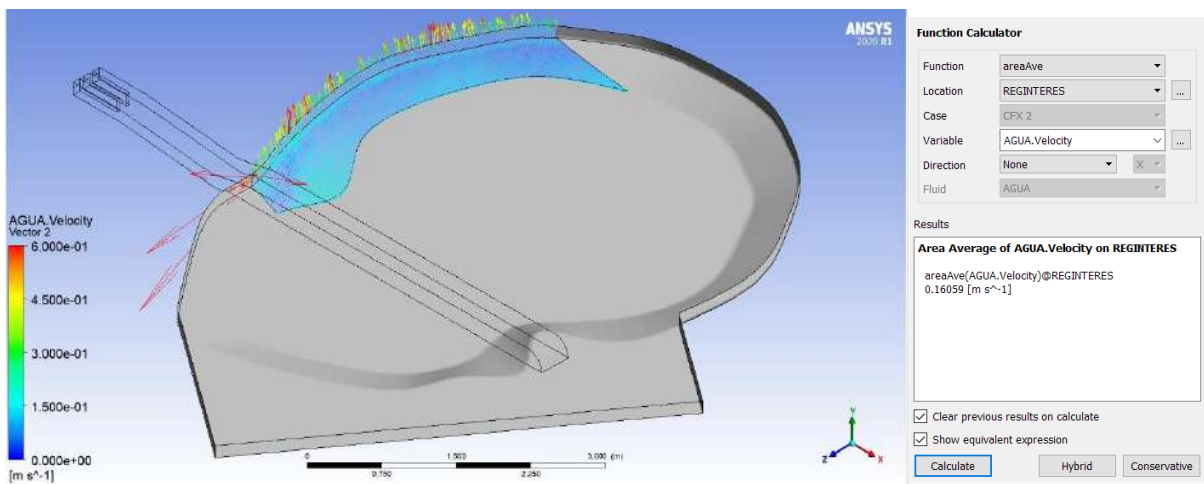


Figura 7. Fluid velocities in the region of interest

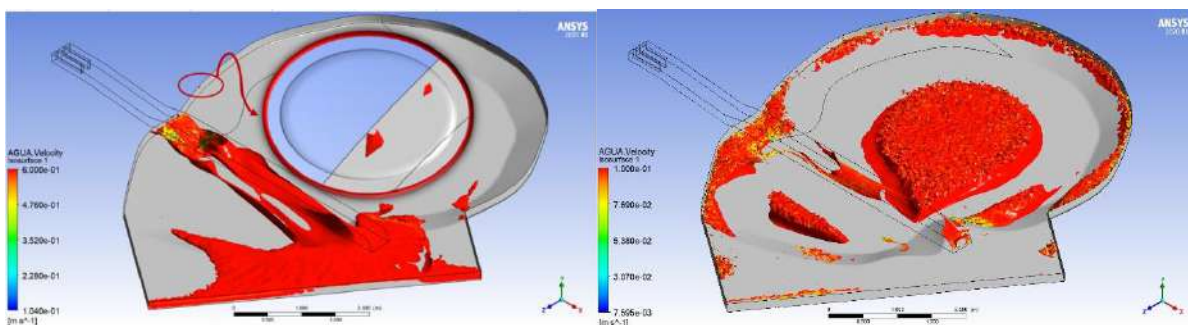


Figura 8. Velocity isosurfaces, on the left 6 m/s and on the right 1 m/s

3. CONCLUSIONS

The velocities obtained through velocity vectors in the region of interest reach 6 m/s, therefore, the existence of erosion in said region is concluded, since it is constituted by materials such as sandy gravel, silty sand, and silt, the which do not support velocities greater than 0.5 m/s. On the other hand, the average velocity in this region is 1.6 m/s, which is also higher than the resistant velocity of the soils that make up this region.

According to the velocity vectors and isosurfaces, the maximum velocity is developed in the superficial part of the flow and impacts on the region of interest, product of the recirculation. These high velocities cause erosion.

The shear stress contours in the region of interest reach a maximum value of 92.15 N/m^2 and an average value of 30.24 N/m^2 .

With the results obtained, it is determined that it is necessary to generate a direct outlet of the flow towards the Chira River bed to avoid the formation of a macro vortex that causes erosion in the area near the foot of the dam. This solution has been analyzed and it is possible to implement it.

Numerical modeling is very important because it allows predicting the behavior of the fluid and establishing whether the design is adequate or whether modifications will be necessary.

The quality parameters and the adequate refinement of the meshing are very important, since they determine the convergence of the conservation equations and the resolution quality of the results.

It has been possible to reproduce the behavior of the fluid, the streamlines and the vectors, which show the recirculation of the flow after it hits the hill and is redirected towards the foundations of the Poechos Reservoir Dam.

4. REFERENCIAS

Ansyes, Inc. (2021a). *ANSYS Meshing User's Guide* (2021 R1).

Ansyes, Inc. (2021b). *DesignModeler User's Guide* (2021 R1).

Maldonado, L. y Pallares Darío. (2012). *Análisis en modelo hidráulico de la estructura de interconexión de las centrales Sarapullo y Alluriquín*. proyecto previo a la obtención del título de ingeniero civil. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.

More, F. (2019). *Análisis de consistencia de caudales del Río Chira entre las Presas de Poechos y Sullana*. (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.

Oficina Regional de Desarrollo del Norte y International Engineering Company. (Diciembre 1968). *Proyecto de almacenamiento y derivación Chira - Piura: Estudio de factibilidad*. Autoridad Nacional del Agua. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4161>

Proyecto Especial Chira Piura. (2021, 23 de noviembre). *Proyecto Especial Chira Piura*. <http://www.chirapiura.gob.pe/proyecto/primer-etapa>

Ruiz, C. (2017). *Calibración hidráulica del desarenador San Gabán II analizando los modelos de turbulencia con TELEMAC - 3D*. (Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.

Universidad de Piura. (2015). *Poechos: el coloso del Perú - UDEP Hoy*. <https://www.udep.edu.pe/hoy/2015/10/poechos-el-coloso-del-peru/>



Capítulo 6

Análisis de resultados

Los resultados se obtienen en el post procesamiento a través de herramientas como contornos, vectores, volúmenes, isosuperficies, líneas de corriente, animaciones, gráficos, etc. que muestran los valores de determinadas variables de interés como velocidades, esfuerzos de corte, vorticidad, turbulencia, etc. Para ello es importante conocer las siguientes definiciones que forman parte de la configuración en la obtención de los resultados.

- *Location*, ubicación donde se analizan las variables de interés.
- Rango local, muestra los resultados en el dominio seleccionado.
- Contornos/número de puntos, a un mayor número se tendrá una mejor resolución de los resultados.
- *Boundary data* (conservativo e híbrido), para efectos de cálculo se debe seleccionar la opción conservadora, pues esta opción calcula el flujo másico correctamente en las paredes y se tendrían resultados por ejemplo de velocidades en estas zonas; por otro lado, la opción híbrida no considera un flujo másico en las paredes, ello conlleva a obtener resultados de velocidades en las paredes igual a cero, lo cual es incorrecto ya que las velocidades en la capa límite son cercanas a cero.
- *Agua velocity*, representa la velocidad del fluido en una determinada sección.

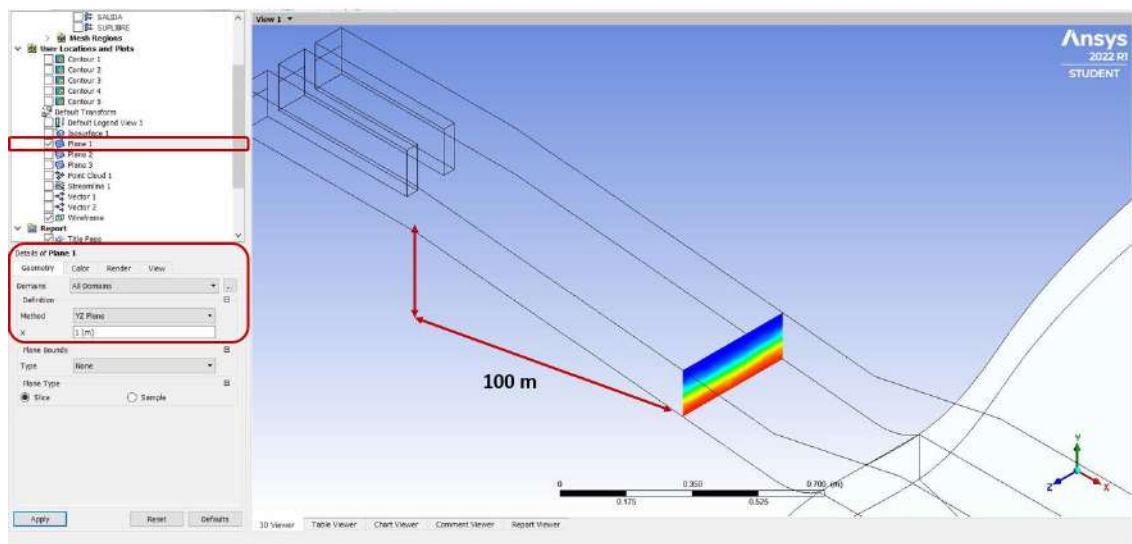
Como ya se ha indicado el modelo posee una escala 1/100, es por ello que los resultados obtenidos deben ser transformados a escala real mediante las ecuaciones de similitud de Froude, ver Tabla 8.

Tabla 8. Ecuaciones de similitud de Froude

Magnitud física	Similitud de Froude
Longitudes	$L_r = L_p/L_m$
Superficies	$A_r = L_r^2$
Velocidades	$V_r = L_r^{1/2}$
Tiempo	$t_r = L_r^{1/2}$
Caudales	$Q_r = L_r^{5/2}$
Aceleración	$a_r = 1$
Presión	$(p/\gamma)_r = L_r$

Fuente: (Maldonado y Pallares, 2012)

Para la validación del modelo se ha comparado los resultados obtenidos en la simulación de la velocidad promedio en un plano ubicado a 100 m del aliviadero de compuertas (ver Figura 63) con los obtenidos a partir de la ecuación 6.1.

**Figura 63.** Plano ubicado a 100 m del aliviadero de compuertas

Fuente: Elaboración propia

$$V = (2g(H - \frac{a}{2})^{0.5} \quad (6.1)$$

Al aplicar las ecuaciones de similitud de Froude, se tiene que la velocidad promedio en el modelo es de 23.56 m/s, ver Figura 64.

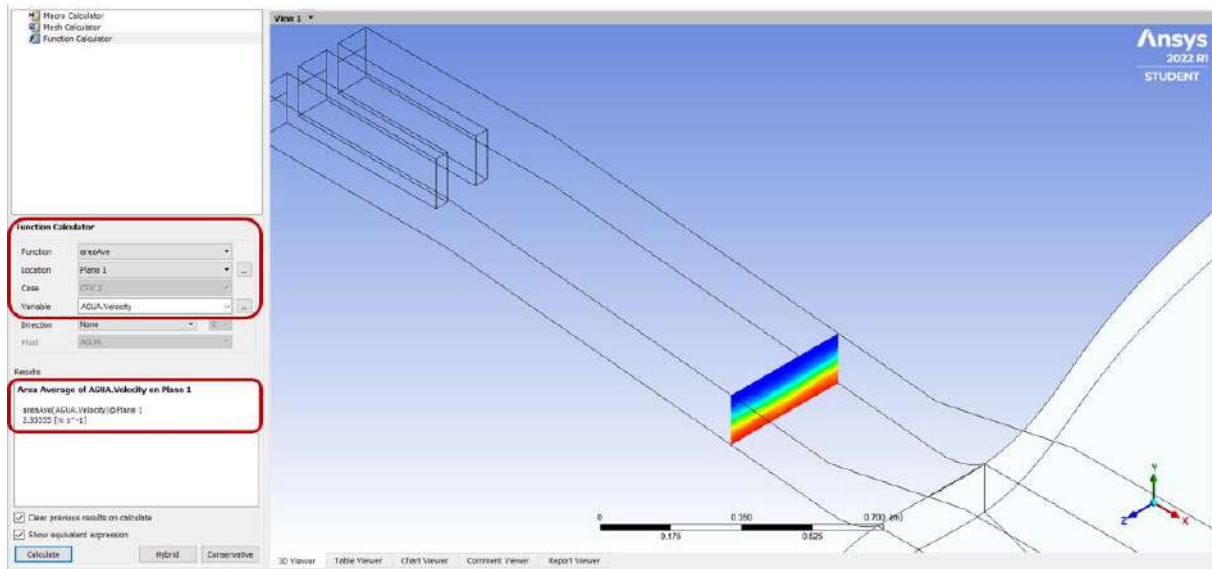


Figura 64. Resultados de la velocidad promedio.

Fuente: Elaboración propia

Para conocer el valor de la velocidad a partir de la ecuación 6.1, es necesario conocer el tirante del agua en el plano. Haciendo uso de la variable “agua.volume fraction” se tiene que la parte superior del tirante se encuentra en la cota -4.14 m, mientras que la parte inferior se ubica en -10m (cotas relativas del dibujo), por lo tanto, el tirante es 5.86 m; además se sabe que la cota del reservorio es de 105 m s. n. m., mientras que la cota inferior del plano es 68 m s. n. m.

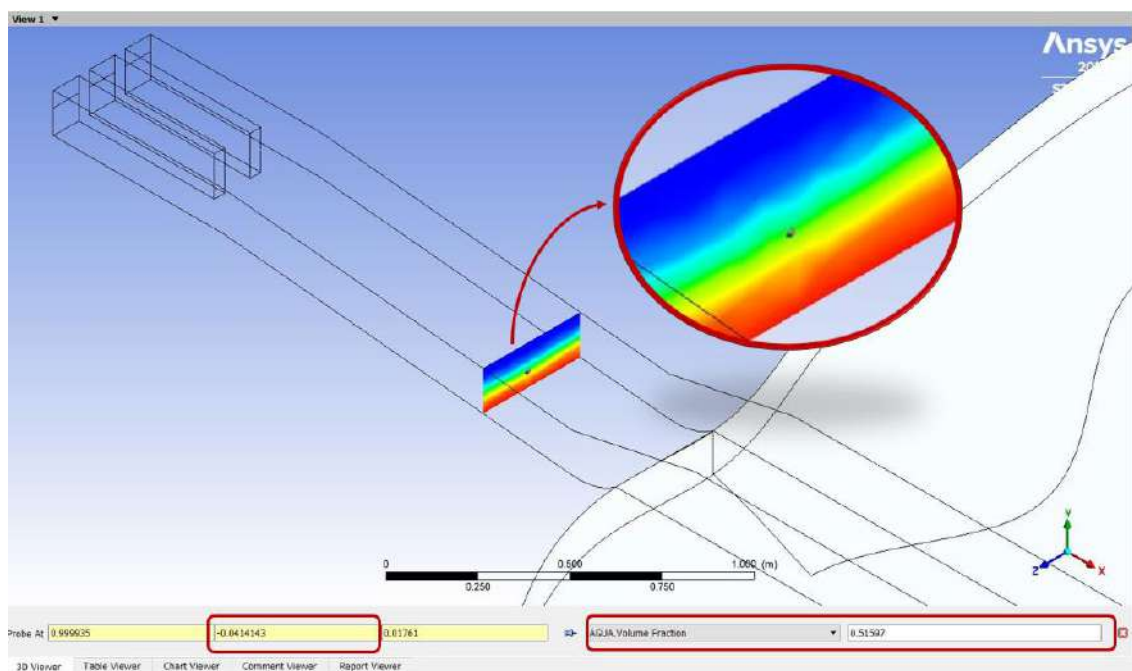


Figura 65. Ubicación de la parte superior del tirante agua.

Fuente: Elaboración propia

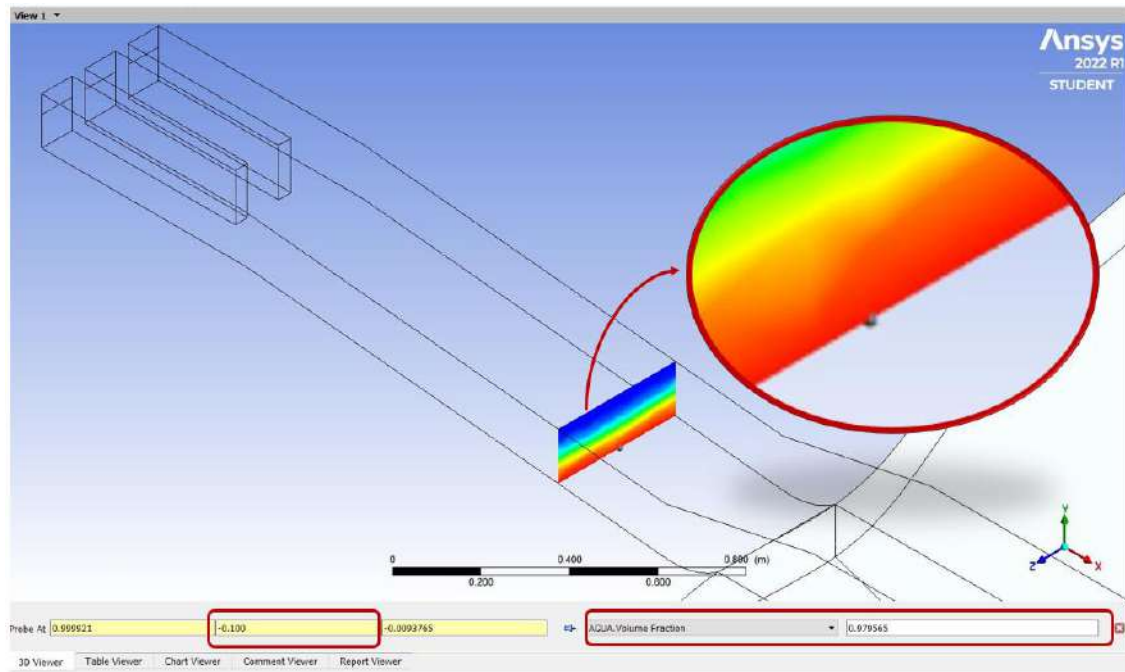


Figura 66. Ubicación de la parte inferior del tirante de agua

Fuente: Elaboración propia

La velocidad obtenida por la ecuación 6.1 en un punto medio del tirante es de 25.85 m/s. Al comparar las velocidades obtenidas por el modelo y la ecuación se tiene valores muy cercanos, pues varían 8.86 %, por lo tanto, se puede concluir que el modelo proporciona resultados fidedignos.

En la Figura 67 y Figura 68 se puede apreciar que la fracción volumétrica del agua en un plano ubicado en el centro del aliviadero de compuertas y que se extiende hasta la salida, observándose que el agua queda contenida siempre en el modelo y en consecuencia todo el fluido que ha ingresado se evacuará por la condición de borde salida, de igual manera se aprecia en la Figura 69 y Figura 70 las cuales representan la fracción de volumen del agua en todo el dominio; esto puede corroborarse con los imbalances obtenidos en la Figura 60 y Figura 61.

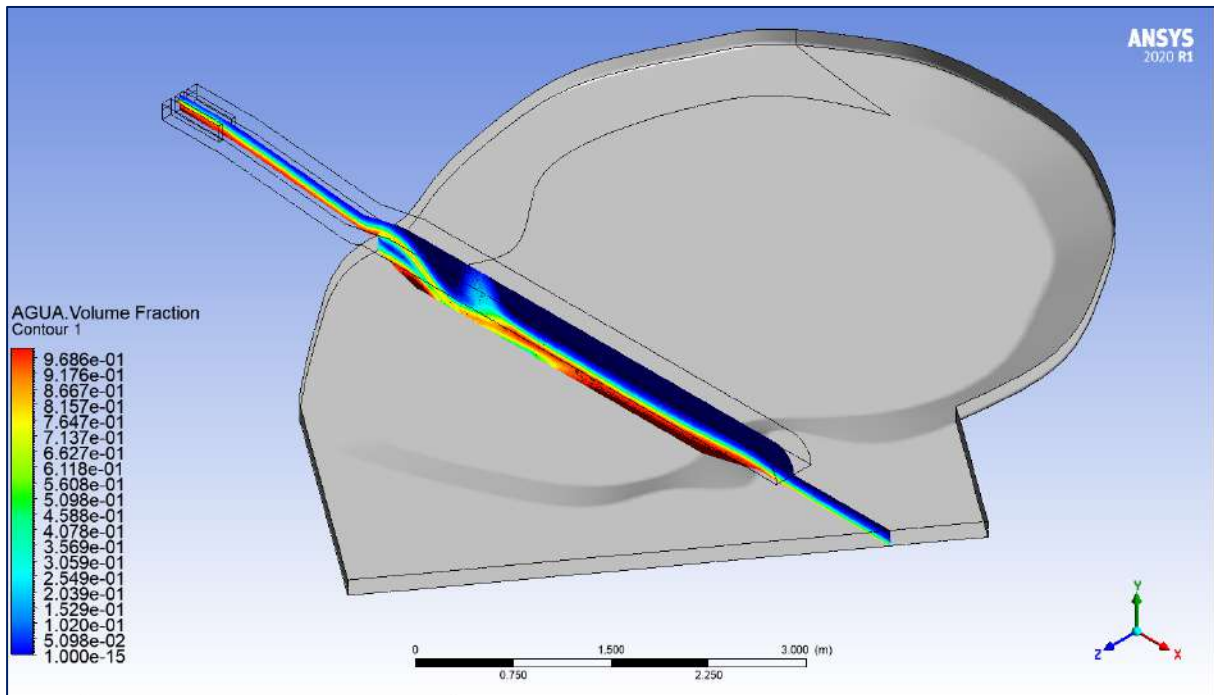


Figura 67. Vista isométrica de la fracción volumétrica del agua

Fuente: Elaboración propia

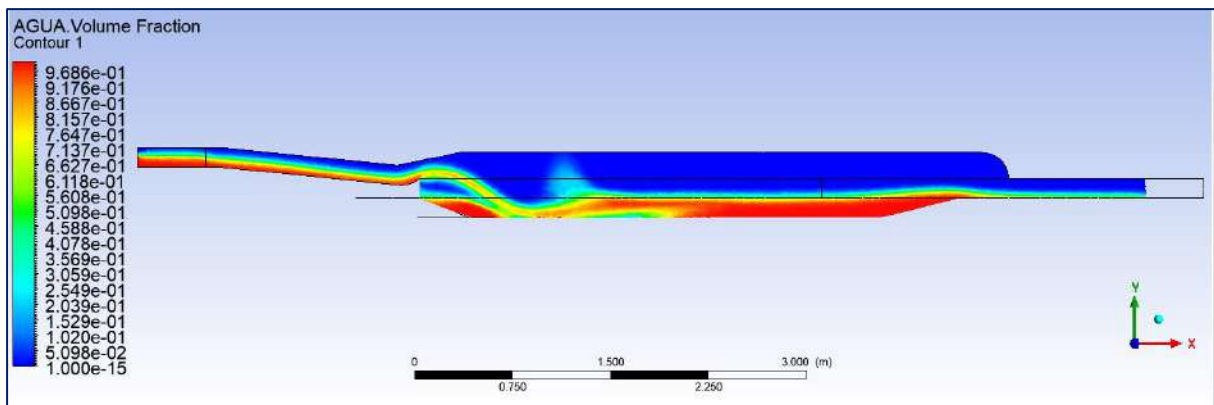


Figura 68. Vista lateral de la fracción volumétrica del agua

Fuente: Elaboración propia

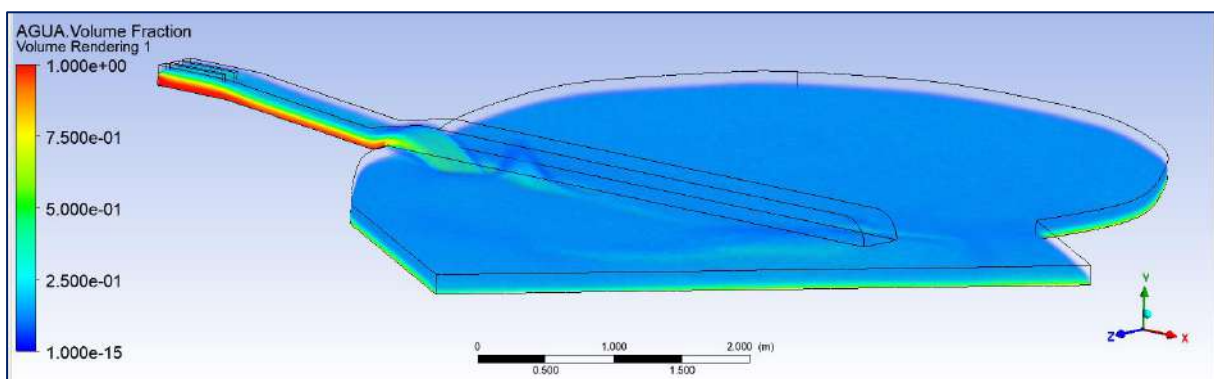


Figura 69. Vista isométrica de la fracción volumétrica del agua en todo el dominio

Fuente: Elaboración propia

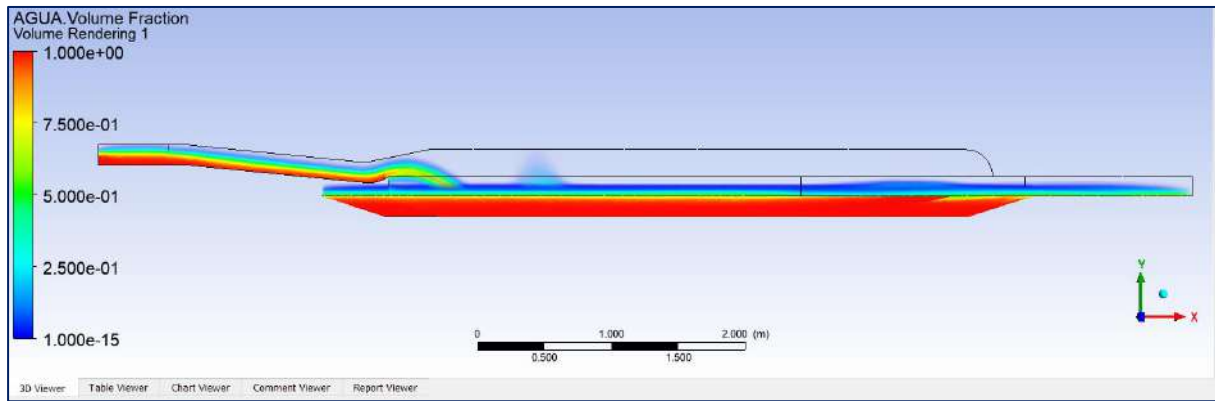


Figura 70. Vista lateral de la fracción volumétrica del agua en todo el dominio

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 71 y Figura 72 se aprecian líneas de corriente y vectores de velocidad que describen la trayectoria del fluido, estas muestran el recirculamiento del fluido uno a la derecha y otro a la izquierda, luego de que el flujo impacte en el cerro que se encuentra al frente del esquí. El recirculamiento ubicado a la derecha se aproxima a los cimientos de la presa para luego seguir su trayectoria hacia la salida.

A partir de los contornos de velocidad obtenidos en la salida (ver Figura 73), se puede observar una mayor evacuación de flujo por la parte derecha y no por su cauce natural (tramo izquierdo), ello genera aguas abajo inundaciones y erosión de tierras de cultivo hasta que finalmente se une al cauce principal del Río Chira.

En la Figura 74 y Figura 75 se puede observar vectores y contornos de los esfuerzos de corte que se producen en la región de interés, de ambas figuras se aprecia que los esfuerzos de mayor magnitud se alojan en la parte izquierda de dicha región alcanzando valores de hasta 92.24 N/m^2 ; además en la Figura 76 se ha obtenido un valor de 30.24 N/m^2 como esfuerzo de corte promedio en dicha región.

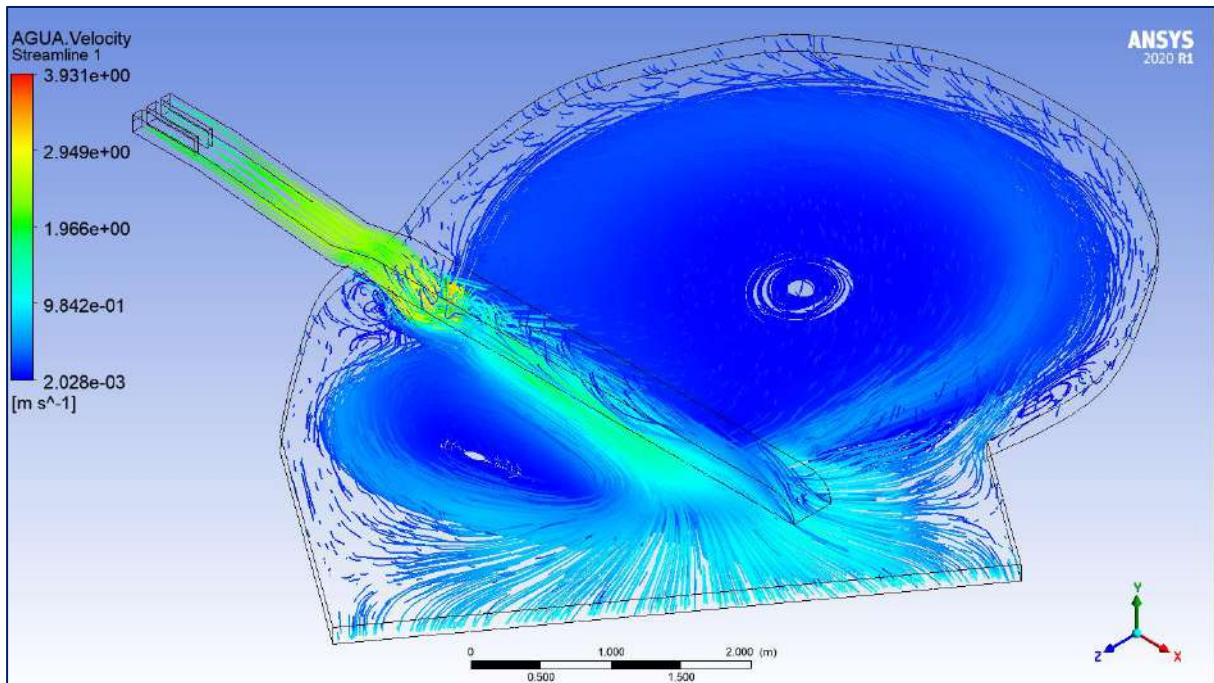


Figura 71. Líneas de corriente de velocidad en la poza de disipación

Fuente: Elaboración propia

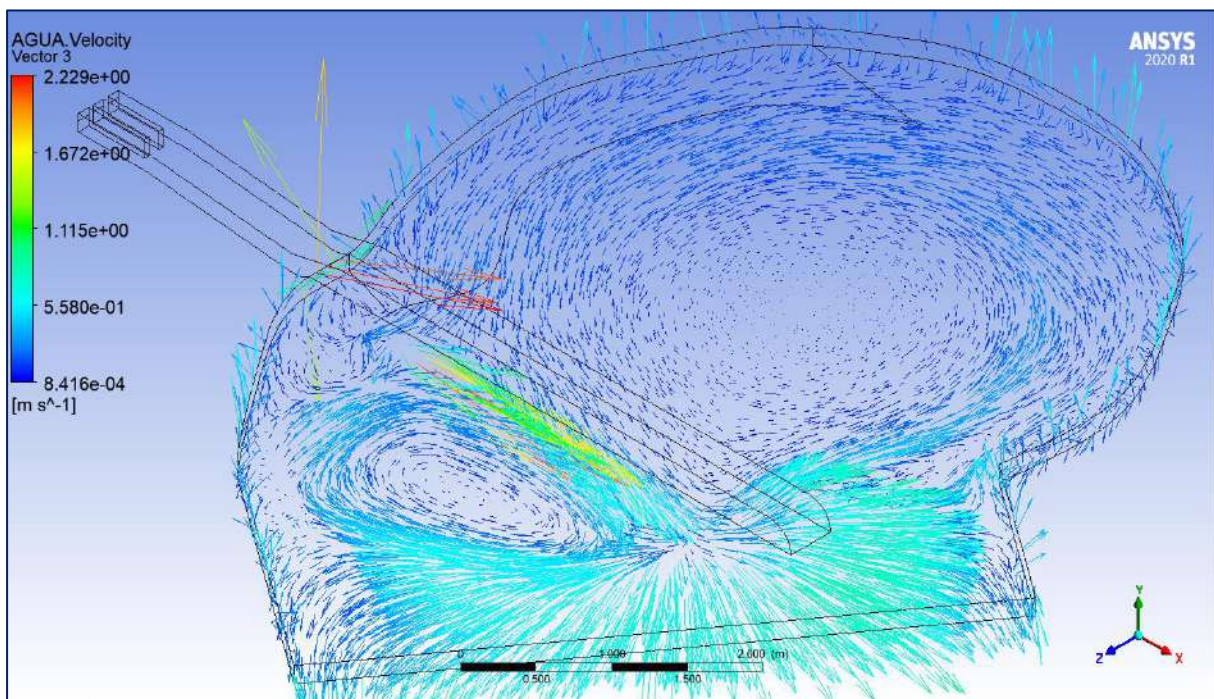


Figura 72. Vectores de velocidad en la poza de disipación

Fuente: Elaboración propia

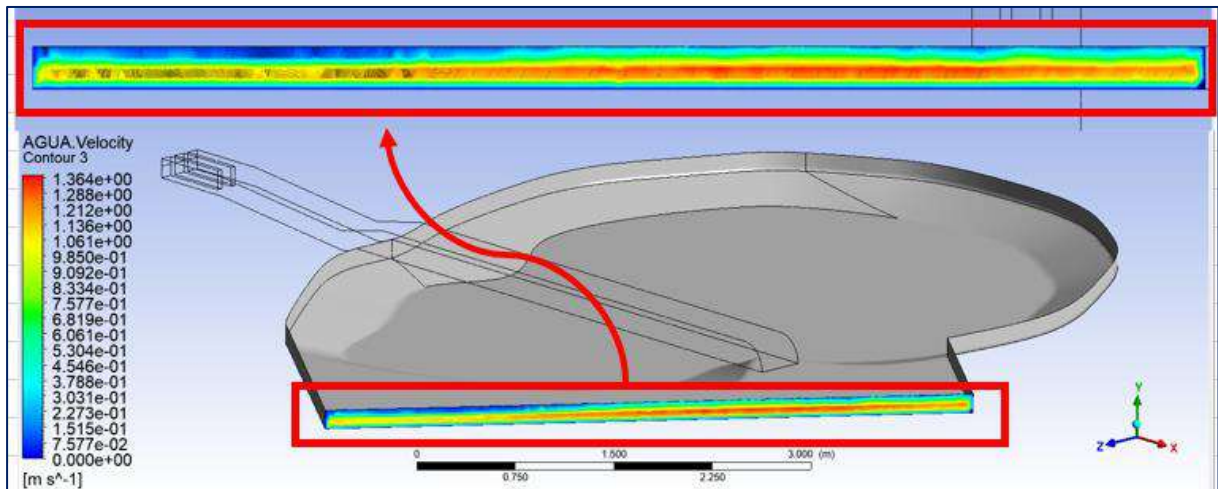


Figura 73. Contorno de velocidad a la salida del modelo

Fuente: Elaboración propia

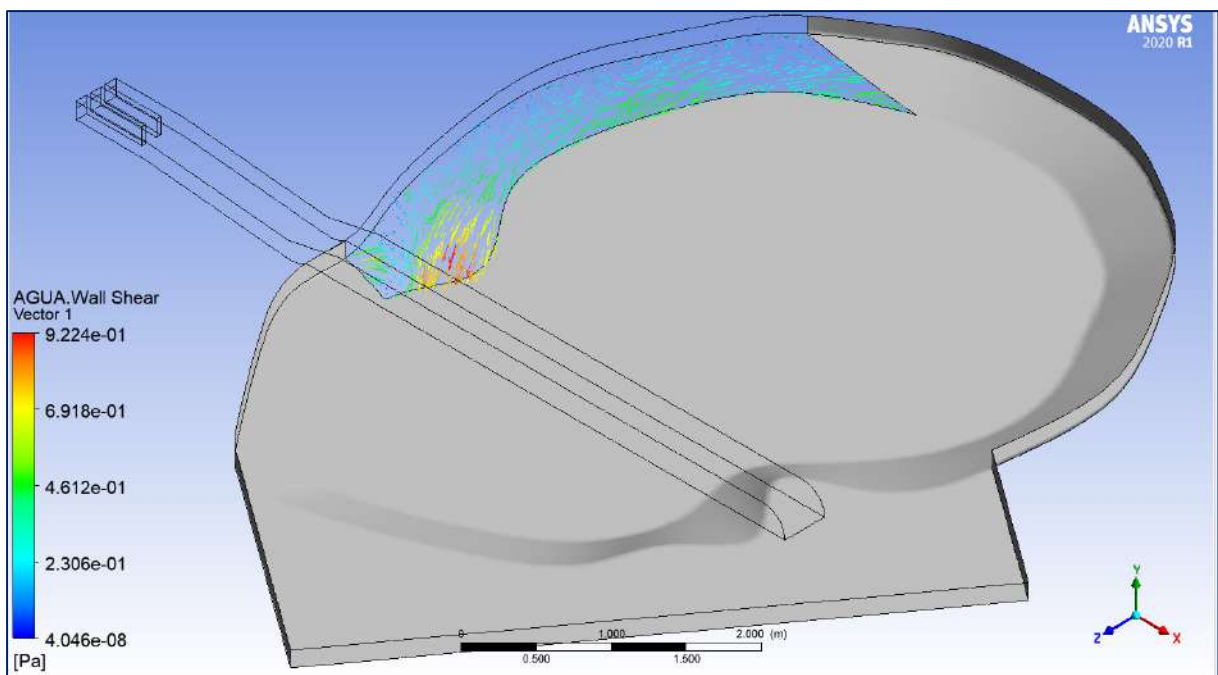


Figura 74. Vectores de esfuerzo de corte en la región de interés

Fuente: Elaboración propia

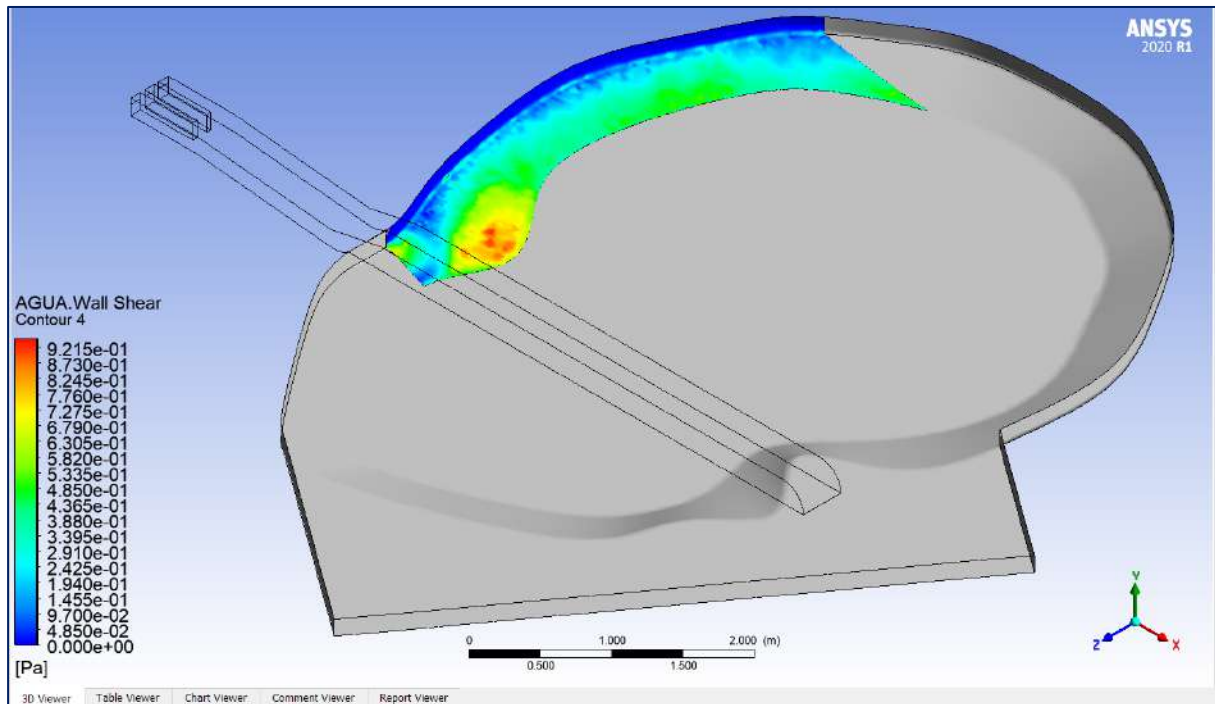


Figura 75. Contornos de esfuerzo de corte en la región de interés

Fuente: Elaboración propia

Function Calculator

Function: areaAve

Location: REGINTERES

Case: CFX 2

Variable: AGUA.Wall Shear

Direction: None

Fluid: AGUA

Results

Area Average of AGUA.Wall Shear on REGINTERES

areaAve(AGUA.Wall Shear)@REGINTERES
0.302371 [Pa]

☒ Clear previous results on calculate

☒ Show equivalent expression

Calculate Hybrid Conservative

Figura 76. Esfuerzos de corte promedio en la región de interés

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 77 se observan vectores de velocidad en la región de interés, alcanzando velocidades de hasta 6 m/s que impactan contra la región de interés, estas velocidades máximas se desarrollan en la parte superficial del flujo; por otro lado, en Figura 78 se tiene que la velocidad promedio en la región de interés es de 1.6 m/s.

En la Figura 79, Figura 81, Figura 82, Figura 83 y Figura 84 se presentan isosuperficies de velocidad de 6, 4, 3, 2 y 1 m/s respectivamente, observándose que las mayores velocidades se producen en la parte superficial del fluido (ver Figura 80); además se observa una zona de estancamiento con velocidades menores a 1 m/s producto del recirculamiento del flujo, luego de impactar en el cerro.

Finalmente, en la Figura 85 se tiene una isosuperficie con una velocidad máxima de 40 m/s, esta es adquirida por el flujo luego de ser impulsada por el salto de esquí ubicándose en la cota 62.4 m.s.n.m., este parámetro fue obtenido mediante la herramienta de probe, la cual no solo proporciona el valor de la variable, sino que también determina su ubicación en coordenadas cartesianas.

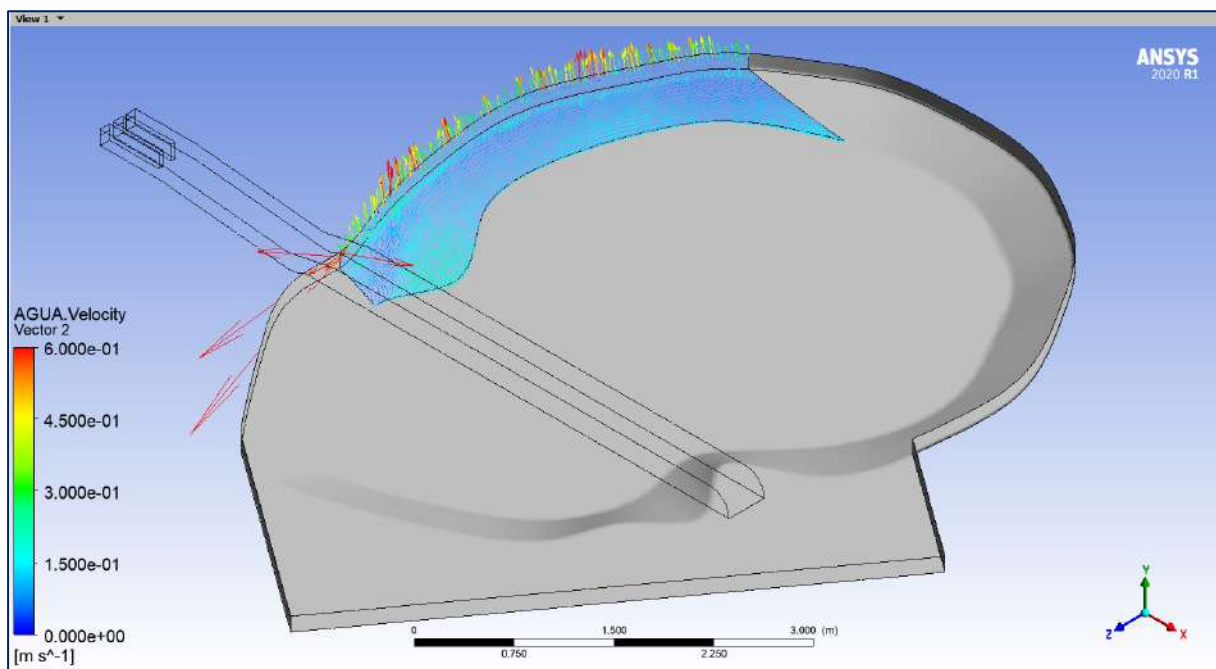


Figura 77. Vectores de velocidad en la región de interés

Fuente: Elaboración propia

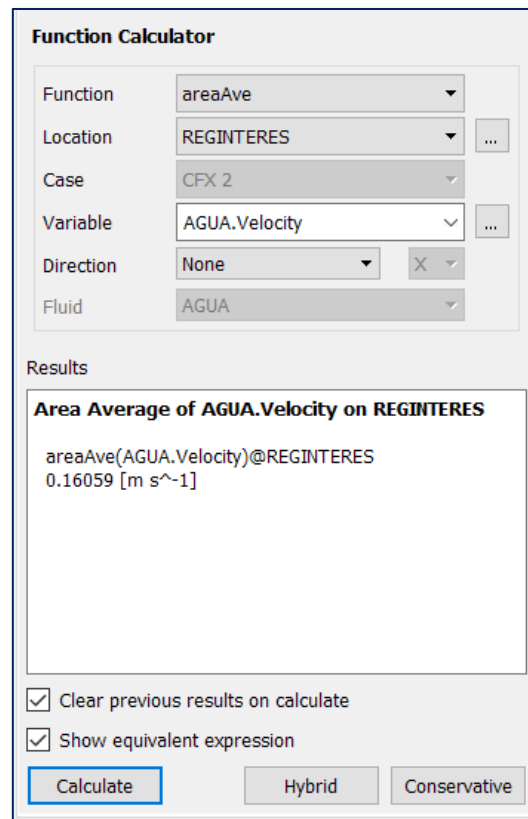


Figura 78. Velocidad promedio en la región de interés

Fuente: Elaboración propia

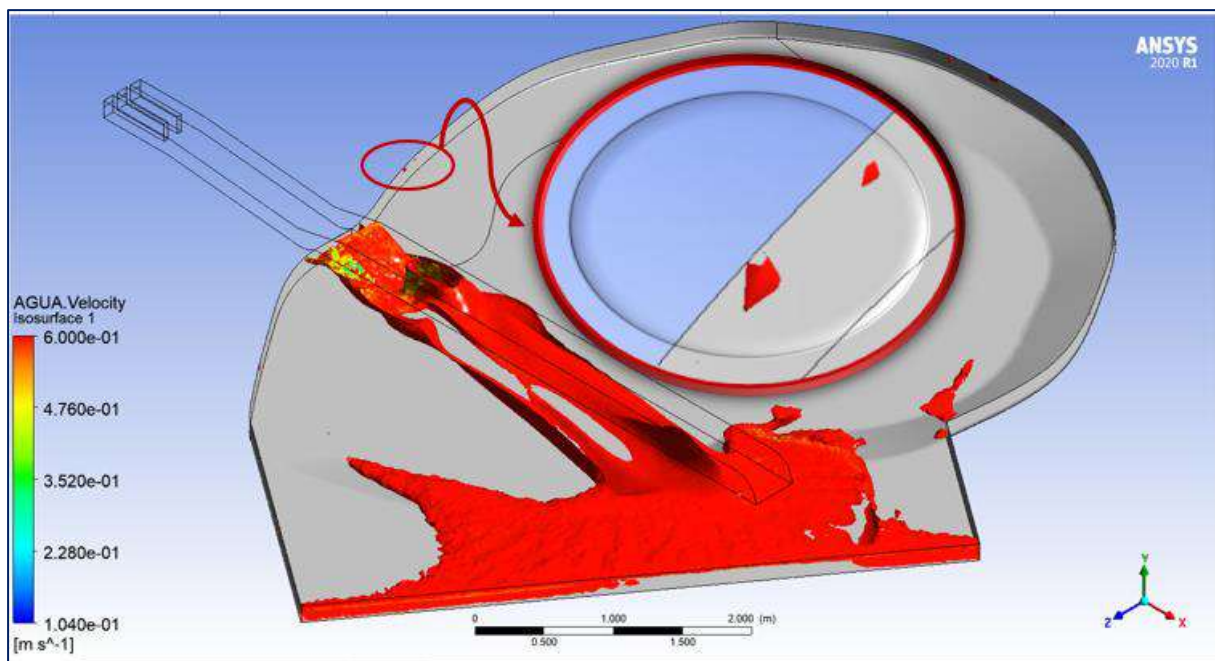


Figura 79. Isosuperficie de velocidad 6 m/s

Fuente: Elaboración propia

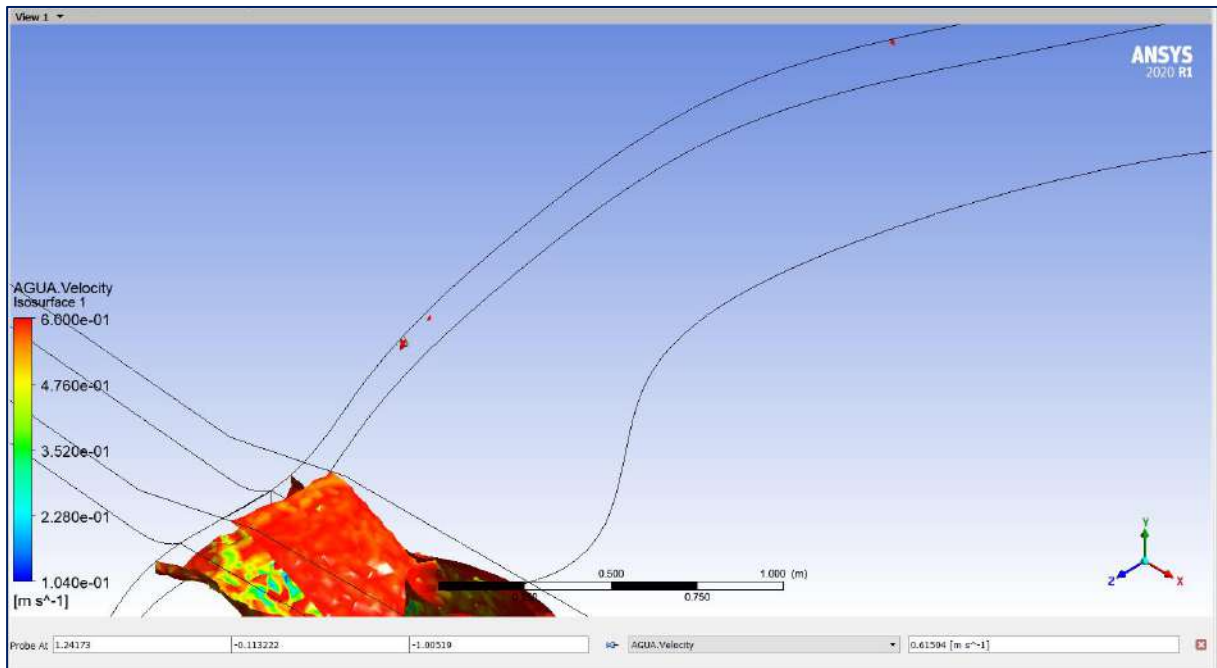


Figura 80. Cota de la velocidad máxima en la región de interés

Fuente: Elaboración propia

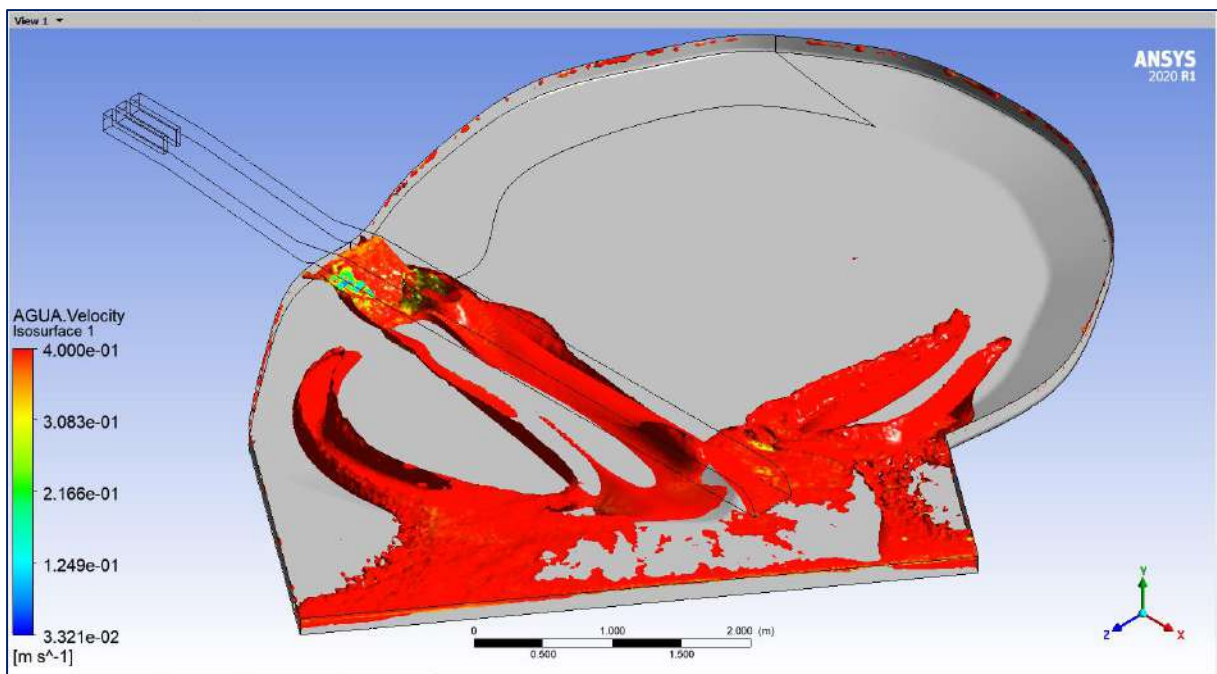


Figura 81. Isosuperficie de velocidad 4 m/s

Fuente: Elaboración propia

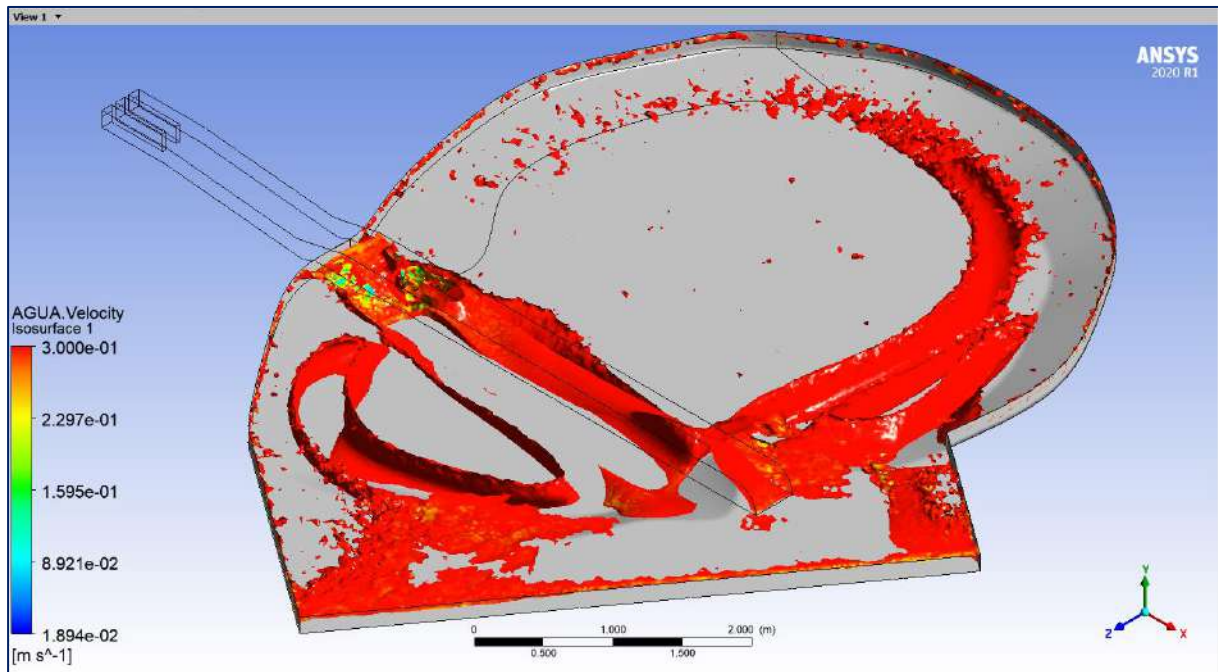


Figura 82. Isosuperficie de velocidad 3 m/s

Fuente: Elaboración propia

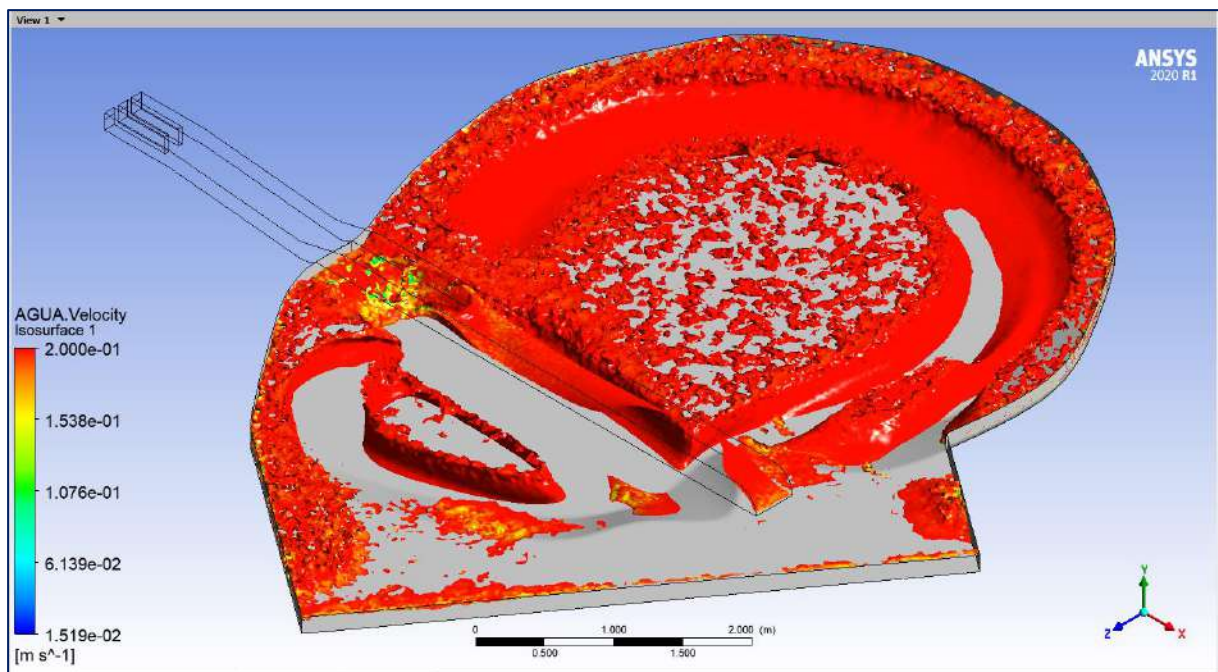


Figura 83. Isosuperficie de velocidad 2 m/s

Fuente: Elaboración propia

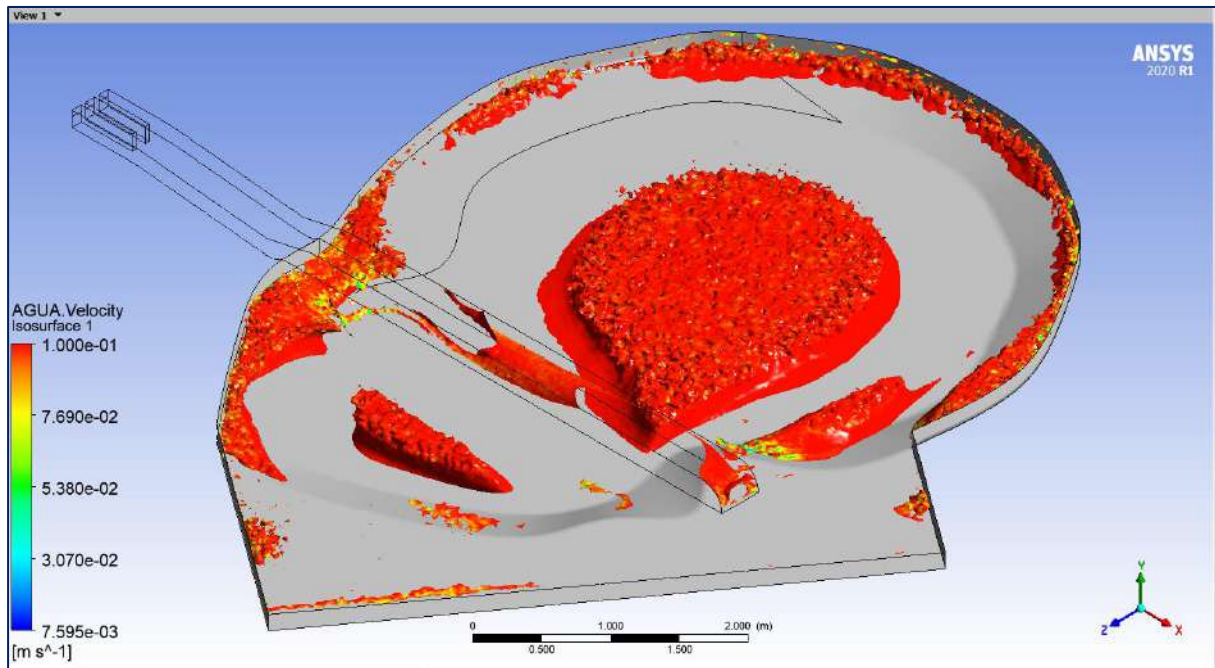


Figura 84. Isosuperficie de velocidad 1 m/s

Fuente: Elaboración propia

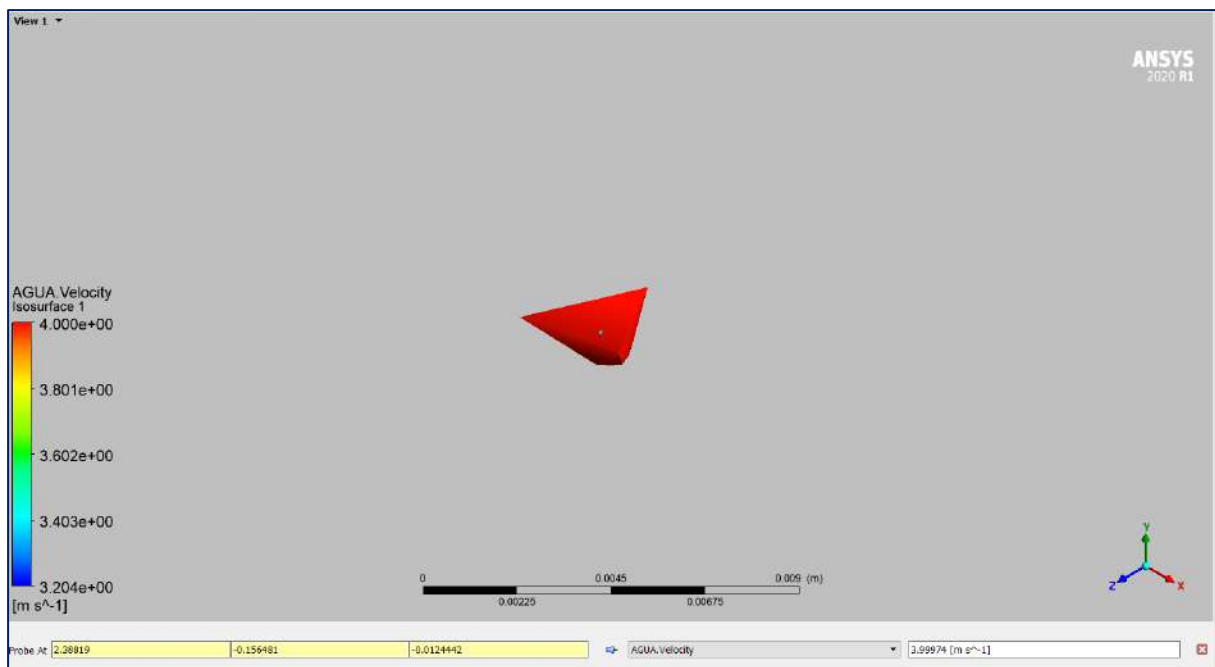


Figura 85. Velocidad máxima que alcanza el chorro de agua luego de ser impulsado por el salto de esquí

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

De acuerdo a la comparación entre los resultados de velocidades desarrolladas en un plano ubicado a 100 m del aliviadero de compuertas entre modelo y la ecuación 6.1, existe una variación de 8.86% entre los resultados, por lo tanto, el modelo se da por válido pues proporciona resultados cercanos a los que se obtienen a partir de fórmulas.

Las velocidades obtenidas a través de vectores de velocidad en la región de interés alcanzan los 6 m/s, por lo tanto, se concluye la existencia de erosión en dicha región, ya que al estar constituida por materiales como grava arenosa, arena limosa y limos, los cuales no soportan velocidades mayores a 0.5 m/s; por otra parte, la velocidad promedio en esta región es de 1.6 m/s, siendo de igual manera superior a la velocidad resistente de los suelos que conforman dicha región.

De acuerdo a los vectores e isosuperficies de velocidad, se tiene que la velocidad máxima se desarrolla en la parte superficial del flujo e impacta sobre la región de interés, producto del recirculamiento, estas al ser velocidades grandes causan erosión.

Los contornos de esfuerzos de corte en la región de interés alcanzan un valor máximo de 92.15 N/m² y un valor promedio de 30.24 N/m².

La modelación numérica es muy importante, debido a que nos muestra cómo será el comportamiento del fluido y en ese caso divagar si el diseño es adecuado o es necesario realizar algunas modificaciones.

Los parámetros de calidad y el adecuado refinamiento del mallado son muy importantes, pues determinan la convergencia de las ecuaciones de conservación y calidad de resolución de los resultados.

Se ha logrado reproducir el comportamiento del fluido, las líneas de corriente y los vectores muestran el recirculamiento del flujo luego de que este impactase en el cerro y su posterior redirección hacia los cimientos de la Presa del Reservorio Poechos.



Referencias bibliográficas

- Aguilar, R. (2016). *Predicción de caudales en el Río Chira con fines de descolmatación del embalse de Poechos*. (Tesis de Máster en Ingeniería Civil con Mención en Recursos Hídricos). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.
- ANSYS, Inc. (2021a). *ANSYS CFX Introduction* (2021 R1).
- ANSYS, Inc. (2021b). *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide* (2021 R1).
- ANSYS, Inc. (2021c). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide* (2021 R1).
- ANSYS, Inc. (2021d). *ANSYS Fluent Theory Guide* (2021 R1).
- ANSYS, Inc. (2021e). *ANSYS Fluent User's Guide* (2021 R1).
- ANSYS, Inc. (2021f). *ANSYS Meshing User's Guide* (2021 R1).
- ANSYS, Inc. (2021g). *DesignModeler User's Guide* (2021 R1).
- Carrera Galárraga, J. F. (2019). *Modelación numérica de la unión de dos conducciones a presión de diferente geometría, aplicando el programa ANSYS CFX*. (Tesis de Pregrado). Escuela politécnica nacional, Quito, Ecuador.
- Çengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2018). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (Fourth edition). McGraw-Hill Education.
- Crowe, C. T. (2006). *Multiphase flow handbook. Mechanical engineering series*. CRC; Taylor & Francis.
- Crowe, C. T. (2012). *Multiphase flows with droplets and particles* (2nd ed.). CRC Press.
- El Regional piura. (2015, 3 de junio). *Reservorio Poechos cumple 39 años al servicio de Piura*. El Regional piura. <https://www.elregionalpiura.com.pe/index.php/locales/148-otros-distritos/8750-reservorio-poechos-cumple-39-anos-al-servicio-de-piura>
- ESSS. (2016). *Dinámica de Fluidos Computacional o CFD: entienda que es*. <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- ESSS. (2017). *Métodos numéricos y su uso para simulación en la ingeniería*. <https://www.esss.co/es/blog/metodos-numericos-para-simulacion-en-la-ingenieria/>

- FLOW-3D. (2021, 17 de noviembre). *FLOW-3D*. <https://www.flow3d.com/>
- Fluid Mechanics 101. (2018, 25 de septiembre) [CFD] *The SIMPLE Algorithm (to solve incompressible Navier-Stokes)*. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=OOILOJ1zuiw&t=57s>
- IdealSimulations. (2019). *Turbulence models in CFD - RANS, DES, LES and DNS*. <https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/>
- Maldonado, L. y Pallares, D. (2012). *ANÁLISIS EN MODELO HIDRÁULICO DE LA ESTRUCTURA DE INTERCONEXION DE LAS CENTRALES SARAPULLO Y ALLURIQUÍN*. (Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil). Escuela politécnica nacional, Facultad de Ingeniería civil y ambiental. Quito, Ecuador...
- Miloradovic Obradovic, M. (2015). *Reglas de operación del Reservoirio Poechos para temporadas de avenidas*. Gobierno Regional Piura-Proyecto Especial Chira Piura.
- Oficina Regional de Desarrollo del Norte y International Engineering Company. (Diciembre 1968). *Proyecto de almacenamiento y derivación Chira - Piura: Estudio de factibilidad*. ORDEN. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4161>
- OpenFOAM. (2021, 18 de diciembre). *Sobre OpenFOAM*. <https://www.openfoam.com/>
- Our World in Data. (2021, 17 de diciembre). *Supercomputer Power (FLOPS)*. <https://ourworldindata.org/grapher/supercomputer-power-flops?time=earliest.2020>
- Proyecto Especial Chira Piura. (2021, 5 de diciembre). *Proyecto Especial Chira Piura: Proyecto Especial Chira Piura-Primera etapa*. Gobierno Regional Piura. <http://www.chirapiura.gob.pe/proyecto/primera-etapa>
- Ruiz, C. (2017). *Calibración hidráulica del desarenador San Gabán II analizando los modelos de turbulencia con TELEMAC - 3D*. (Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Reyes, J. (2018). *Hidráulica-Análisis del comportamiento hidráulico [material de clase]*. Universidad de Piura, Piura.
- Versteeg, H. K. y Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Pearson Education Ltd.
- Zikanov, O. (2010). *Essential computational fluid dynamics*. Wiley.

Anexos





Fuente: 39th IAHR World Congress, 2022



Anexo B. Visita técnica al Reservorio Poechos



Figura 186. Visita técnica al Reservorio Poechos



Figura 2. Aliviadero de compuertas



Figura 3. Descarga del flujo por el salto de esquí y recirculamiento en la poza de disipación



Figura 487. Efectos del recirculamiento en la zona próxima al cimiento de la presa