

Design of a semihexagonal hydraulic dissipator using ANSYS and a experimental model

Rojas Llallahui Sebastián Alfonso¹ ; Carmona Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos² ; Pucha Cofrep Franz Leonardo, Magister Scientiae en Sistemas de Información Geográfica ³ 

^{1,2} Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202013286@upc.edu.pe, pcciacar@upc.edu.pe

³ Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, fapucha@utpl.edu.ec

Abstract— *Water resources are affected by rainstorms, increasing flow rates and velocities, which cause erosion and overflowing of riverbeds. For this reason, it is urgent to design structures that reduce velocities and dissipate the energy caused by increases in flow rates. However, fluid kinematics is complex, as studying fluid behavior requires solving very complex equations, such as the Navier–Stokes and Saint Venant equations. Today, technological advances allow for a partial solution of these equations, which led to the development of this research, in which a three-dimensional model was designed in Autodesk Inventor software and simulated in ANSYS CFX, using water as the fluid, to which an inlet velocity of 0.045 m/s and 0.021 m/s was applied to evaluate whether or not the dissipator module created was able to achieve efficient energy dissipation between the inlet and outlet sections, laying the foundations for future research on application in streams, taking into account the transport of hyperconcentrated fluids.*

Keywords—*Hydraulic Dissipator, CFD, Experimental Model.*

Diseño de un disipador hidráulico semihexagonal usando ANSYS y un modelo experimental

Rojas Llallahui Sebastián Alfonso¹; Carmona Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos²; Pucha Cofrep Franz Leonardo, Magister Scientiae en Sistemas de Información Geográfica³

^{1,2} Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202013286@upc.edu.pe, pcciacar@upc.edu.pe

³ Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, fapucha@utpl.edu.ec

Resumen— Los recursos hídricos se ven afectados por los temporales de lluvia, incrementando caudales y velocidades, las cuales provocan erosiones y desbordamientos en sus cauces. Por lo dicho anteriormente es urgente diseñar estructuras que reduzcan las velocidades y disipen la energía que provocan los incrementos de caudales, sin embargo, la cinemática de fluidos tiene sus complejidades, pues para estudiar el comportamiento de estos, hay que resolver ecuaciones muy complejas, como es el caso de las ecuaciones de Navier – Stokes y las de Saint Venant. Hoy en día existen avances tecnológicos que permiten hacer una resolución parcial de las referidas ecuaciones, y esto llevó a desarrollar esta investigación, en la que se diseñó un modelo tridimensional en el software Autodesk Inventor y se simuló en ANSYS CFX, teniendo al agua como fluido, al cual se aplicó una velocidad de entrada de 0.045 m/s y 0.021 m/s para evaluar si el módulo disipador creado pudo o no lograr una disipación de energía eficiente entre los tramos de entrada y de salida; sentando bases para futuras investigaciones en aplicación en quebradas, teniendo en cuenta el transporte de fluidos hiperconcentrados.

Palabras clave—Disipador Hidráulico, CFD, Modelo Experimental.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cambio climático ha ocasionado lluvias extremas en muchas regiones, provocando la ocurrencia de huacos que pueden afectar gravemente a las poblaciones cercanas [1]. Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar estrategias de prevención y mitigación frente a estos desastres naturales. Sin embargo, las entidades encargadas de evaluar la efectividad de las defensas civiles enfrentan limitaciones debido a la escasez de estudios que analicen cómo estas estructuras pueden disipar la energía del agua y del lodo.

Una de las principales dificultades radica en la necesidad de construir modelos físicos a escala, los cuales resultan costosos y complejos. No obstante, en los últimos años se ha avanzado considerablemente en el estudio de estos fenómenos mediante el uso de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que, en conjunto con modelos físicos a escala, permiten comprender mejor el comportamiento hidráulico de estos eventos [2].

El comportamiento hidráulico de los canales y disipadores depende principalmente de la forma del perfil interior, del desarrollo del flujo y de la distribución de presiones a lo largo del sistema. En configuraciones complejas, los métodos analíticos tradicionales presentan limitaciones para predecir recirculaciones, pérdidas locales de energía y zonas de baja

velocidad. Esto dificulta la estimación precisa de la disipación de energía y del comportamiento del fluido en geometrías no rectas.

Por tanto, las herramientas de CFD se han consolidado como una alternativa adecuada para modelar dispositivos hidráulicos. Programas como ANSYS CFX permiten analizar perfiles de velocidad, presiones y pérdidas de energía antes de construir un prototipo físico, reduciendo así los costos y el número de ensayos necesarios. Sin embargo, para que los modelos CFD sean aplicables con fines de diseño, deben ser validados experimentalmente en condiciones controladas.

Por las razones expuestas en esta investigación, se planteó como objetivo diseñar un disipador hidráulico con geometría semihexagonal, conformado por una serie de módulos dispuestos entre la entrada (inlet) y la salida (outlet), en la cual se evaluó 2 velocidades de entrada, con los cuales se determinó el porcentaje de pérdida de energía generada.

II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene como finalidad evaluar la eficiencia de los disipadores semihexagonales, usando ANSYS CFX y una validación experimental mediante las líneas de corriente y los tirantes hidráulicos.

III. MARCO TEORICO

A. ANSYS

Es una suite de software de simulación de ingeniería asistida por computador (CAE) que emplea el análisis por elementos finitos (FEA) para modelar y predecir el comportamiento estructural, térmico, de fluidos y electromagnético de sistemas reales sin construir prototipos físicos [3].

B. Malla Estructurada

Un mallado estructurado es una malla en la que la conectividad nodo-elemento es periódica y predeterminada, lo que significa que el mismo patrón de elementos se repite a lo largo del dominio, típicamente utilizando cuadriláteros en 2D o hexaedros en 3D [4].

C. Calidad del Mallado

La calidad ortogonal cuantifica cuán perpendiculares son las caras de las celdas adyacentes, con valores entre 0 y 1, mientras que el skewness mide qué tan desviada está la forma de la celda respecto a una forma ideal, donde 0 representa una celda perfectamente ideal y valores cercanos a 1 indican celdas

muy deformadas como se muestra en la figura 1 [5]. Una buena calidad de mallado asegura mayor precisión en los resultados y una mejor estabilidad numérica en la simulación.

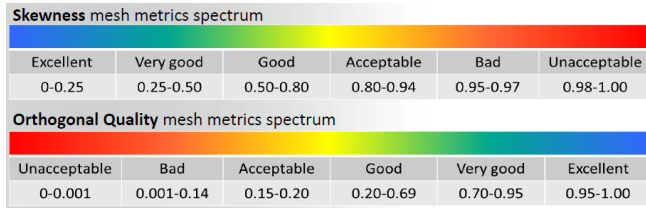


Fig.1 Calidad del mallado de ANSYS

D. Tirante Hidráulico

El tirante hidráulico es un parámetro geométrico fundamental en la hidráulica de canales abiertos. Se define como el cociente entre el área hidráulica de la sección transversal del flujo y el ancho superficial del agua. Es esencial para el cálculo de números adimensionales como el Número de Froude y en las relaciones de energía en el flujo en canal abierto. En el caso especial de un canal rectangular, el tirante hidráulico coincide con la profundidad real del flujo [6].

E. Número de Reynolds

El número de Reynolds es una cantidad adimensional que expresa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en un flujo de fluido, y se utiliza para predecir si dicho flujo es laminar, transitorio o turbulento [7].

$$Re = \frac{\rho x V x D_h}{\mu} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds

ρ = Densidad del fluido ($\frac{kg}{m^3}$)

V = Velocidad del fluido ($\frac{m}{s}$)

D_h = Diámetro hidráulico (m)

μ = Viscosidad dinámica del fluido ($\frac{N * s}{m^2}$)

F. Número de Courant

El número de Courant es un número adimensional que cuantifica la relación entre la velocidad de propagación de la información (o del fluido) y la malla/nivel de discretización temporal; es un parámetro clave para evaluar la estabilidad numérica de esquemas explícitos [8].

$$C = \frac{\mu x \Delta t}{\Delta x} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

C = Número de Courant

μ = Velocidad del fluido ($\frac{m}{s}$)

Δt = Paso de tiempo de la simulación (s)

Δx = Tamaño de la celda del mallado de la geometría (m)

G. Ecuación de la Energía

La Ecuación de la Energía Hidráulica en canales abiertos es la manifestación del Principio de Conservación de la Energía (Ecuación de Bernoulli), que establece que la carga total del flujo se mantiene constante entre dos secciones, descontando las pérdidas por fricción. Esta carga total se define como la suma de la carga de elevación, la carga de presión representada por el tirante, y la carga de velocidad [9].

$$y_1 + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_t \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

y = Tirante Hidráulico (m)

v = Velocidad del fluido ($\frac{m}{s}$)

g = Gravedad ($\frac{m}{s^2}$)

z = Cota de fondo del canal (m)

h_t = Pérdidas totales (m)

H. Modelo de Turbulencia SST SAS

Modelo de turbulencia para simular flujos turbulentos, mediante un modelo de 2 ecuaciones, en los cuales estaba incluido el modelo k- ω SST y el modelo SAS [10].

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - 0.09 * k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\mu_t} P_k - 0.09 \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) \frac{2}{1.168} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + Q_{SAS} \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

F_1 : Función de combinación utilizada en los modelos de turbulencia

P_k : Término de la producción de energía cinética de la turbulencia

Γ_k y Γ_ω : Difusividades turbulentas

I. Estela Turbulenta

La estela turbulenta es la región de flujo perturbado y aleatorio formada detrás de un cuerpo sólido debido a la separación de la capa límite; se caracteriza por vórtices y fluctuaciones de velocidad generadas por la interacción inercial-viscosa [11].

J. Vorticidad

La vorticidad es una propiedad del flujo que mide la rotación local de las partículas de un fluido. Indica qué tan rápido y en qué sentido gira un pequeño volumen de agua alrededor de su propio centro, debido a gradientes de velocidad presentes en el flujo [12].

K. Tinta fluorescein sodium

Fluorescein sodium (fluoresceína sódica) es un colorante fluorescente hidrosoluble, derivado de la fluoresceína, que se utiliza principalmente como trazador en estudios hidrológicos y ambientales a través de su intensa luminiscencia cuando es excitado con luz azul o ultravioleta.

IV. HERRAMIENTAS Y MÉTODOS

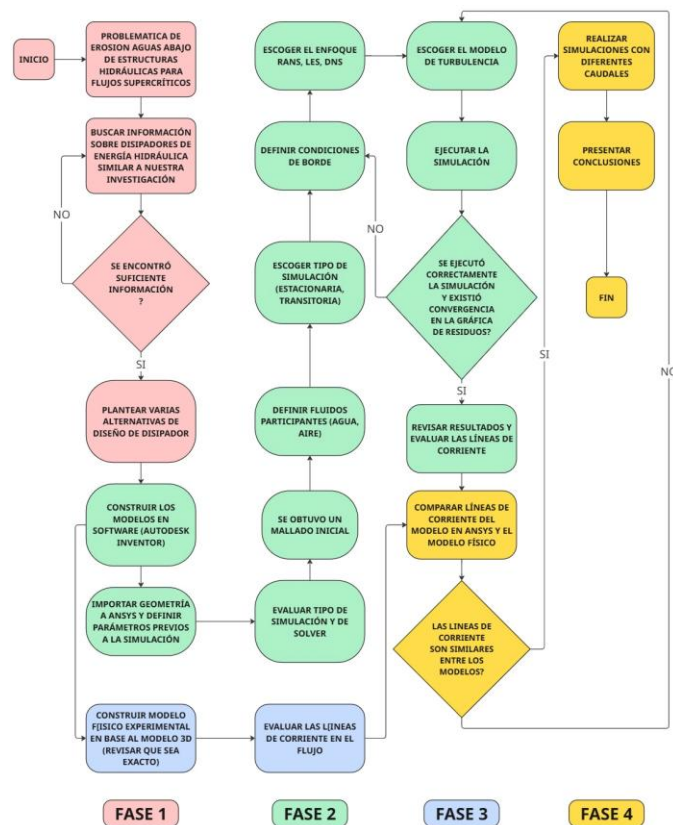


Fig.2 Diagrama de flujo de la investigación

En esta parte se muestran las diferentes fases acometidas para el desarrollo del disipador hidráulico semihexagonal, desde el diseño conceptual hasta la validación experimental del modelo numérico obteniendo el modelo computacional de ANSYS. El proceso metódico que se definió con el propósito de que no existieran discontinuidades entre el modelo computacional obtenido de ANSYS y los resultados experimentales conseguidos en laboratorio.

Con el fin de comprender el procedimiento general, se realizó un diagrama de flujo, mostrado en la figura 2, que lo resume en términos de las principales fases que abarca la

investigación. En dicho diagrama se observan las etapas de diseño geométrico, simulación CFD, construcción del modelo físico y comparación de resultados, las cuales se encuentran diferenciadas por colores para facilitar su identificación. Asimismo, estas fases están ordenadas alfabéticamente desde la A hasta la D y se presentan con mayor nivel de detalle en el apartado de resultados. De esta manera, se permite visualizar de forma ordenada la secuencia de actividades y la interrelación entre las diferentes herramientas empleadas, garantizando una validación completa del rendimiento hidráulico del disipador propuesto.

FASE 1

Esta fase consistió en identificar el problema de erosión aguas abajo, revisar información técnica sobre disipadores de energía y evaluar si los antecedentes eran suficientes. Con base en ello, se plantearon alternativas de diseño del disipador, las cuales serían analizadas posteriormente.

FASE 2

La fase consistió en la construcción de la geometría del disipador en un software CAD; posteriormente, mediante la herramienta ANSYS, se malló la geometría y se aplicaron las condiciones de borde, para finalmente ejecutar la simulación y analizar las líneas de corriente y la pérdida de energía generada.

FASE 3

La fase consistió en la construcción de un modelo físico experimental, el cual permitió evaluar las líneas de corriente generadas y los tirantes hidráulicos. Los resultados obtenidos fueron utilizados para comparar y validar la simulación numérica desarrollada en la fase previa, asegurando la coherencia y confiabilidad del análisis realizado.

FASE 4

La fase consistió en la comparación de los parámetros hidráulicos obtenidos tanto en el modelo físico experimental como en el modelo CFD, con el objetivo de confirmar la validez del modelo numérico y evaluar la disipación de energía generada. Finalmente, a partir de este análisis, se establecieron las conclusiones de la investigación.

V. RESULTADOS

La evaluación del disipador se realizó mediante simulaciones numéricas en ANSYS CFX, complementadas con un modelo físico-experimental construido y probado en una instalación sin pendiente. En este proceso, se seleccionó un modelo de turbulencia adecuado que permitiera reproducir las mismas configuraciones de líneas de corriente observadas en el modelo experimental, así como los mismos tirantes de agua, lo que permitió validar el modelo CFD y garantizar la coherencia entre los resultados numéricos y experimentales.

A. Diseño de la configuración de los disipadores

El proceso comienza con el dibujo en planta de los disipadores semihexagonales sobre una superficie rectangular de 75 x 49.5 cm, como se muestra en la figura 3, la cual tendrá

que ser restringida en su totalidad para mantener las relaciones geométricas del dibujo.

Una vez realizado este paso, se procede a usar la herramienta Extrude, con la cual se puede convertir nuestro modelo 2D en un sólido, como se muestra en la figura 4, aplicándole un valor de 10 cm para evitar errores por gradiente de presiones. Como último paso de esta fase, se tiene que exportar esta geometría en un formato válido para el software ANSYS, como podría ser el formato step.

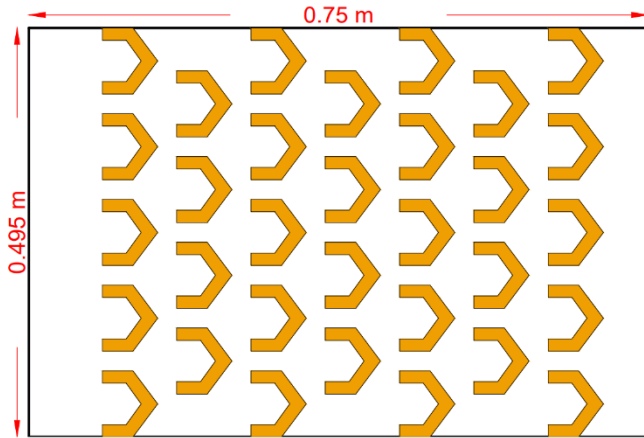


Fig.3 Boceto de los disipadores semihexagonales en 2D

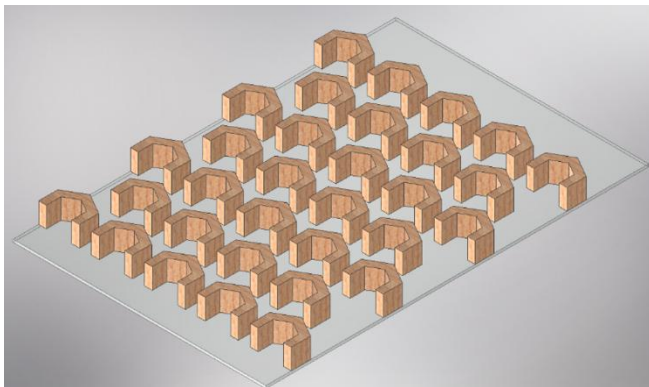


Fig.4 Boceto de los disipadores semihexagonales en 3D

B. Delimitación del área de entrada con ANSYS Design Modeler

Este proceso inicia con la importación de la geometría, para luego finalizar con la realización de un corte en la sección de entrada con la herramienta llamada Face Split, cuya dimensión es igual a 4.6 mm en el primer caso y 0.020 m para el segundo caso.

C. Mallado de la geometría con ANSYS Meshing

En segundo lugar, se procedió a importar la geometría modificada al apartado de ANSYS Meshing, en el cual se procedió a generar un primer mallado, teniendo en cuenta su calidad en base a su ortogonalidad y a su factor de Skewness. De igual manera se procedió a seguir generando mallados hasta conseguir el ideal, con el cual exista concordancia con el

modelo experimental. Para la obtención del mallado final se usó un mallado general de 0.0090 metros, se usó la herramienta de Sizing, para poder realizar un mallado más fino de las caras interiores de los disipadores, siendo esto llamado Face Sizing en el cual de igual manera se aplicó una dimensión de mallado de 0.0045 metros y por último se aplicó la herramienta Method con la configuración automática, de tal manera que el software elija de manera automática que partes del mallado deben ser con formas tetraédricas, hexaédricas u otra que se adapte mejor. El mallado final obtenido se muestra en la figura 5. De igual manera en las figuras 6 y 7 se muestran las calidades de mallado según la ortogonalidad y Skewness, estando mediante ambas metodologías en el rango de muy bueno a excelente, garantizándonos la precisión de la simulación. Además, se denota que el mallado final presenta 241320 nodos y 201549 elementos y es de tipo estructurado.

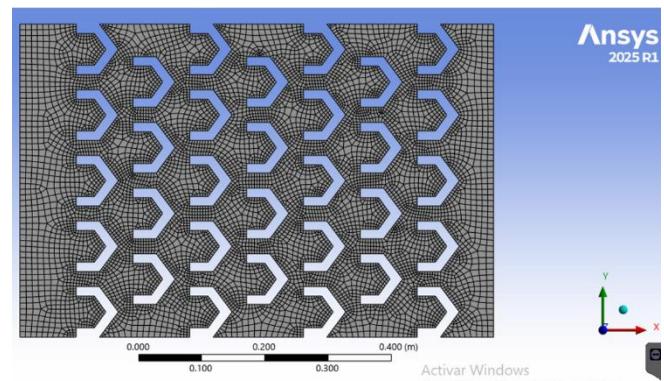


Fig.5 Mallado Final

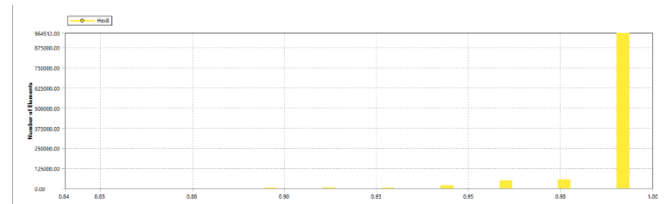


Fig.6 Calidad Ortogonal

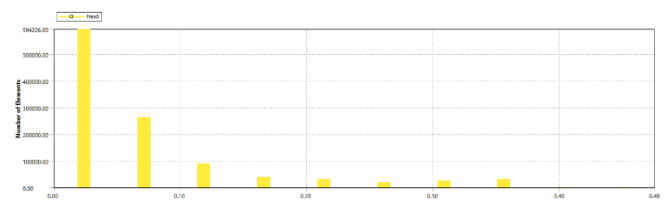


Fig.7 Calidad según Skewness

D. Configuración de los parámetros de la simulación en ANSYS CFX

En tercer lugar, se tiene el apartado la configuración del Solver ANSYS CFX, en el cual se importará el mallado obtenido anteriormente. Una vez hecho esto, como primer paso de este apartado, se procedió a definir los fluidos participantes de la simulación, los cuales se muestran en la figura 8 y se define también el eje en el cual participará la gravedad.

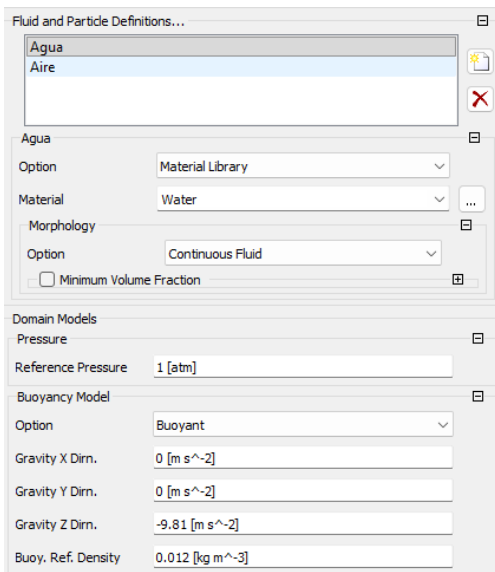


Fig.8 Configuración de los fluidos participantes

Como segundo paso se tiene la definición del modelo de turbulencia, el cual corresponde al modelo SST, el mismo que se muestra en la figura 9. Este modelo fue seleccionado debido a que se desea realizar una simulación transitoria, ya que permite analizar cómo evolucionan los parámetros hidráulicos, como los tirantes y la velocidad, a lo largo del tiempo. Asimismo, el modelo SST resulta adecuado para capturar con mayor precisión las turbulencias generadas al interior de los disipadores, especialmente en zonas con fuertes gradientes de velocidad y separación del flujo. De esta manera, se obtiene una representación más realista del comportamiento hidráulico del sistema y de los fenómenos turbulentos presentes durante la disipación de energía.

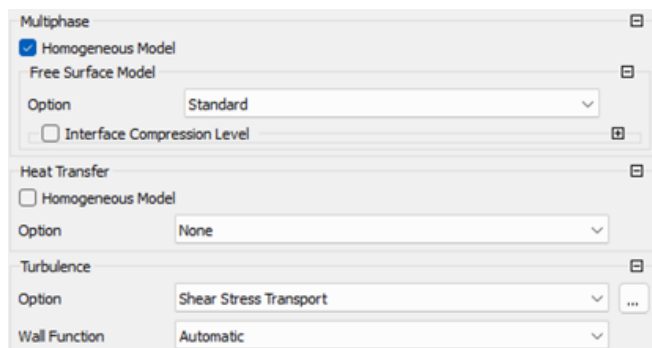


Fig. 9 Configuración del modelo de turbulencia

Como tercer paso se tiene la configuración del modelo de tensión superficial, en el cual se configura el coeficiente de la tensión superficial con un valor de 0.072 N/m, el cual corresponde a un valor en condiciones normales, y se configura el modelo de tensión superficial llamado fuerza superficial continua, el cual reparte esta fuerza entre las celdas del mallado, para poder así modelar este efecto correctamente. Otro apartado a denotar es el de transferencia de interfaz, el cual se configuró

con un tipo de superficie libre, puesto que se tiene 2 fluidos los cuales deben ser inmiscibles. Esto se muestra en la figura 10.

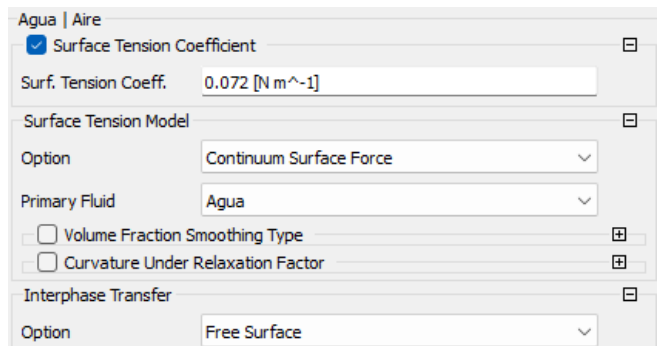


Fig. 10. Configuración de la tensión superficial

Como cuarto paso se tiene la configuración de las condiciones de borde, las cuales determinarán el comportamiento que tendrá cada parte del canal en la simulación, dentro de las cuales están: entrada, salida, atmósfera y muros. Destacando entre ellas la configuración del flujo másico de la entrada con un valor de 0.102465 kg/s y 0.208 kg/s respectivamente, mostrado en la figura 11, y la configuración de la rugosidad de los materiales participantes, los cuales son la madera, la cual conforma los disipadores del canal, y el acrílico que corresponde a la base del canal. Esto es mostrado en la figuras 12.

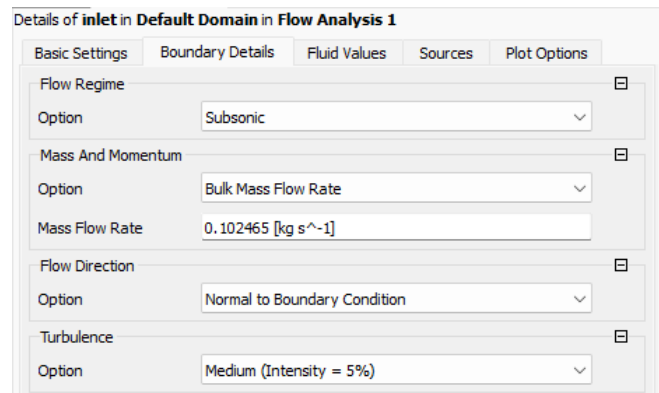


Fig. 11. Configuración del flujo másico de entrada

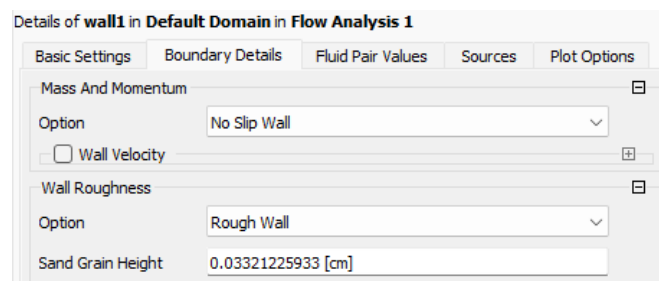


Fig. 12. Configuración de la rugosidad del muro

Una vez definidas las condiciones de borde, se procedió a configurar las condiciones iniciales del análisis de flujo dentro del dominio definido en ANSYS CFX, las cuales se muestran en la figura 13. En esta sección se establecen los valores iniciales de las variables principales del fluido antes de iniciar la solución numérica. En el apartado Velocity Type se selecciona la opción Cartesian, lo que indica que la velocidad inicial del fluido se definirá mediante sus componentes en el sistema de coordenadas cartesianas, es decir U, V y W. En este caso, los valores de las tres componentes ($U = 0 \text{ m/s}$, $V = 0 \text{ m/s}$, $W = 0 \text{ m/s}$) indican que el fluido inicia en reposo dentro del dominio.

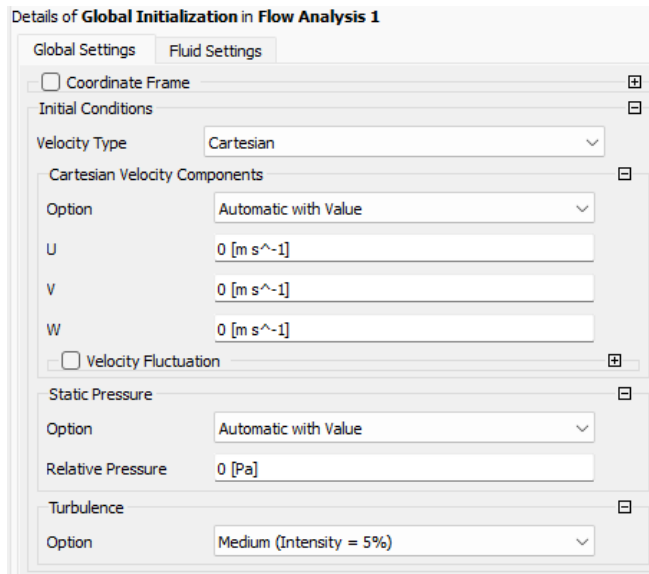


Fig. 13. Condiciones iniciales de la Simulación

Posteriormente, el movimiento del fluido será generado por las condiciones de frontera aplicadas. Además, la presión estática se ha definido con una presión relativa de 0 Pa, lo que representa condiciones de referencia neutras al inicio del cálculo. Finalmente, en la figura 14 se muestran las condiciones de salida, las cuales corresponden a un intervalo de 5 pasos, lo cual representa que el solver grabó información cada 5 pasos de tiempo.

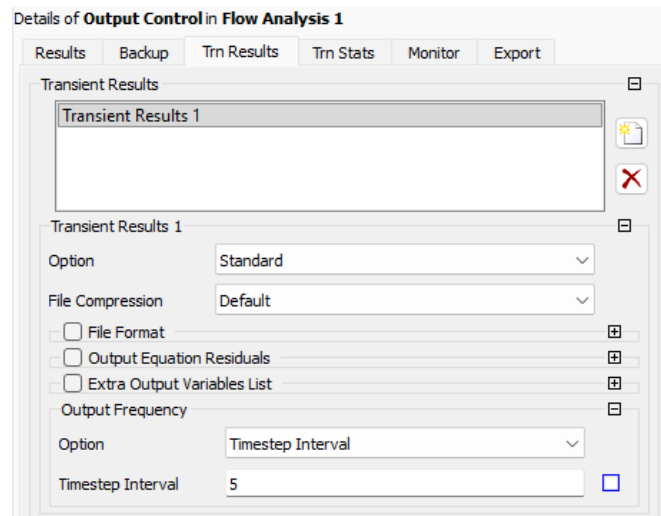


Fig. 14. Condiciones de salida de la simulación

Una vez terminado con la parte CFD, se procedió a construir la maqueta para poder realizar la validación experimental, en la cual se utilizó un plano impreso para poder ubicar de manera correcta los disipadores semi-hexagonales. Finalmente se procedió a pegar los disipadores en las ubicaciones marcadas, como se muestra en la figura 15. Todo este procedimiento se detalla mejor en el diagrama de flujo mostrado en la figura 16.

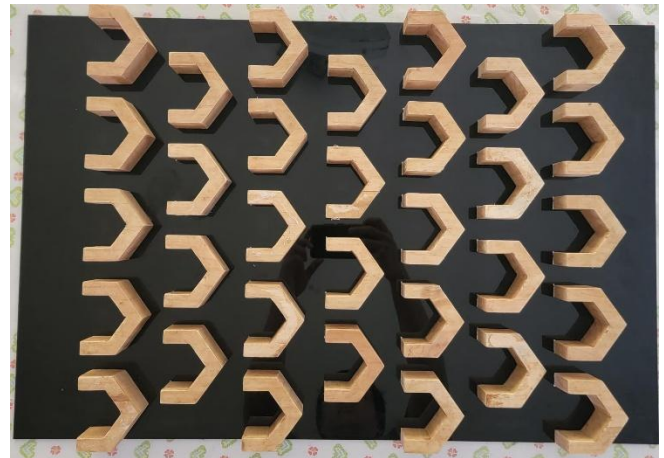


Fig. 15 Modelo físico experimental terminado

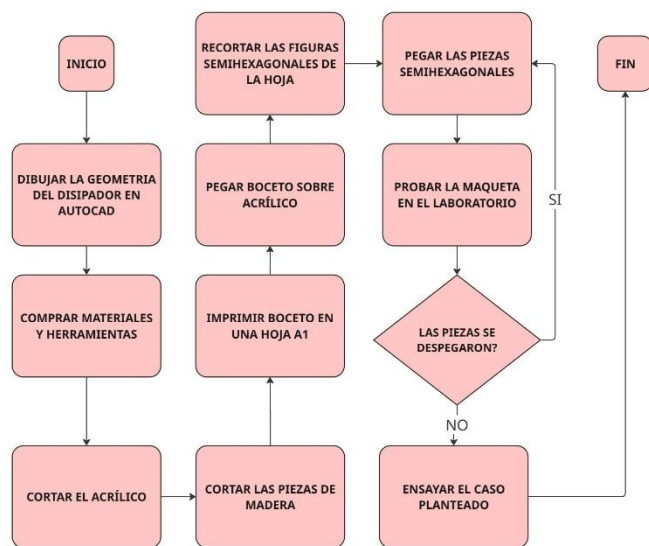


Fig. 16 Diagrama de flujo del modelo experimental

Una vez finalizada la maqueta, se procedió a su implementación en el laboratorio de hidráulica bajo la condición de entrada prevista previamente. Sin embargo, antes de realizar las pruebas, fue necesario calibrar la velocidad de ingreso del flujo. Para ello, se consideró primero la información del equipo utilizado, la cual se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Datos del laboratorio

Ancho de la base de entrada (m)	0.495
Altura de entrada (m)	0.01
Viscosidad del agua	0.00102
Ancho bade de salida (m)	0.6
Longitud de la base de salida (m)	0.093

Luego de realizar la obtención de datos de laboratorio, se procedió con la toma de datos de tiempo. Para ello, tres personas cronometraron el tiempo que tardaba el flujo en recorrer tramos de 1 cm, hasta completar una distancia total de 4 cm dentro del canal. Este procedimiento permitió obtener mediciones más precisas y reducir el margen de error asociado al tiempo de desplazamiento del fluido. A continuación, se presentan las tablas 2 y 3 con los resultados obtenidos durante el registro experimental de los 2 casos estudiados.

Tabla 2. Tiempos cronometrados en el caso 1

H acumulado	T - A(s)	T-B(s)	T-C(s)	Promedio
0.01	3.13	3.15	3.22	3.17
0.02	2.43	2.45	2.4	2.43
0.03	2.5	2.51	2.5	2.50
0.04	2.28	2.28	2.29	2.28
Promedio total				2.60

Tabla 3. Tiempos cronometrados en el caso 2

H acumulado	T - A(s)	T-B(s)	T-C(s)	Promedio
0.01	3.40	3.42	3.49	3.44
0.02	3.90	3.92	3.87	3.90
0.03	4.01	4.02	4.01	4.01
0.04	4.40	4.40	4.41	4.40
Promedio total				3.94

Posteriormente, se procedió al cálculo del volumen correspondiente a cada uno de los cuatro centímetros evaluados. Con estos valores, fue posible determinar el caudal por centímetro, dividiendo el volumen entre el tiempo registrado en cada tramo durante la fase de cronometraje. Finalmente, se obtuvieron las velocidades de entrada dividiendo los caudales entre el área de la sección de ingreso del canal, lo que permitió obtener una velocidad para cada centímetro analizado y, posteriormente, una velocidad promedio. De este modo, se logró establecer con precisión la velocidad de entrada requerida para el experimento. Siendo mostradas en las tablas 4 y 5 las velocidades para ambos casos.

Tabla 4. Cálculo de velocidades de entrada del caso 1

$\Delta h(m)$	Δ Volumen (m3)	Q entrada (m3/s)	Velocidad de entrada (m/s)
0.01	0.00057	0.00018000	0.036
0.01	0.00057	0.00023489	0.047
0.01	0.00057	0.00022769	0.045
0.01	0.00057	0.00024963	0.050
Velocidad Total promedio (m/s)			0.045

Tabla 5. Cálculo de velocidades de entrada del caso 2

$\Delta h(m)$	Δ Volumen (m3)	Q entrada (m3/s)	Velocidad de entrada (m/s)
0.01	0.00057	0.000165	0.018
0.01	0.00057	0.000146	0.020
0.01	0.00057	0.000142	0.023
0.01	0.00057	0.000129	0.023
Velocidad Total promedio (m/s)			0.021

En primera instancia, se presentan las líneas de corriente obtenidas mediante la simulación CFD en ANSYS. Estas permiten visualizar el comportamiento del flujo a lo largo del canal y, especialmente, dentro de los disipadores semihexagonales. Los resultados muestran claramente la formación de remolinos, zonas de recirculación y cambios de dirección del flujo al interior de los disipadores, evidenciando la generación de turbulencias controladas como parte del proceso de disipación de energía. Al comparar estas líneas de corriente del modelo CFD, mostradas en la figura 17, con las observaciones del modelo experimental, se aprecia una notable similitud en el patrón de flujo. Tanto en el modelo físico como en el numérico, las turbulencias se concentran en áreas específicas dentro de los disipadores, lo cual confirma que la geometría propuesta induce el rompimiento del flujo principal y favorece la pérdida de energía. Esta correspondencia visual entre ambos modelos respalda la validez de la simulación y demuestra que ANSYS reproduce adecuadamente el comportamiento hidráulico observado en el experimento.

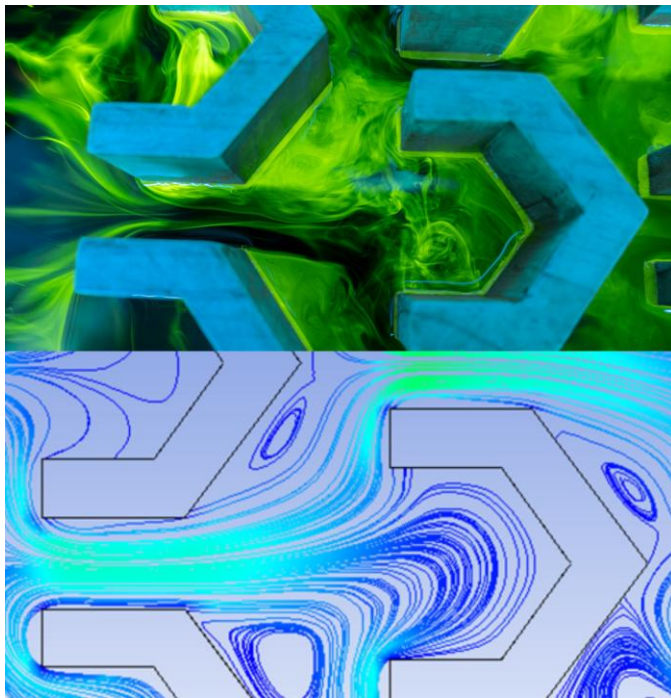


Fig. 17 Líneas de Corriente

Para la validación del modelo CFD, se recurrió únicamente a la medición de los tirantes de agua y al análisis de las líneas de corriente, debido a la falta de implementos necesarios para la obtención de otros parámetros hidráulicos. Las mediciones del tirante se realizaron en múltiples puntos distribuidos a lo largo del canal, como se muestra en la Figura 18, utilizando un vernier para garantizar mayor precisión. El procedimiento consistió en registrar la distancia desde la parte superior de los disipadores hasta la superficie libre del agua y restar este valor de la altura total de los disipadores, lo que permitió determinar el tirante real del flujo en cada zona evaluada; de esta manera, la comparación entre los tirantes medidos experimentalmente y los obtenidos en la simulación, junto con la observación cualitativa de las líneas de corriente, constituyó el criterio principal para evaluar la validez del modelo CFD.



Fig. 18 Medición de tirantes en el laboratorio

Este método proporcionó datos precisos y comparables a lo largo del canal, permitiendo analizar la variación del tirante y su relación con el proceso de disipación hidráulica dentro del sistema. Adicionalmente, se presenta la figura 19 en la que se muestran los planos de análisis utilizados para el cálculo de la energía hidráulica a lo largo del canal. Estos planos fueron ubicados estratégicamente en diferentes posiciones del flujo, con el fin de evaluar la variación energética entre la zona de ingreso y la zona de salida.

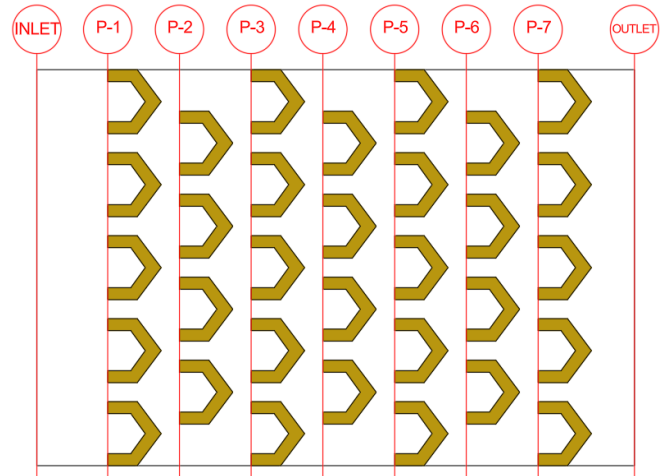


Fig. 19 Ubicación de los planos de análisis

Al comparar los valores obtenidos en cada plano, fue posible determinar la pérdida progresiva de energía y, por lo tanto, cuantificar la disipación generada por la geometría de los disipadores. La figura 20 muestra la comparación de los tirantes entre lo obtenido en el modelo CFD y el modelo experimental para así garantizar la validez del modelo.

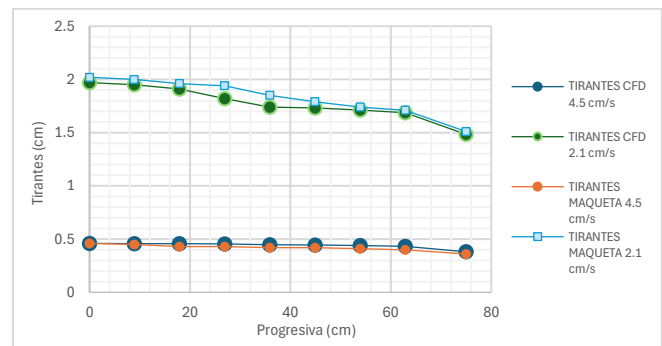


Fig. 20 Comparación de tirantes entre modelos CFD y experimentales

Tabla 6. *Parámetros hidráulicos obtenidos del caso 1*

PLANO	Progresiva (cm)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Cota (m)
INLET	0	0.00460	0.045	0.002
1	8.9	0.00457	0.019	0.002
2	17.9	0.00456	0.027	0.002
3	26.9	0.00455	0.032	0.002
4	35.9	0.00447	0.029	0.002
5	44.9	0.00445	0.028	0.002
6	53.9	0.00439	0.030	0.002
7	62.9	0.00433	0.031	0.002
OUTLET	75	0.00381	0.033	0.001

Asimismo, en la tabla 6 y 7 se presentan los datos obtenidos del modelo CFD correspondientes a los tirantes, velocidades y cotas registradas en cada uno de los siete planos del caso 1 con el propósito de evaluar el comportamiento energético en cada sección del canal.

Tabla 7. *Energía obtenida en los planos del caso 1*

PLANO	Energía (m)	Energía (mm)	Energía (%)
INLET	0.0070	7.00	100.00
1	0.0069	6.89	98.34
2	0.0069	6.90	98.54
3	0.0069	6.90	98.51
4	0.0067	6.71	95.79
5	0.0067	6.69	95.46
6	0.0066	6.64	94.79
7	0.0066	6.58	93.94
OUTLET	0.0058	5.76	82.31

De igual manera en las tablas 8 y 9 se presentan los datos obtenidos del modelo CFD correspondiente a los parámetros hidráulicos del caso 2.

Tabla 8. *Parámetros hidráulicos obtenidos del caso 2*

PLANO	Progresiva (cm)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Cota (m)
INLET	0	0.0197	0.021	0.0099
1	8.9	0.0195	0.009	0.0097
2	17.9	0.0191	0.012	0.0095
3	26.9	0.0182	0.015	0.0091
4	35.9	0.0174	0.012	0.0087
5	44.9	0.0173	0.012	0.0086
6	53.9	0.0171	0.013	0.0086
7	62.9	0.0169	0.013	0.0085
OUTLET	75	0.0148	0.013	0.0074

Tabla 9. *Energía obtenida en los planos del caso 2*

PLANO	Energía (m)	Energía (mm)	Energía (%)
INLET	0.0296	29.62	100.00
1	0.0292	29.20	98.59
2	0.0286	28.61	96.58
3	0.0273	27.31	92.20
4	0.0261	26.11	88.14
5	0.0259	25.92	87.51
6	0.0257	25.72	86.83
7	0.0253	25.37	85.64
OUTLET	0.0222	22.24	75.09

Finalmente, se presenta la figura 21 que permite visualizar de manera más clara la pérdida de energía a lo largo del canal.

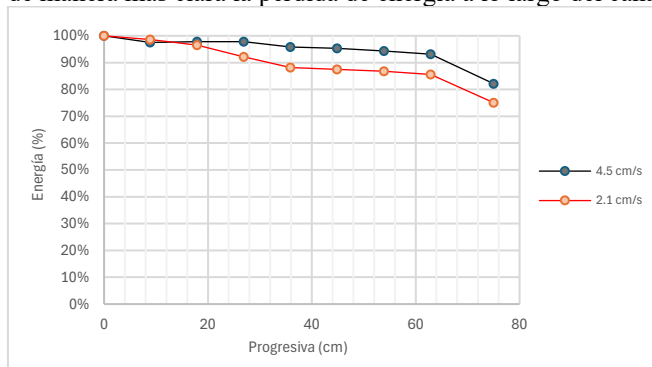


Fig. 21 Gráfica Progresiva vs Energía

En ella se ilustran los valores de energía calculados para

cada uno de los planos analizados, mostrando una disminución gradual desde la zona de ingreso hasta la salida del sistema equivalente al 17.69% en el caso 1 y una disminución del 24.91% en el caso 2.

VI. CONCLUSIÓN

El análisis realizado evidencia que en el caso 1, donde la velocidad de entrada fue mayor, pero el tirante hidráulico menor, la disipación de energía resultó más baja. En cambio, el caso 2, con una velocidad inicial menor pero un tirante más elevado, presentó una disipación significativamente mayor. Estos resultados indican que el tirante hidráulico tiene una influencia más determinante en la disipación de energía dentro del canal que la velocidad de entrada, destacando su papel en el comportamiento hidráulico global del flujo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por proporcionar el entorno formativo en el que esta investigación se gestó y desarrolló. Su dedicación a la formación profesional hizo posible que el proyecto avanzara en un contexto que promueve el pensamiento crítico, la curiosidad científica y el rigor académico.

REFERENCIAS

- [1] L. Rivera Ch., "Análisis climático de precipitaciones extremas en zonas andinas", Tesis de Ingeniería Ambiental, Univ. Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 2021.
- [2] M. Gonzales P. y R. Huamán T., Fundamentos de Dinámica de Fluidos Computacional para Ingeniería Civil, McGraw-Hill, Lima, Perú, 2019.
- [3] C. Sevilla Becerra, "Modelación numérica de la cámara de carga y rápida hidráulica de la Central Hidroeléctrica de Curumuy", Tesis de Ingeniería, Univ de Piura, Piura, Perú, 2020.
- [4] Ponce Segovia, R. I. (2024). Dinámica de Fluidos Computacional con OpenFoam: Fundamentos y Estrategias Avanzadas
- [5] ANSYS Inc, "Mesh Quality Best Practices", Documentación técnica de ANSYS Meshing, ANSYS Inc, Canonsburg, EE. UU, 2023.
- [6] J. Ven te Chow, "Definición y fundamentos del tirante hidráulico", en Hidráulica de Canales Abiertos, McGraw-Hill, Ciudad de Mexico, Mexico, 1994.
- [7] F. M. White, "Definición y fundamento del número de Reynolds", Mecánica de Fluidos, McGraw-Hill, Nueva York, EE. UU, 2011.
- [8] R. Courant, K. Friedrichs & H. Lewy, "Definición y formulación del número de Courant", Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik, Mathematische Annalen, Berlín, Alemania, 1928.
- [9] F. P. Henderson, "Conceptos fundamentales de la energía hidráulica en canales abiertos", en Open Channel Flow, Macmillan Publishing, Nueva York, EE. UU., 1966.
- [10] F. R. Menter & Y. Egorov, "Definición y fundamentos del modelo de turbulencia SST - SAS", The Scale-Adaptive Simulation Method for Unsteady Turbulent Flow Predictions. Part 1: Theory and Model Description, ANSYS Germany GmbH, Darmstadt, Alemania, 2010.
- [11] H. Schlichting & K. Gersten, "Definición y características de la estela turbulenta en flujo hidráulico", Boundary-Layer Theory, Springer-Verlag, Berlín, Alemania, 2017.
- [12] V. L. Streeter & E. B. Wylie, "Definición y fundamentos de la vorticidad en flujo hidráulico", Fluid Mechanics, McGraw-Hill, Nueva York, EE. UU, 1985.