

Study of a drop-shaped energy dissipator in Autodesk CFD and in an experimental model




Kevin Adolfo Mendoza Yzarra¹, Jonathan Gonzales Valle², Carmona-Arteaga Abel³, Magister Scientiae en Recursos Hídricos

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00276940@upn.pe, N00087855@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

Abstract– Climate change has intensified torrential flows and floods in Peru, increasing the vulnerability of affected regions and causing serious damage to infrastructure and communities near rivers. This work evaluates a teardrop-shaped hydraulic dissipator through experiments in a laminar flow table and simulations in Autodesk CFD, analyzing its performance under laminar and turbulent flow conditions. The results show that the dissipator effectively reduces flow energy, with velocities ranging from 14.60 cm/s in laminar flow and 19.38 cm/s in turbulent flow at its most critical points down to 0.01 cm/s. This analysis demonstrates how the geometry and orientation of the dissipator directly influence its effectiveness, highlighting the potential of dissipators to protect infrastructure against erosive forces in river channels.

Keywords: Autodesk CFD, energy dissipator, laminar flow machine, vortex.

Estudio de un dissipador de energía con forma de gota en Autodesk CFD y en un modelo experimental

Mendoza Yzarra Kevin Adolfo ¹, Gonzales Valle Jonathan ², Carmona-Arteaga Abel³, Magister Scientiae en Recursos Hídricos

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, N00276940@upn.pe, N00087855@upn.pe, abel.carmona@upn.edu.pe

Resumen– El cambio climático ha intensificado los flujos torrenciales y crecidas en Perú, incrementando la vulnerabilidad de las regiones afectadas y ocasionando graves daños en infraestructura y comunidades cercanas a los ríos. Este trabajo evalúa un dissipador hidráulico con forma de gota mediante experimentos en una mesa de flujo laminar y simulaciones en Autodesk CFD, analizando su desempeño bajo condiciones de flujo laminar y turbulento. Los resultados muestran que el dissipador reduce eficazmente la energía del flujo, con velocidades que van desde los 14.60 cm/s en flujo laminar y 19.38 cm/s en flujo turbulento en sus puntos más críticos hasta llegar a los 0.01 cm/s. Este análisis demuestra cómo la geometría y orientación del dissipador influyen directamente en su efectividad, destacando el potencial de los dissipadores para proteger infraestructuras frente a fuerzas erosivas en cauces fluviales.

Palabras Clave: Autodesk CFD, dissipador de energía, máquina de flujo laminar, vórtice.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha intensificado fenómenos hidrológicos extremos como inundaciones, sequías y flujos torrenciales, generando impactos significativos en la disponibilidad de recursos hídricos y en la infraestructura hidráulica. En países como Perú, el deshielo de glaciares y la variabilidad climática afectan de manera directa la sostenibilidad de comunidades y sectores clave, incrementando la vulnerabilidad frente a estos eventos. Estas condiciones resaltan la necesidad de desarrollar soluciones técnicas efectivas que mitiguen los daños asociados a flujos de alta intensidad, protegiendo tanto a las poblaciones como a las infraestructuras estratégicas del país [1][2].

Frente a estos desafíos, los dissipadores de energía representan una solución prometedora para gestionar caudales extremos. Estas estructuras reducen la energía de los flujos mediante procesos como fricción y choque hidráulico, estabilizando las condiciones aguas abajo y minimizando riesgos de erosión. Su desempeño puede evaluarse y optimizarse mediante herramientas como la dinámica de fluidos computacional (CFD), que permite modelar parámetros clave como velocidad, presión y energía, adaptando los diseños a distintos escenarios [3].

Estudios recientes han demostrado que las simulaciones CFD, particularmente en modelos tridimensionales, son esenciales para analizar y mejorar la eficacia de los dissipadores de energía. Estas herramientas permiten identificar patrones de flujo, evaluar distribuciones de energía y optimizar la entrega

del flujo, factores críticos en el diseño de infraestructuras hidráulicas sometidas a flujos intensos [4].



Fig. 1 Dissipador de energía hidráulico compuesto por bloques de concreto dispuestos en una sección de canal de desagüe (Fuente: Fabricum PUCP)

II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de este trabajo es diseñar y analizar un modelo de dissipador de energía con forma de gota, capaz de disminuir la energía cinética generados por torrentes fluviales intensos, asegurando la protección de infraestructuras hidráulicas como canales y cimientos de puentes. Para ello, se evalúa el desempeño del dissipador bajo condiciones de flujo laminar y turbulento mediante experimentos en una mesa de flujo laminar y simulaciones realizadas en Autodesk CFD. El estudio incluye el análisis de parámetros clave como velocidad, presión y número de Reynolds, comparando los resultados experimentales y simulados para validar la efectividad del modelo y explorar su potencial aplicación en escenarios reales.

III. MARCO TEÓRICO

A. Autodesk CFD

El software Autodesk CFD, desarrollado por Autodesk, simula el flujo de fluidos y la transferencia de calor, siendo usado en diversas industrias como la automotriz y la

aeroespacial para optimizar diseños antes de construir prototipos físicos [5].

Las simulaciones CFD predicen el comportamiento de fluidos como aire y agua, proporcionando una comprensión detallada del comportamiento del flujo mediante cálculos matemáticos predefinidos y las ecuaciones de Navier-Stokes y Saint Venant. Con el avance tecnológico, el CFD se ha vuelto esencial, permitiendo a ingenieros analizar variables como viscosidad, velocidad y temperatura bajo condiciones operativas específicas, facilitando la obtención de resultados precisos y eficientes [6].

B. Autodesk Inventor

El software Inventor de Autodesk es un programa CAD especializado en modelado, simulación, visualización y documentación mecánica en 3D, que integra datos 2D y 3D en una única plataforma. Permite validar la forma, el ajuste y la funcionalidad del producto antes de su fabricación, ofreciendo herramientas de modelado paramétrico, edición directa y modelado de forma libre, así como capacidad de traducción multi-CAD y soporte para archivos TrustedDWG, incorporando información de fabricación directamente en el modelado 3D [7].

C. Ecuación de Navier Stokes

Matemáticamente el movimiento de un fluido se describe mediante las ecuaciones de Navier-Stokes, que son fundamentales en la dinámica de fluidos. Según los principios de la mecánica newtoniana, estas ecuaciones deberían permitir determinar el comportamiento futuro del fluido con precisión a partir de su estado inicial. Sin embargo, a pesar de notables esfuerzos y avances en este ámbito durante más de un siglo, hasta ahora este determinismo no ha sido demostrado matemáticamente ni refutado [8].

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla\vec{P} + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{v} \dots\dots\dots(1)$$

- ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)
- \vec{v} = Vector de velocidad
- t = Tiempo
- $\nabla\vec{P}$ = Gradiente de presión
- \vec{g} = Vector de la aceleración de la gravedad
- ∇^2 = Operador Laplaciano
- μ = Viscosidad dinámica

D. Numero de Reynolds

La transición de flujo de estado laminar a turbulento depende de factores como la geometría, rugosidad de la superficie, velocidad del flujo, temperatura y tipo de fluido. Osborne Reynolds demostró que el régimen de flujo se determina por la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas, representada por el número de Reynolds, un parámetro adimensional. El flujo en canales es laminar si el número de Reynolds es menor a 500 y turbulento si lo supera. En flujos laminares, las líneas de corriente son casi paralelas, mientras

que, en flujos turbulentos, dominados por fuerzas de inercia, las líneas de corriente se vuelven caóticas y desordenadas [8].

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \dots\dots\dots(2)$$

- Re = Número de Reynolds.
- ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)
- V = Velocidad del fluido (m/s)
- D = Diámetro interior (m)
- μ = Viscosidad dinámica del fluido ($Pa \cdot s$)

E. Ecuación de la energía

En flujos de canales abiertos con líquidos de densidad constante, la conservación de la masa en un flujo estacionario sigue la ecuación de continuidad. Esto significa que el producto del área de la sección transversal del flujo y su velocidad promedio a lo largo del canal permanece constante, aunque ambos factores pueden variar. Para calcular la energía total del flujo con respecto a un nivel de referencia, se considera un punto en el fluido donde se combinan la altura, la presión hidrostática (con respecto a la superficie libre) y la velocidad, lo que da como resultado la energía total en función de la altura, la presión, y se determina la velocidad en ese punto [8].

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + h_T \dots\dots\dots(3)$$

- v_1 = Velocidad entrada (m/s)
- v_2 = Velocidad salida (m/s)
- P_1 = Presión entrada (Pa)
- P_2 = Presión salida (Pa)
- z_1 = Elevación en la primera sección
- z_2 = Elevación en la segunda sección
- g = Gravedad (m/s^2)
- γ = Peso específico (N/m^3)
- h_T = Pérdidas totales

F. Fuerzas de arrastre

La fuerza que un fluido en movimiento ejerce sobre un objeto en la dirección del flujo se llama arrastre. El cambio en la dirección del flujo muestra la fuerza de arrastre. Hoy en día, los dispositivos modernos llamados balanzas de resistencia utilizan vigas flexibles con galgas extensiométricas que proporcionan mediciones electrónicas precisas. Aunque generalmente se considera una fuerza indeseable por su asociación con la fricción, en ciertos contextos, la resistencia puede ser positiva porque contribuye a la creación de turbulencias las cuales resultan en una pérdida de energía para el fluido [8].

$$FD = CD \times A \frac{v^2 \rho}{2} \dots\dots\dots(4)$$

- FD = Fuerza de arrastre (N)
- CD = Coeficiente de arrastres
- A = Área frontal (m^2)

$V =$ Velocidad del fluido (m/s)
 $\rho =$ Densidad del fluido (kg/m^3)

G. Separación de flujo

Un fluido se comporta de manera extraña cuando fluye a gran velocidad sobre una superficie curva. A medida que aumenta la pendiente de la superficie, el líquido continúa adhiriéndose fácilmente; sin embargo, si se hunde, puede resultar difícil que se pegue. Cuando la velocidad es lo suficientemente alta, el flujo se separa de la superficie, un fenómeno llamado separación de flujo. Esta separación puede ocurrir en líquidos o gases y depende de factores como el número de Reynolds, la rugosidad de la superficie y las fluctuaciones del flujo libre, aunque su ubicación exacta es difícil de predecir sin cambios abruptos en la superficie [8].

H. Efecto Von Kármán

También conocida como calle de vórtices Von Kármán, es una secuencia de vórtices que se forma cuando un fluido, ya sea líquido o gaseoso, fluye sobre objetos o perfiles poco aerodinámicos con un eje perpendicular a la dirección del movimiento de fluidos. Este fenómeno se caracteriza por la formación de dos cadenas de vórtices detrás del objeto, siendo la rotación de los vórtices en una cadena opuesta a la rotación en la otra. La observación del carril de vórtice se limita a ciertos números de Reynolds, y las dimensiones del carril dependen del tamaño del objeto, con una relación lineal entre el ancho de la calle. y la distancia entre vórtices adyacentes [9].

Como es común en flujos turbulentos, el objeto experimenta resistencia debido a la formación del carril de vórtice, y esta resistencia aumenta a medida que aumenta el ancho del carril. [9]

I. Modelo de turbulencia SST k-omega RC Hellsten

El modelo de turbulencia SST k-omega RC Hellsten, desarrollado por Menter en 1993, es un modelo de viscosidad turbulenta de dos ecuaciones ampliamente utilizado. Combina lo mejor de los enfoques k-omega y k-epsilon, lo que permite su uso en la capa subyacente viscosa sin funciones de amortiguación adicionales y evita la sensibilidad a la turbulencia de entrada. Es eficaz en gradientes de presión adversos y flujos con separación [10].

J. Ecuación de Saint Venant

Las ecuaciones de Saint Venant, formuladas en el siglo XIX por Saint Venant y Boussinesq, son un modelo simplificado para flujos en canales unidimensionales, derivado de las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones surgen al promediar las ecuaciones de Reynolds tridimensionales en la sección transversal del canal, bajo el supuesto de presión hidrostática. Incluyen la ecuación de continuidad y las ecuaciones de momentum, omitiendo la ecuación de energía térmica y la de estado al considerar densidad y temperatura constantes. Así, las ecuaciones de Saint Venant simplifican el modelado de flujos complejos en canales, enfocándose en los efectos más relevantes [11].

K. Mesa de flujo laminar

La mesa de flujo laminar, basado en el aparato de Hele-Shaw, consta de dos hojas de vidrio separadas, permitiendo un flujo laminar bidimensional libre de turbulencias. Incluye tanques de entrada y descarga, sumideros y fuentes configurables, y un sistema de visualización con tinte para analizar patrones de flujo. Puede modelar sistemas físicos que cumplan la Ecuación de Laplace, como flujos de calor bidimensionales o el comportamiento de acuíferos, ofreciendo una aproximación precisa del comportamiento de un fluido ideal [12].

IV. METODOLOGÍA

En la figura 2 se puede apreciar un diagrama de flujo el cual demuestra la secuencia de pasos para poder realizar las simulaciones del presente trabajo.

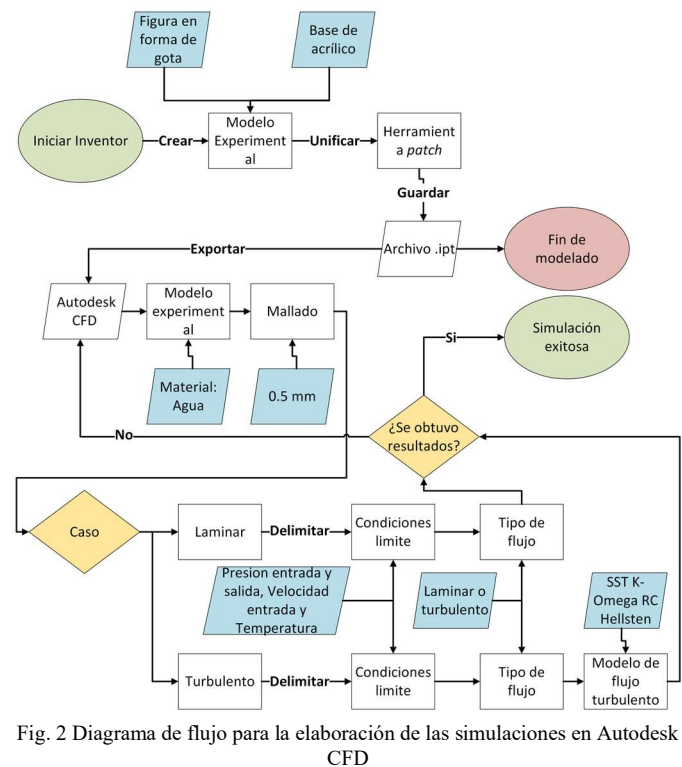


Fig. 2 Diagrama de flujo para la elaboración de las simulaciones en Autodesk CFD

A. Diseño del modelo experimental

El modelo utilizado en este trabajo se diseñó en Autodesk Inventor con base en la geometría de una gota de agua, incorporando figuras geométricas elipsoidales para optimizar la disipación de energía. Las dimensiones específicas del modelo, mostradas en las Figuras 3 y 4, fueron seleccionadas en función de su compatibilidad con las dimensiones de la mesa de flujo laminar y la superficie de prueba.

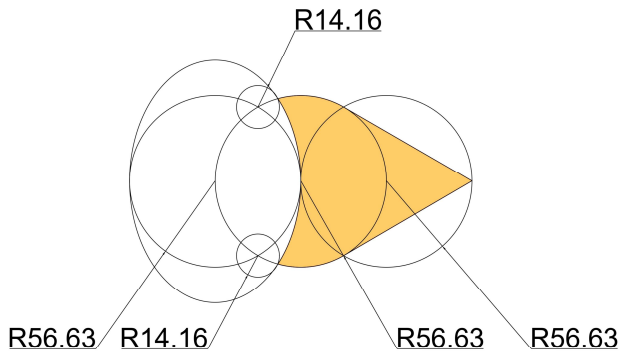


Fig. 3 Dimensiones de las figuras que crean el modelo en mm.

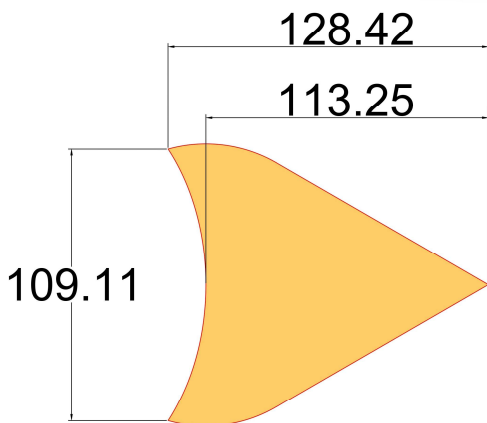


Fig. 4 Dimensiones generales de modelo terminado en mm

Se fabricaron 13 copias del modelo en madera contrachapada con una altura de 18 mm, las cuales se pegaron a una base de acrílico de 750 mm x 495 mm. Este material se eligió por su rigidez y resistencia al agua.

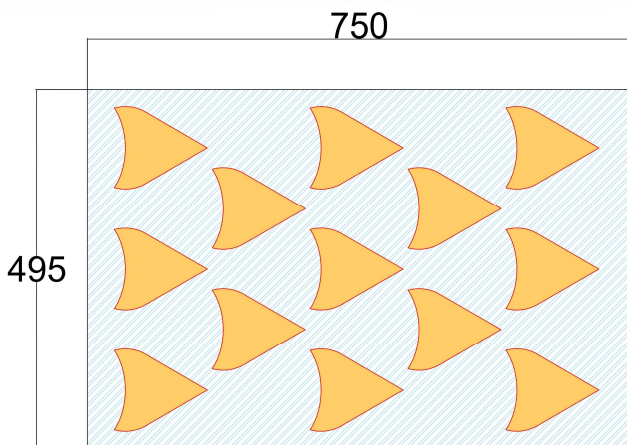


Fig. 5 Modelo posicionado acrílico para su uso en Autodesk CFD

B. Configuración de simulaciones en Autodesk CFD

El modelo diseñado fue integrado en Autodesk CFD utilizando la herramienta patch, la cual integró los modelos individuales a una superficie de las mismas dimensiones con la cual se realizó la experimentación en laboratorio, configurando los 13 modelos como obstáculos dentro de esta.

Para las simulaciones, se definió un mallado con un tamaño de 0.5 mm, buscando un equilibrio entre la precisión de los resultados y el tiempo de procesamiento. Las condiciones de contorno incluyeron una presión de entrada de 30 Pa y una presión de salida de 0 Pa. Además, se empleó el modelo de turbulencia SST k-omega RC Hellsten, seleccionado por su capacidad para manejar flujos con separación y gradientes de presión adversos.

Basándose en enfoques similares de mejora geométrica en estructuras hidráulicas, se planteó la siguiente propuesta. Inspirado en estrategias como las de [13], quienes añadieron apéndices geométricos en escalones para mejorar significativamente la disipación de energía y reducir riesgos de cavitación, este trabajo propone una geometría alternativa basada en la forma de gota como medio de optimización hidráulica.



Fig. 6 Fotografía de modelo elaborado con madera contrachapada

C. Preparación de experimentos en la mesa de flujo laminar

Para las pruebas experimentales, se utilizó una mesa de flujo laminar que permite observar el comportamiento del flujo en condiciones controladas. La superficie acrílica, con los modelos adheridos, se limpió exhaustivamente antes de cada prueba para evitar interferencias en las mediciones.

El flujo de agua se analizó bajo las siguientes condiciones:

- 1) *Flujo laminar*: velocidad controlada para garantizar un número de Reynolds menor a 500.
- 2) *Flujo turbulento*: incremento de velocidad para superar el umbral de transición y observar la generación de vórtices.

D. Relación entre simulaciones y experimentos

Los resultados obtenidos en las simulaciones sirvieron para validar las observaciones experimentales, comparando parámetros clave como velocidades, presiones y la ubicación de las turbulencias. Esta relación permitió identificar las limitaciones de cada metodología y reforzar la comprensión del desempeño del disipador.

V. RESULTADOS

A. Caso con flujo laminar

Se comienza realizando las pruebas experimentales para este caso en la mesa de flujo laminar de esta manera se podrá realizar los cálculos de la velocidad, temperatura y diámetro hidráulico para poder obtener el número de Reynolds correspondiente.

Como se puede ver en la figura 7 vemos la creación de líneas de corriente casi paralelas debido a su condición laminar.

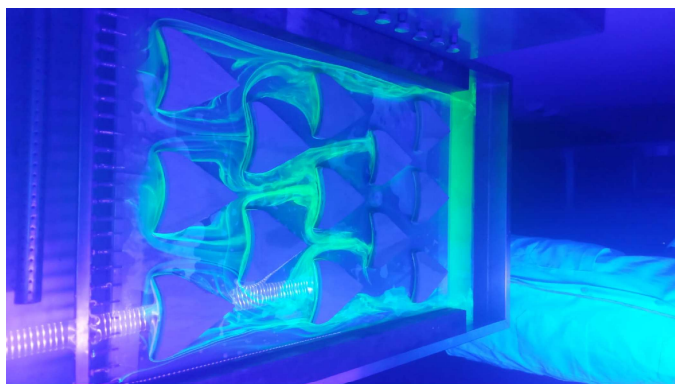


Fig. 7 Proceso de experimentación en mesa de flujo laminar para caso laminar.

Para llegar a obtener los datos del ancho y la altura se toman en cuenta para el ancho la sección interna de la mesa de flujo laminar y para la altura es en base a la altura que llega a alcanzar el agua al momento de fluir por el modelo experimental, luego se procede a hacer los cálculos.

Tabla 1
Diámetro hidráulico para caso laminar

Ancho (m)	Altura (m)	Área de entrada del agua (m ²)	Contorno del área (m)	Diámetro hidráulico
0.495	0.003	0.001485	0.501	0.011856287

Luego para el cálculo de la velocidad se tomó en cuenta el aumento en el nivel del agua que cae en el compartimento del que dispone esta máquina al extremo opuesto de los puntos de descarga, midiendo este aumento cada 0.01 m y contabilizando el tiempo el cual tardaba en llegar a cada marca, se usaron tres temporizadores en paralelo para que cada uno realizara el cálculo del tiempo independientemente y así poder obtener un valor más parejo del cual los tiempos obtenidos se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 2
Tiempo promedio de subida del agua para caso laminar

Altura acumulada (m)	Tiempo A (s)	Tiempo B (s)	Tiempo C (s)	Promedio de tiempo (s)
0.01	36.56	27.20	36.32	33.3600
0.02	27.03	35.74	32.47	31.7467
0.03	35.17	33.77	35.16	34.7000
0.04	34.17	35.44	32.44	34.0167
0.05	34.96	32.39	32.10	33.1500
0.06	32.80	31.92	30.22	31.6467
0.07	32.03	30.27	34.32	32.2067
0.08	29.60	34.35	29.65	31.2000
0.09	26.90	30.10	27.43	28.1433
0.1	27.48	26.64	26.99	27.0367

Además, se realizó el cálculo del área del compartimento en base al ancho y largo del espacio y como altura se tomó en cuenta 0.01 m y en base a ese volumen se podrá obtener el caudal y por consiguiente la velocidad del agua.

Tabla 3
Volumen de agua ingresada

Ancho de compartimento (m)	Largo de compartimento (m)	Altura de agua (m)	Volumen de agua ingresada (m ³)
0.60	0.09	0.01	0.000558

Entonces con los resultados del volumen se podrá obtener el caudal y por consiguiente el valor de la velocidad de entrada del agua cada 0.01 m que al final se tomará un promedio de esta. Para ello se tomará los valores obtenidos del área de entrada del agua, promedio de tiempo y volumen de agua ingresada de las tablas 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 4
Velocidad promedio de entrada de agua para caso laminar

Volumen de agua ingresada (m ³)	Promedio de tiempo (s)	Caudal de entrada (m ³ /s)	Área de entrada de agua (m)	Velocidad de entrada de agua (m/s)
0.000558	33.3600	0.0000167266	0.001485	0.01126
0.000558	31.7467	0.0000175766	0.001485	0.01184
0.000558	34.7000	0.0000160807	0.001485	0.01083
0.000558	34.0167	0.0000164037	0.001485	0.01105
0.000558	33.1500	0.0000168326	0.001485	0.01134
0.000558	31.6467	0.0000176322	0.001485	0.01187
0.000558	32.2067	0.0000173256	0.001485	0.01167
0.000558	31.2000	0.0000178846	0.001485	0.01204
0.000558	28.1433	0.0000198271	0.001485	0.01335
0.000558	27.0367	0.0000206386	0.001485	0.01390
Promedio				0.01191

Finalmente utilizando los datos obtenidos además de hacer el cálculo de la densidad y viscosidad dinámica del agua en base a la temperatura obtenida mediante el uso de un termómetro se podría obtener el valor del número de Reynolds utilizando (2).

Tabla 5
Numero de Reynolds para caso laminar

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)	Viscosidad dinámica (Pa.s)	Diámetro hidráulico	Reynolds
0.01191	19.75	998.62187	0.001026	0.011856287	137.42

Luego se procede a hacer las simulaciones para el caso laminar en el software Autodesk CFD utilizando los valores calculados de velocidad y temperatura. También se tendrá que dejar marcadas las casillas de velocidad, presión, temperatura y vorticidad del submenú de control de cantidad de resultados y marcar el método de cálculo como laminar.

Como se puede observar en la figura 8, en el proceso de recorrer el modelo se crean diferentes puntos de turbulencia, los cuales resultan en puntos de pérdidas de energía, ya que se observa que la velocidad del agua oscila entre 0.01 cm/s a casi 0 cm/s aun luego de fluir entre las figuras del modelo, las cuales, debido a la reducción del área de afluencia, aumentan su velocidad. Esta manera de crear estos puntos de pérdida de energía se debe tanto a las secciones cóncavas, que resultan en una desviación del flujo hacia sus costados, como a la forma de gota que dirige el flujo de manera más concentrada hacia estos puntos cóncavos. Debido a esto, se observa un rango en la velocidad de 0 cm/s a 14.603 cm/s dentro del campo del modelo.

Un comportamiento similar fue reportado en otros estudios basados en simulaciones CFD. De manera similar, [14] comprobaron mediante simulaciones en Autodesk CFD que estructuras bidimensionales inducen alta vorticidad y fricción interna en el flujo, favoreciendo la disipación progresiva de energía en sistemas hidráulicos.

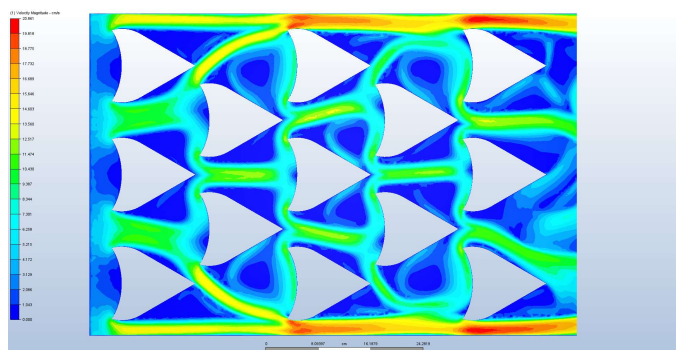


Fig. 8 Distribución de velocidades para caso laminar

En la figura 9 podemos llegar a ver la creación de puntos de presión menores incluso hasta negativos en estos puntos de turbulencia, lo cual es la razón por la cual se están generando las mismas, en estas se observa una caída de presión seccionada

debido al flujo ocasionado por la sección cóncava y esta oscila en un rango de presiones desde 30 Pa, con una reducción de 5 Pa a 10 Pa en cada columna que el agua atraviesa hasta llegar a presiones negativas de hasta -5 Pa.

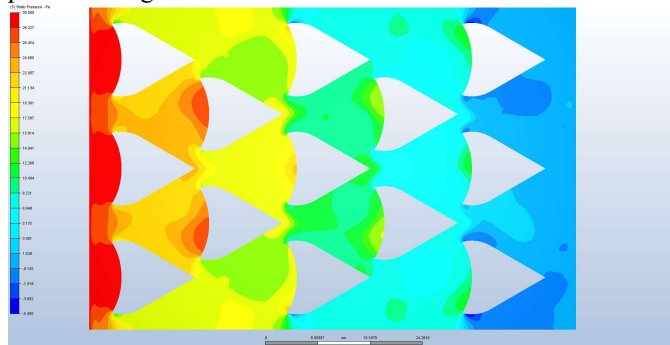


Fig. 9 Distribución de presiones para caso laminar

En la figura 10 podemos observar el vectorizado de la velocidad del fluido, este muestra de manera más clara el recorrido y la turbulencia tan marcada que presenta siempre en la secciones previas a cada parte cóncava de cada figura, además podemos observar que en estas secciones disminuye la velocidad lo cual muestra la pérdida de energía del fluido.

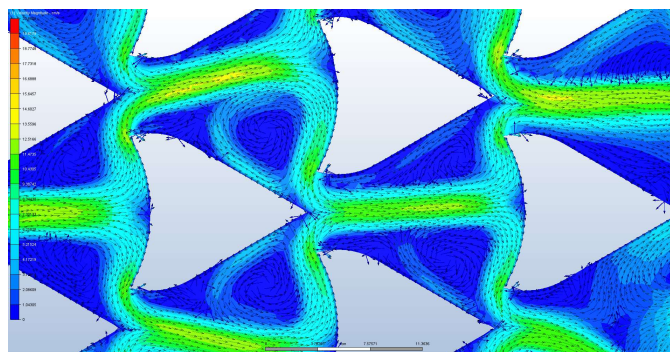


Fig. 10 Vectores de velocidad para caso laminar

B. Caso con flujo turbulento

Así como en el caso laminar, se deberán obtener los valores de la velocidad, la temperatura y el diámetro hidráulico.

Para el caso turbulento se puede llegar a ver de manera más notoria en la figura 11 la presencia de turbulencias más marcadas lo cual denota en pérdidas de energía del fluido.

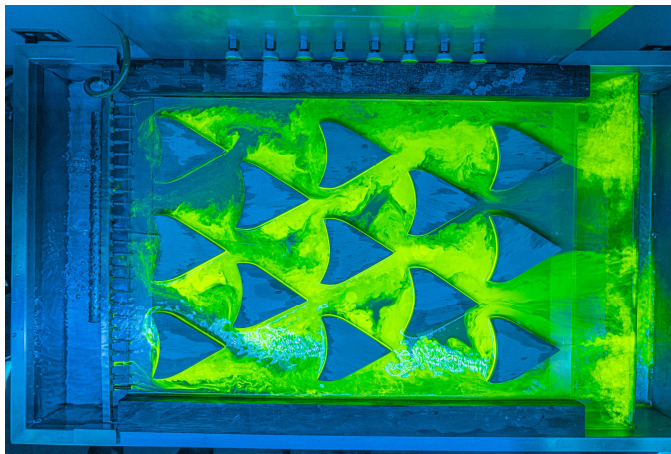


Fig. 11 Proceso de experimentación de mesa de flujo laminar para caso turbulento

Debido al cambio de velocidad del agua el diámetro hidráulico también variara con un cambio de altura del agua el cual se procede a realizar el calculo

Tabla 6
Diámetro hidráulico para caso turbulento

Ancho (m)	Altura (m)	Área de entrada del agua (m ²)	Contorno del área (m)	Diámetro hidráulico
0.495	0.014	0.00693	0.523	0.053001912

Luego para este caso se calculará el nuevo tiempo promedio de ingreso del agua cada 0.01 m igualmente se tomaron tres temporizadores a la par para dar con una velocidad más concisa

Tabla 7
Tiempo promedio de subida del agua para caso turbulento

Altura acumulada (m)	Tiempo A (s)	Tiempo B (s)	Tiempo C (s)	Promedio de tiempo (s)
0.01	4.80	2.48	2.34	3.2067
0.02	2.55	3.00	2.34	2.6300
0.03	3.00	3.20	3.19	3.1300
0.04	3.29	2.65	3.15	3.0300
0.05	2.53	2.78	2.61	2.6400
0.06	2.74	2.41	2.82	2.6567
0.07	2.41	2.51	2.50	2.4733
0.08	2.60	2.53	2.57	2.5667
0.09	2.52	2.61	2.44	2.5233
0.10	2.63	2.50	2.70	2.6100

Luego se procederá a realizar el cálculo de la velocidad de entrada del agua para este caso, para ello se tomará los valores obtenidos del área de volumen de agua ingresada, área de entrada del agua y promedio de tiempo de las tablas 3, 6 y 7 respectivamente.

Tabla 8
Velocidad promedio de entrada del agua para caso turbulento

Volumen de agua ingresada (m ³)	Promedio de tiempo (s)	Caudal de entrada (m ³ /s)	Área de entrada de agua (m)	Velocidad de entrada de agua (m/s)
0.000558	3.2067	0.0001740125	0.00693	0.02511
0.000558	2.6300	0.0002121673	0.00693	0.03062
0.000558	3.1300	0.0001782748	0.00693	0.02573
0.000558	3.0300	0.0001841584	0.00693	0.02657
0.000558	2.6400	0.0002113636	0.00693	0.03050
0.000558	2.6567	0.0002100376	0.00693	0.03031
0.000558	2.4733	0.0002256065	0.00693	0.03256
0.000558	2.5667	0.0002174026	0.00693	0.03137
0.000558	2.5233	0.0002211361	0.00693	0.03191
0.000558	2.6100	0.0002137931	0.00693	0.03085
Promedio				0.02955

Finalmente, se realiza el cálculo del número de Reynolds utilizando (2) y los nuevos valores obtenidos de este caso, tanto la densidad como la viscosidad dinámica del agua son las mismas ya que las pruebas fueron realizadas consecutivamente en un ambiente controlado.

Tabla 9
Numero de Reynolds para caso turbulento

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (Pa.s)	Diámetro hidráulico	Reynolds
0.02955	19.75	998.62187	0.001026	0.053001912	1523.77

Para este caso se volverán a seguir los mismos pasos que en el caso laminar, tan solo que, utilizando los valores respectivos del caso turbulento, marcando la opción de flujo turbulento y seleccionando el modelo de turbulencia SST k-omega RC Hellsten.

Al igual que en este trabajo, otros estudios han analizado configuraciones geométricas enfocadas en mejorar la disipación. De manera similar, [15] analizaron configuraciones de vertederos agrupados mediante simulaciones CFD y validaciones experimentales, observando que estas formas geométricas aumentan la eficiencia de disipación de energía hasta en un 34.68 % en comparación con vertederos planos, reforzando la importancia del diseño en el control del flujo.

Para el siguiente caso se observa en la figura 12 una mayor cantidad de puntos de turbulencia, los cuales generan mayor pérdida de energía de este flujo. Además, se visualiza con más claridad que los puntos de turbulencia se ubican principalmente a los costados de las secciones cóncavas, las cuales se ven reforzadas por las fluyentes generadas por las puntas de las figuras. También se puede observar en los puntos de

desprendimiento, que se ubican en las puntas de los extremos de las secciones cóncavas, pérdidas de energía importantes, las cuales resultan en una caída cercana a 0 cm/s. Como se observó en el caso laminar, se repite esta pérdida de energía en los puntos centrales de cada vértice generado por las turbulencias, lo cual resulta en que la velocidad en todo el modelo oscile entre los 0 cm/s hasta los 19.383 cm/s.

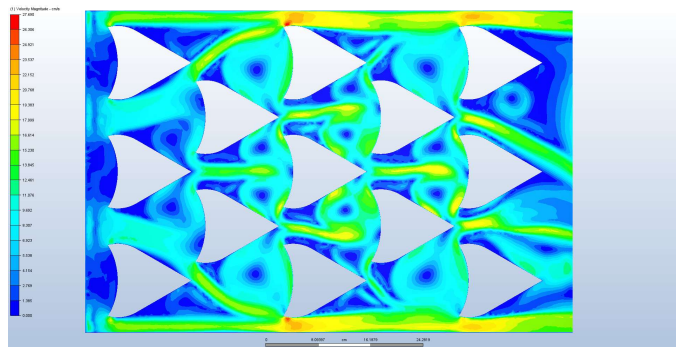


Fig. 12 Distribución de velocidades para caso turbulento.

En la figura 13 se puede llegar a ver una situación ligeramente diferente al caso laminar, ya que el caso anterior presentaba una caída de presión más regular y por secciones, pasando entre cada grupos de dos a tres de estas figuras.

Para el caso turbulento ocurre que las pérdidas de presión más importantes se originan en áreas de turbulencia, que incluso se llega a ver perdidas de presión de hasta 10 Pa en comparación de las zonas que le rodean. Estas a su vez están mostrando el por qué el origen de las turbulencias debido a la caída abrupta de la presión.

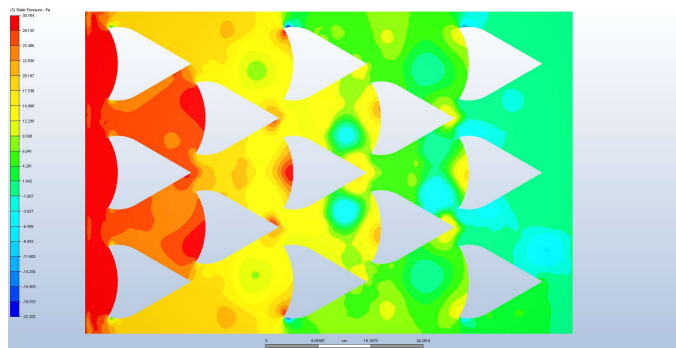


Fig. 13 Distribución de presiones para caso turbulento

En la figura 14 se puede observar de manera más clara el gran aumento de turbulencias generadas, para el caso turbulento debido al aumento de velocidad se presentan de manera más caótica lo cual recae en una gran caída de energía del fluido. Además de que estos vórtices concentran de manera más efectiva el flujo del agua lo que muestra el por qué en estos puntos las velocidad son cercanas a 0 cm/s.

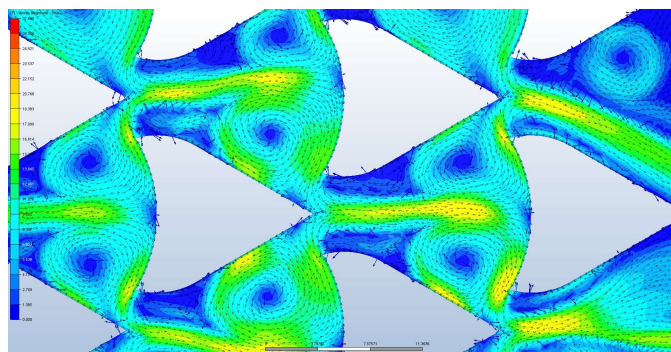


Fig. 14 Vectores de velocidad para caso turbulento.

VI. CONCLUSIONES

El diseño del dissipador de forma de gota mostró un comportamiento eficiente en la reducción de velocidad y generación de recirculaciones dentro del canal. La geometría del modelo favoreció la formación de vórtices en sus zonas cóncavas, contribuyendo a la disipación progresiva de la energía a lo largo de la estructura. Las pruebas experimentales registraron velocidades de hasta 14.60 cm/s en flujo laminar y de 19.38 cm/s en flujo turbulento en los puntos más críticos, confirmando la capacidad del modelo para reducir significativamente la energía cinética.

Las simulaciones numéricas en Autodesk CFD reprodujeron de forma precisa los patrones observados en el experimento, validando la metodología empleada. Esta coincidencia respalda el enfoque utilizado, similar al propuesto por [16], quienes demostraron que pequeñas modificaciones geométricas, como el uso de splitters, pueden incrementar de manera efectiva la disipación energética.

La comparación con investigaciones previas indica que configuraciones geométricas simples, como la forma de gota, pueden alcanzar niveles de eficiencia comparables o superiores a los obtenidos mediante métodos más complejos. Además, se reafirma la importancia de optimizar la geometría para mejorar el desempeño hidráulico.

Finalmente, siguiendo líneas de investigación recientes, como [17], se sugiere validar este diseño en escenarios reales, aplicando el modelo a cauces naturales o estructuras hidráulicas existentes. Esta etapa permitiría confirmar la aplicabilidad de la solución bajo condiciones de flujo variable, topografía natural y eventos extremos, contribuyendo al diseño de obras más resilientes frente a fenómenos climáticos.

REFERENCIAS

- [1] A. A. Lozano-Povis, "Agricultura y cambio climático: principales hallazgos y propuestas para la toma de decisiones en dos regiones naturales del Perú," *South Sustainability*, vol. 4, no. 1, Octubre 2023.
- [2] P. Vargas, El cambio climático y sus efectos en el Perú, Banco Central de Reserva del Perú, Lima, Peru, Tech. Rep. D.T. N°2009-14, 2009.
- [3] R. Pardo, "Disipadores de energía-parte III: estanque amortiguador con pendiente y dissipador de impacto," *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 40, no. 1, pp. 73-83, abril 2019.

- [4] J. A. Mora, Modelación hidrodinámica Bi y Tridimensional de dos canales con disipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería utilizando ANSYS FLUENT, M.S. thesis, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, BOG, Colombia, 2017.
- [5] Trigital, s.f., "¿Qué es Autodesk CFD?," Trigital. [Online]. Available: <https://trigital.es/software/autodesk-cfd/>
- [6] SIMSCALE, 2024 Septiembre 18, "What is CFD Computational Fluid Dynamics," SimScale Documentation. [Online]. Available <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>
- [7] M. G., 2023 Diciembre 4 "¿Qué es Autodesk Inventor y cuáles son sus características principales?," 3D Natives. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/que-es-autodesk-inventor-130620222/#!>
- [8] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*, 2ª ed. México: McGraw Hill, 2012.
- [9] K. Hansen, 2017 Agosto 13, "Two Views of Von Kármán Vortices," Earth Observatory. [Online]. Available: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/90734/two-views-of-von-karman-vortices#:~:text=These%20so-called%20von%20Kármán.cloud%20patterns%20around%20the%20world>
- [10] Autodesk, s.f., "Autodesk CFD Help," Autodesk Documentation. [Online]. Available: <https://help.autodesk.com/view/SCDSE/2024/ENU/?guid=GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC>
- [11] E. Aldrighetti, Computational hydraulic techniques for the Saint Venant Equations in arbitrarily shaped geometry, Ph.D. dissertation, Università degli Studi di Trento, TN, Italy, 2007.
- [12] TecnoEdu, s.f., Banco de flujo laminar Armfield - C10 Arm [Online]. Available: <https://tecnoedu.com/Fluidos/C10Arm.php#:~:text=El%20Banco%20de%20flujo%20laminar%20es%20una%20versi%C3%B3n%20mejorada%20del%20moldeado%20en%20fibra%20de%20vidrio>
- [13] Ghaderi, A.; Abbasi, S. Experimental and Numerical Study of the Effects of Geometric Appendage Elements on Energy Dissipation over Stepped Spillway. *Water* 2021, 13, 957. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w13070957>
- [14] Farooq, U.; Li, S.; Yang, J. Numerical Analysis of Flow Characteristics and Energy Dissipation on Flat and Pooled Stepped Spillways. *Water* 2024, 16, 2600. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w16182600>
- [15] Mikalsen, L.M.; Thorsen, K.H.; Bor, A.; Lia, L. Investigation of Improved Energy Dissipation in Stepped Spillways Applying Bubble Image Velocimetry. *Water* 2024, 16, 2432. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w16172432>
- [16] Díaz Terrones, J.L.; Cornejo Meléndez, J.; Carmona Arteaga, A. Diseño de sólidos bidimensionales para la reducción de velocidades y presiones en recursos hídricos utilizando el software CFD e Inventor. Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, July 17–19, 2024. [Online]. Available: https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/full-papers/Contribution_116_final_a.pdf
- [17] Alejos López, M.S.; Trujillo Torres, C.L.; Carmona Arteaga, A. Estudio de diseño para disipador de energía hidráulica en quebradas utilizando Autodesk CFD. Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, July 17–19, 2024. [Online]. Available: https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/full-papers/Contribution_176_final_a.pdf
- [18] Fabricum PUCP, s.f., "Diseño de canales y pequeñas estructuras hidráulicas." [Online]. Available: <https://fabricum.pucp.edu.pe/capacitate/formacion-continua/disen-de-canales-y-pequenas-estructuras-hidraulicas/>