

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD PROYECTO DE
INVESTIGACIÓN
MODELACIÓN Y ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DE UN VÓRTICE
GRAVITACIONAL MEDIANTE SIMULACIÓN CFD: INFLUENCIA DEL DIÁMETRO Y
DEL ÁNGULO DE ENTRADA SOBRE EL RENDIMIENTO DEL FLUJO



JUAN SEBASTIAN GARAY MORENO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
VILLAVICENCIO

2026

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD PROYECTO DE
INVESTIGACIÓN
MODELACIÓN Y ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DE UN VÓRTICE
GRAVITACIONAL MEDIANTE SIMULACIÓN CFD: INFLUENCIA DEL DIÁMETRO Y
DEL ÁNGULO DE ENTRADA SOBRE EL RENDIMIENTO DEL FLUJO

JUAN SEBASTIAN GARAY MORENO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Mecánico

Asesor

PhD. JOHN JAIR VACA RIOS

Doctor en Ingeniería Mecánica

Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
VILLAVICENCIO

2026

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.

Vicerrector Académico General

P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Juan Francisco CORREA HIGUERA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

P. Diego Fernando SANCHEZ BARRETO, O. P.

Decano de División de Ciencias de Arquitectura e Ingenierías Seccional Villavicencio

Mg. Handel Andrés MARTÍNEZ SARACHE

Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica

Contenido

	Pág.
Resumen	7
Abstract.....	8
Glosario.....	9
Introducción.....	12
Formulación del problema	16
Justificación	18
Objetivos.....	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos.....	20
Alcance	21
Marco de referencia	23
Estado del arte	24
Metodología.....	28
Etapa 1: Revisión bibliográfica y definición de parámetros geométricos.....	29
Matriz de selección de parámetros	30
Etapa 2: Diseño de experimentos (DOE) para la optimización de simulaciones.....	31
Etapa 3: Modelado CAD de geometrías.....	33
Etapa 4: Configuración y ejecución de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD)	34
Análisis de resultados	38
Ecuación de regresión en unidades no codificadas	41
Impactos esperados	45
Conclusiones.....	47
Bibliografía.....	49

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Matriz de toma de decisiones para la selección de parámetros geométricos.....	30
Tabla 2. Sensibilidad de malla.	38
Tabla 3. Velocidad en los diferentes modelos.	41
Tabla 4. Sección resultados.....	46

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Vórtice gravitacional con turbina implementada.	12
Figura 2. Comparativa de dinámica de fluidos: Vórtice optimizado frente a vórtice con cavitación.	15
Figura 3. Diagrama de flujo metodología del proyecto.	28
Figura 4. Geometría planteada del vórtice gravitacional vista lateral (a) y posterior (b).	32
Figura 5. Geometría planteada del vórtice gravitacional en SOLIDWORK.	33
Figura 6. Mallado de la geometría.	34
Figura 7. Mallado de la geometría vista posterior.	34
Figura 8. Condición de frontera.	37
Figura 9. Contorno de fases (a) y la interfaz (b).	40
Figura 10. Contorno de velocidad.	40
Figura 11. Gráfica de superficie de respuesta.	43
Figura 12. Optimización del resultado de RV.	44

Resumen

El proyecto aborda la simulación de vórtices gravitacionales en sistemas hidráulicos, un fenómeno de alta complejidad que combina principios de hidrodinámica, mecánica de fluidos y efectos gravitacionales. Estos vórtices resultan determinantes en el diseño y operación de infraestructuras como presas, canales y redes de drenaje, por lo que su estudio es clave para asegurar tanto la seguridad estructural como la sostenibilidad ambiental. A través de herramientas avanzadas de simulación computacional, se analizó la influencia de la geometría de los vórtices sobre variables fundamentales, entre ellas la velocidad del flujo y su eficiencia. El propósito central es profundizar en la comprensión de su comportamiento y proponer estrategias eficaces para su control y mitigación, con miras a optimizar el desempeño de las obras hidráulicas y reducir los riesgos asociados. La investigación permitió comprender que la velocidad del vórtice puede alcanzar valores hasta cinco veces superiores a la velocidad de entrada gracias a la configuración geométrica optimizada. La combinación de un diámetro de 18 cm y un ángulo de 140° permitió obtener velocidades significativamente mayores en comparación con la velocidad de entrada del fluido. Este incremento resalta la eficacia del diseño optimizado para mejorar el desempeño del sistema hidráulico.

Palabras Clave: Vórtice gravitacional, simulación, CFD, geometría.

Abstract

The project addresses the simulation of gravitational vortices in hydraulic systems, a highly complex phenomenon that combines principles of hydrodynamics, fluid mechanics, and gravitational effects. These vortices are crucial in the design and operation of infrastructure such as dams, canals, and drainage networks, making their study key to ensuring both structural safety and environmental sustainability. Using advanced computational simulation tools, the influence of vortex geometry on fundamental variables, including flow velocity and efficiency, was analyzed. The central purpose is to deepen the understanding of their behavior and propose effective strategies for their control and mitigation, with the aim of optimizing the performance of hydraulic structures and reducing associated risks. The research revealed that the vortex velocity can reach values up to five times higher than the inlet velocity thanks to the optimized geometric configuration. The combination of an 18 cm diameter and a 140° angle resulted in significantly higher velocities compared to the fluid inlet velocity. This increase highlights the effectiveness of the optimized design in improving the hydraulic system's performance.

Key Word- Gravitational vortex, simulation, CFD, geometry.

Glosario

Ángulo de entrada: Parámetro geométrico que define la dirección con la que el flujo ingresa tangencialmente a la cámara del vórtice. Su variación influye en la intensidad de la rotación, la estabilidad del flujo y el rendimiento hidráulico del sistema.

ANSYS Fluent: Software especializado en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizado para simular el comportamiento de fluidos, la transferencia de calor y otros fenómenos físicos mediante métodos numéricos.

Canal hidráulico: Estructura diseñada para conducir el flujo de agua desde la entrada del sistema hasta la cámara de formación del vórtice.

Cámara de vórtice: Recipiente de geometría generalmente circular o cónica donde el flujo adquiere un movimiento rotacional debido a la acción conjunta de la gravedad y la configuración geométrica del sistema.

Condiciones de contorno: Conjunto de parámetros físicos y matemáticos definidos en los límites del dominio computacional, como velocidad de entrada, presión de salida y propiedades del fluido, necesarios para resolver las ecuaciones del flujo.

Convergencia: Estado alcanzado durante una simulación numérica cuando las ecuaciones gobernantes satisfacen un criterio de error suficientemente pequeño y las variables de interés presentan estabilidad entre iteraciones consecutivas.

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD): Rama de la mecánica de fluidos que emplea métodos numéricos y algoritmos computacionales para analizar y predecir el comportamiento de fluidos mediante la resolución de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía.

Diseño de Experimentos (DOE): Metodología estadística utilizada para planificar, ejecutar y analizar experimentos de manera sistemática, permitiendo evaluar la influencia de uno o varios factores sobre una o más variables de respuesta.

Diámetro del desagüe: Diámetro del orificio ubicado en la parte inferior de la cámara del vórtice, por donde se evacúa el agua. Este parámetro influye directamente en la velocidad del flujo y en la estabilidad del vórtice.

Eficiencia hidráulica: Relación entre la energía hidráulica disponible y la energía efectivamente aprovechada por un sistema, expresando el desempeño del proceso de conversión de energía.

Estado estacionario (Steady-State): Condición de una simulación en la que las variables del flujo permanecen constantes en el tiempo, aunque puedan variar espacialmente.

Interfaz aire-agua: Superficie que separa las fases de aire y agua dentro del dominio de simulación. Su correcta representación es fundamental para el análisis de vórtices de superficie libre.

Mallado (Malla computacional): Discretización del dominio de estudio en un conjunto de elementos finitos o volúmenes de control sobre los cuales se resuelven las ecuaciones del flujo.

Método de Volúmenes Finitos (FVM): Técnica numérica utilizada para discretizar y resolver las ecuaciones de conservación en CFD, garantizando el balance de masa, cantidad de movimiento y energía en cada volumen de control.

Microgeneración hidroeléctrica: Producción de energía eléctrica mediante sistemas hidráulicos de pequeña potencia, generalmente inferiores a 100 kW, destinados al abastecimiento de comunidades aisladas o aplicaciones locales.

Modelo de turbulencia k - ϵ : Modelo matemático basado en dos ecuaciones de transporte que describe el comportamiento promedio de la turbulencia mediante la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ϵ). Es ampliamente utilizado en simulaciones de ingeniería por su equilibrio entre precisión y costo computacional.

Núcleo de aire: Región central del vórtice donde se forma una columna de aire debido a la disminución de presión generada por la rotación del flujo.

Optimización geométrica: Proceso de evaluación y ajuste de los parámetros dimensionales de un sistema con el fin de mejorar su desempeño hidráulico o energético.

Régimen turbulento: Estado del flujo caracterizado por fluctuaciones aleatorias de velocidad y presión, con mezcla intensa del fluido y alta disipación de energía.

Simulación numérica: Representación computacional de un fenómeno físico mediante modelos matemáticos y métodos numéricos para analizar su comportamiento sin necesidad de realizar ensayos experimentales.

Superficie de respuesta: Modelo matemático obtenido mediante el Diseño de Experimentos (DOE) que describe la relación entre las variables de diseño y la respuesta del sistema, facilitando la identificación de condiciones óptimas.

Turbina de vórtice gravitacional: Dispositivo hidroeléctrico que aprovecha la energía cinética y potencial de un vórtice de superficie libre para convertirla en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica.

Velocidad tangencial: Componente de la velocidad del fluido perpendicular al radio de giro del vórtice. Es uno de los principales indicadores del rendimiento hidrodinámico del sistema.

VOF (Volume of Fluid): Método numérico empleado en CFD para modelar flujos multifásicos mediante el seguimiento de la fracción volumétrica de cada fase, permitiendo representar la interfaz entre el aire y el agua.

Vórtice gravitacional: Movimiento rotacional del agua generado por la acción de la gravedad y la geometría de la cámara hidráulica, caracterizado por la formación de un núcleo de aire y un flujo helicoidal hacia el desagüe.

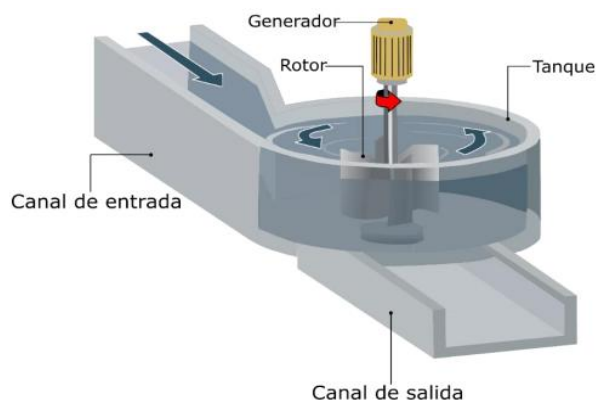
Introducción

La simulación de vórtices gravitacionales en sistemas hidráulicos constituye un ámbito de investigación multidisciplinario que articula fundamentos de hidrodinámica y mecánica de fluidos con la acción de la gravedad. Este fenómeno aparece en múltiples aplicaciones de la ingeniería hidráulica, tales como el diseño de presas, canales de derivación, sistemas de drenaje, captaciones para bombeo y estructuras destinadas al aprovechamiento energético (Velásquez et al. 2023).

Las turbinas de vórtice gravitacional constituyen una alternativa dentro de la generación hidroeléctrica, capaz de convertir la energía potencial y cinética de un flujo rotacional en energía mecánica, tal como se muestra en la Figura 1. Este tipo de sistema explota la fuerza centrífuga y el momento angular del fluido, los cuales son inducidos de manera controlada dentro de una cámara de flujo, permitiendo su operación incluso con alturas de caída reducidas.

El fenómeno involucrado, denominado vórtice de superficie libre, se origina a partir de la interacción entre la configuración geométrica del canal de entrada y la acción de la gravedad. Cuando el agua ingresa tangencialmente a una cámara de geometría circular o cónica, la aceleración gravitacional provoca su desplazamiento hacia un orificio central. Este proceso incrementa la velocidad del flujo y genera un gradiente de presión que mantiene el movimiento helicoidal del fluido, condición necesaria para accionar el rodete (Maika et al., 2023).

Figura 1. *Vórtice gravitacional con turbina implementada.*



Nota. Tomado de: Petrovic, (2014).

La incorporación de este sistema a una turbina permite aprovechar la energía disponible en corrientes de agua de baja altura y caudal, constituyéndose en una alternativa para la generación

de energía hidroeléctrica a pequeña escala. Los sistemas de turbinas hidráulicas de vórtice gravitacional han sido estudiados como una tecnología renovable de bajo impacto y con potencial de aplicación en comunidades rurales y zonas con acceso limitado a la red eléctrica (Maika et al., 2023). Además, su funcionamiento aprovecha la energía potencial y cinética del agua mediante la formación de un vórtice gravitacional, permitiendo generar electricidad sin requerir grandes alturas hidráulicas (Velásquez et al., 2023).

En los últimos años, diversos investigadores han estudiado el comportamiento hidráulico y el desempeño de las turbinas de vórtice gravitacional mediante herramientas de simulación numérica y validación experimental. (Faraji et al. 2022) analizaron el desempeño de un rodete para una central de generación mediante vórtice gravitacional, empleando simulaciones CFD en ANSYS CFX y metodología de superficie de respuesta. Los autores evaluaron parámetros como la velocidad de giro, el ángulo de las palas, el número de álabes y el perfil del rodete, encontrando que la modificación de estos parámetros influye directamente en la eficiencia del sistema. Además, los resultados numéricos presentaron una buena concordancia con los resultados experimentales, demostrando la utilidad de las herramientas CFD para el proceso de optimización de este tipo de turbinas.

De manera similar, (Velásquez et al. 2022) estudiaron la optimización de la cuenca y del canal de entrada de una turbina hidráulica de vórtice gravitacional mediante la metodología de superficie de respuesta. Para el análisis numérico emplearon un modelo de volumen de fluido (VoF), un régimen transitorio y el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ RNG. Los resultados demostraron que las características geométricas de la cuenca y del canal de entrada tienen una influencia significativa sobre la circulación del flujo y, por consiguiente, sobre el desempeño de la turbina. Este estudio evidencia la importancia de optimizar no solamente el rodete, sino también los elementos hidráulicos encargados de generar y desarrollar el vórtice.

Por otra parte, (Edirisinghe et al. 2022) investigaron el mejoramiento del desempeño de una turbina de vórtice gravitacional mediante simulaciones de flujo en ANSYS CFX. El estudio fue validado utilizando resultados experimentales y posteriormente se analizaron diferentes configuraciones de las palas del rodete, considerando variables como la inclinación, la altura, el giro vertical y la curvatura horizontal. Los resultados permitieron establecer la relación existente entre el comportamiento del flujo, los campos de presión y velocidad y el desempeño de la turbina,

demostrando el potencial de la simulación CFD como herramienta para optimizar el diseño de sistemas de generación hidroeléctrica de muy baja caída.

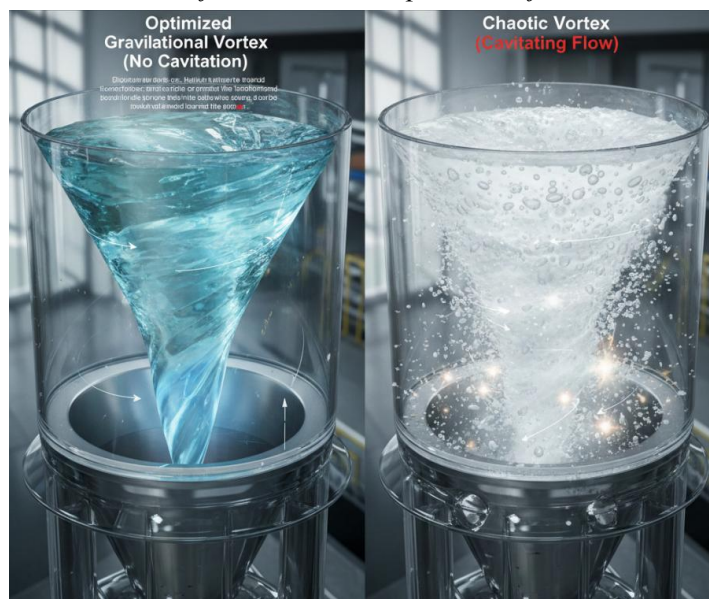
En el contexto colombiano, (Velásquez et al. 2023) analizaron la implementación de una turbina hidráulica de vórtice de agua gravitacional y su potencial para la generación hidroeléctrica. Los autores destacan esta tecnología como una alternativa para el aprovechamiento de recursos hídricos mediante pequeñas centrales hidroeléctricas, particularmente en condiciones de baja caída. El estudio resulta especialmente relevante para investigaciones desarrolladas en Colombia, debido a que relaciona la tecnología de vórtice gravitacional con las características del potencial hidroeléctrico y las necesidades de generación de energía a pequeña escala en el país.

Más recientemente, (Velásquez et al. 2024) realizaron una optimización numérica y una validación experimental del rodete de una turbina hidráulica de vórtice gravitacional con canal de entrada en espiral y cuenca cónica. Mediante simulaciones CFD y metodología de superficie de respuesta, analizaron variables relacionadas con la posición del rodete, el número de álabes y la relación entre el diámetro del rodete y el diámetro de la cuenca. El diseño optimizado alcanzó una eficiencia de 65,18 %, cuyos resultados fueron posteriormente verificados experimentalmente. Este estudio demuestra que la optimización conjunta de la geometría del rodete y las condiciones hidráulicas permite mejorar considerablemente el rendimiento de las turbinas de vórtice gravitacional.

El entendimiento detallado de los vórtices gravitacionales hidráulicos resulta esencial para el diseño y la operación segura de infraestructuras como presas, canales, tuberías y sistemas de drenaje (Maika et al. 2023; Zheng et al. 2023). Asimismo, estos fenómenos conllevan implicaciones relevantes en términos de seguridad y sostenibilidad ambiental. El estudio demostró que la formación de vórtices en tomas hidroeléctricas puede reducir la eficiencia hidráulica, por lo que su análisis es fundamental para optimizar el diseño y la operación de estas estructuras (Maika et al. 2023).

En este sentido, la optimización geométrica y el manejo eficiente de los vórtices, apoyados en herramientas de simulación, permiten mitigar problemas como la cavitación en bombas y turbinas mediante el control del arrastre de aire. Igualmente, contribuyen a reducir vibraciones estructurales, limitar la erosión localizada y evitar la acumulación de sedimentos en zonas críticas, mejorando así el desempeño y la confiabilidad de las estructuras hidráulicas (Valencia, 2017).

Figura 2. *Comparativa de dinámica de fluidos: Vórtice optimizado frente a vórtice con cavitación.*



Nota. Tomado de: Valencia (2017).

La figura 2 muestra cómo un diseño geométrico adecuado puede transformar un flujo potencialmente perjudicial en un recurso eficiente. Mientras que un vórtice desordenado genera cavitación y vibraciones que deterioran la estructura, un vórtice optimizado mediante simulación presenta un flujo estable, con control del aire en su núcleo, lo que protege los componentes internos. Esto evidencia la relevancia de definir con precisión la geometría, ya que actúa como un mecanismo natural de filtrado de detritos y estabilización de presión, prolongando la vida útil de la infraestructura.

La optimización de la geometría resulta esencial para asegurar una formación de flujo uniforme y una velocidad tangencial adecuada en la zona de entrada de la turbina. Esto contribuye a maximizar la eficiencia de conversión del sistema, al reducir efectos no deseados como la aireación excesiva en el núcleo o la aparición de corrientes recirculantes que disminuyen el rendimiento mecánico y pueden generar vibraciones estructurales (Zheng et al. 2023).

En contextos académicos e industriales, es común el empleo de plataformas de simulación multifásica como ANSYS Workbench, debido a su capacidad para abordar de manera eficiente flujos con superficie libre. En particular, los módulos Fluent y CFX son ampliamente utilizados en la literatura técnica gracias a la implementación del método de Volumen de Fluido (VOF), fundamental para representar con precisión la interfaz aire-agua y la formación del núcleo de aire característico en los vórtices gravitacionales (Wanchat et al., 2013; Nishi et al., 2020).

En consecuencia, el presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento hidrodinámico de un vórtice gravitacional a partir de la variación de parámetros geométricos, tales como el diámetro del desagüe y el ángulo de entrada. Para ello, se utilizará la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) mediante ANSYS Fluent, implementando el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ y el método Volume of Fluid (VOF). La metodología propuesta combina revisión bibliográfica, Diseño de Experimentos (DOE) y simulación numérica, con el fin de identificar la influencia de los parámetros analizados sobre las características del flujo y aportar al entendimiento de este fenómeno hidráulico.

Para el desarrollo del proyecto se empleó herramientas de simulación basadas en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), con el fin de modelar la formación, evolución y comportamiento de los vórtices en función de su geometría. En particular, se evaluó cómo variables como la velocidad del flujo y el rendimiento hidrodinámico se ven afectadas por parámetros geométricos como el diámetro y el ángulo del vórtice.

En este contexto, el presente trabajo se centra en analizar de qué manera las variaciones del ángulo de entrada y el diámetro de salida del vórtice inciden sobre variables determinantes como la velocidad del flujo y su eficiencia hidrodinámica.

Formulación del problema

La creciente demanda global de energía, impulsada por el desarrollo socioeconómico y el aumento demográfico, y la necesidad de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero para combatir el cambio climático, han catalizado una búsqueda intensiva y urgente de fuentes de energía renovable y sostenible, (Cheema, T. A., et al. 2025).

A pesar de las ventajas de la energía hidráulica como fuente limpia y renovable, su implementación plena enfrenta desafíos significativos, especialmente al integrar tecnologías innovadoras a pequeña escala, como las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). En el contexto colombiano, estas limitaciones técnicas y logísticas se ven reflejadas en la cobertura energética nacional, la cual aún presenta disparidades críticas. Por ejemplo, en diversos sectores del departamento del Meta, persisten poblaciones con un acceso limitado o nulo a un suministro eléctrico fiable (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018).

Bajo este escenario, la tecnología de turbinas de vórtice gravitacional surge como una alternativa prometedora para la electrificación rural. A diferencia de los sistemas convencionales, esta tecnología basa su eficiencia en el aprovechamiento del caudal del recurso hídrico, utilizando el movimiento rotacional del agua inducido por diferencias de velocidad y presión para generar energía. Este enfoque resulta especialmente adecuado para zonas de bajas alturas de caída, donde el volumen de agua disponible es el factor determinante para la generación (Singh & Maity, 2021).

Por su parte, Asuero (2014), indica que la optimización del diseño y la operación de una turbina de vórtice gravitacional requiere una comprensión precisa de la dinámica del fluido, esto implica la cuidadosa selección de parámetros clave como la geometría del orificio de salida, la forma de la estructura del vórtice y las condiciones de entrada del flujo, el diámetro y ángulo de entrada de la cámara de paso; la comprensión detallada de la dinámica del vórtice gravitacional es, por tanto, crucial para el diseño y la operación eficiente de la turbina.

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera la optimización del diámetro y el ángulo de entrada de la cámara de paso influye en la eficiencia energética y en el incremento de la velocidad del flujo en un sistema de vórtice gravitacional?

Justificación

La optimización del diseño geométrico en las estructuras de paso y el rotor de las turbinas de vórtice gravitacional es un factor determinante para maximizar la captura de energía cinética y mejorar la eficiencia técnica en proyectos de pequeña escala (Alfonso, 2020). A pesar de la existencia de literatura técnica global sobre esta tecnología, su implementación en contextos regionales se ha visto limitada por la falta de modelos experimentales validados que adapten estos principios a las condiciones hidrodinámicas locales. En este sentido, el presente estudio analiza el comportamiento del flujo y los parámetros de diseño específicos, buscando establecer una base técnica que facilite la viabilidad y eficiencia de este tipo de soluciones para el aprovechamiento de las energías renovables.

La energía hidráulica se consolida como una fuente renovable estratégica, no solo por su capacidad de generación, sino por su baja producción de emisiones de gases de efecto invernadero significativamente más bajas que los combustibles fósiles. Bajo esta premisa, su naturaleza no combustiva permite que esta tecnología contribuya de forma directa y sustancial a la reducción de la contaminación atmosférica, alineándose con los objetivos globales de mitigación del cambio climático, (Programa ONU para el Desarrollo, 2018).

Más allá de la capacidad para impactar positivamente en las comunidades locales mediante la provisión de acceso a energía confiable y la mejora de infraestructuras básicas, la simulación avanzada y el estudio detallado de una turbina de vórtice gravitacional representan una oportunidad para el avance del conocimiento científico y tecnológico (Hussani, 2016). Los modelos predictivos de alta precisión para flujos complejos con superficie libre, la calibración y validación empírica de modelos de simulación constituyen un aporte técnico y metodológico de gran importancia para la comunidad científica y de ingeniería.

Los sistemas de generación por vórtice gravitacional representan una tecnología emergente y menos explorada en comparación con otras fuentes renovables. El uso de simulaciones computacionales resulta fundamental para optimizar el diseño de las estructuras de captación y cámaras de rotación, permitiendo mejorar la eficiencia hidráulica y prevenir fallas estructurales derivadas de la interacción fluodinámica (Valencia, 2017). La relevancia de este proyecto radica en la aplicación de herramientas de ingeniería avanzada para el análisis de fenómenos

hidrodinámicos específicos, lo cual fortalece la línea de investigación en energías alternativas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomas sede Villavicencio.

Desde la ingeniería mecánica, este estudio sobre el comportamiento hidráulico de los vórtices constituye una fase de investigación aplicada fundamental para el contexto del Meta, el proyecto aporta el sustento científico necesario para el diseño de micro-centrales hidroeléctricas adaptadas a la geografía regional. Esta validación técnica se alinea con el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima), al proponer una alternativa de generación de bajo impacto ambiental. Aunque la implementación de estas soluciones depende de la articulación con planes de desarrollo departamental, este estudio de pregrado establece los parámetros de eficiencia y viabilidad mecánica que permitirían a futuro una transferencia tecnológica efectiva hacia poblaciones rurales y remotas, facilitando así el camino técnico hacia el cierre de brechas.

Objetivos

Objetivo general

Analizar mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) el comportamiento hidrodinámico de un vórtice gravitacional, comparando la influencia de distintas configuraciones de diámetro y ángulo de entrada en la formación y estabilidad del mismo, para determinar la relación entre la geometría del canal y la velocidad tangencial del fluido.

Objetivos específicos

- I.** Definir las dimensiones geométricas y condiciones de contorno de la cámara de formación del vórtice, basándose en el estado del arte para su posterior modelado computacional.
- II.** Realizar un diseño de experimentos DOE teniendo como variables de entrada los factores de diseño de diámetro y ángulo del vórtice gravitacional y su impacto en la velocidad de flujo como variable de salida.
- III.** Simular numéricamente el canal hidráulico, utilizando el Método de Volúmenes Finitos y el modelo de turbulencia k-épsilon en el software ANSYS Fluent.
- IV.** Identificar la configuración más eficiente en términos de velocidad y estabilidad del flujo en el vórtice.

Alcance

El presente proyecto tiene como alcance el análisis del comportamiento hidrodinámico de un vórtice gravitacional mediante herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), con el propósito de evaluar la influencia de parámetros geométricos sobre el desempeño del sistema. La investigación se desarrollará a partir de un enfoque de simulación numérica, empleando el software ANSYS Fluent para modelar el flujo multifásico agua-aire mediante el método de Volúmenes Finitos (FVM), el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ y el método *Volume of Fluid* (VOF), el cual permite representar la interfaz entre ambos fluidos y la formación del núcleo de aire característico de los vórtices gravitacionales.

El estudio comprenderá el diseño y modelado tridimensional de una cámara de vórtice gravitacional con geometría basada en criterios reportados en la literatura científica. Posteriormente, se definirán las condiciones de contorno, las propiedades del fluido, la estrategia de mallado y los parámetros numéricos necesarios para garantizar la estabilidad y convergencia de las simulaciones. Asimismo, se realizará un estudio de independencia de malla con el fin de asegurar que los resultados obtenidos no dependan del tamaño de los elementos utilizados en la discretización del dominio computacional.

Como parte de la metodología, se implementará un Diseño de Experimentos (DOE) que permitirá evaluar de forma sistemática la influencia del diámetro del desagüe y del ángulo de entrada sobre variables de respuesta como la velocidad tangencial y la estabilidad del flujo. Los casos de estudio serán definidos dentro de rangos establecidos a partir de la revisión bibliográfica y serán analizados mediante simulaciones independientes. Los resultados obtenidos permitirán identificar tendencias, comparar el comportamiento hidráulico de las diferentes configuraciones geométricas y determinar aquella que presente el mejor desempeño hidrodinámico.

El proyecto se limitará al análisis numérico del fenómeno, por lo que no contempla la construcción de prototipos físicos ni la validación experimental mediante ensayos de laboratorio.

Como producto final, se obtendrá un modelo computacional capaz de representar el comportamiento del vórtice gravitacional bajo diferentes configuraciones geométricas, acompañado del análisis de los campos de velocidad, distribución de presiones, formación del vórtice y estabilidad del flujo. Además, se determinará la configuración geométrica que proporcione las mejores condiciones hidrodinámicas dentro del rango evaluado, generando

información técnica que pueda servir como base para futuras investigaciones orientadas al diseño, optimización y desarrollo de sistemas de generación hidroeléctrica de baja potencia mediante vórtices gravitacionales.

Marco de referencia

Las turbinas de vórtice gravitacional representan una tecnología hidroeléctrica que transforma la energía cinética y potencial de un flujo rotacional en energía mecánica como se ilustra en la Figura 1. Este sistema aprovecha la fuerza centrífuga y el momento angular del fluido generado artificialmente dentro de una cámara de paso, requiriendo para su funcionamiento una altura de caída mínima. La formación de este fenómeno, conocido como vórtice de superficie libre, ocurre mediante la interacción entre la geometría del canal de entrada y la aceleración gravitacional. Al ingresar el agua de manera tangencial a una cámara circular o cónica, la gravedad induce un descenso del fluido hacia un orificio central, lo que acelera el flujo y crea un gradiente de presión que sostiene el movimiento helicoidal necesario para accionar el rodete (Maika, 2023).

La integración de este sistema con una turbina es clave para el aprovechamiento de fuentes renovables, dado que permite una generación de energía constante aprovechando el ciclo hidrológico. A diferencia de las tecnologías basadas en combustibles fósiles, este proceso de conversión electromecánica no genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), posicionándose como una alternativa de bajo impacto ambiental al utilizar el agua como fluido de trabajo (Power, 2016).

No obstante, para maximizar el rendimiento hidráulico y energético de estos sistemas, es indispensable comprender con precisión la dinámica del flujo que da origen al vórtice. El análisis del comportamiento del agua dentro del canal y su interacción con la geometría del sistema requiere herramientas matemáticas capaces de describir el movimiento de los fluidos y predecir variables como la velocidad, la presión y la turbulencia. En este contexto, la mecánica de fluidos proporciona los fundamentos teóricos necesarios para el modelado y la simulación de estos fenómenos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento del flujo de fluidos. Estas ecuaciones constituyen la base de la mecánica de fluidos y se utilizan para modelar fenómenos que abarcan desde el flujo de aire alrededor de aeronaves hasta el movimiento de los océanos y la atmósfera terrestre. Se derivan de los principios fundamentales de conservación de la masa, el momento y la energía, e incluyen principalmente la ecuación de conservación de la masa y la ecuación de conservación del momento (Smith, 2016).

En el caso de fluidos incompresibles (donde la densidad es constante), el sistema se simplifica significativamente. Bajo esta condición, se prescinde de la ley de conservación de la energía para la resolución del campo de velocidades, ya que el acoplamiento térmico no afecta la dinámica del movimiento

El sistema se configurará bajo un régimen estacionario, asumiendo que el flujo alcanza un estado estable tras un periodo de desarrollo. Asimismo, se activará la gravedad con un valor de 9.81 m/s^2 en la dirección vertical correspondiente (eje -Y o -Z, según la orientación del modelo). También se establecerán parámetros de referencia, como la presión y la temperatura, y se verificará el sistema de coordenadas tridimensional (X, Y, Z) para una correcta interpretación de los resultados.

En cuanto a los modelos físicos, se empleará el modelo multifásico de Volumen de Fluido (VOF), el cual permite representar la interfaz aire-agua mediante la resolución de la fracción volumétrica en cada celda, facilitando la reconstrucción de la superficie libre y la dinámica del vórtice, incluida la formación de la depresión central.

Estado del arte

Las investigaciones recientes sobre los sistemas de vórtice gravitacional hidráulico se han centrado primordialmente en la optimización de la geometría de la estructura de paso (canal de entrada y cuenca) para maximizar la transferencia de energía hacia el rodete de la turbina, especialmente en aplicaciones de micro-generación de baja caída entre otras como separadores tipo ciclón, cámaras de mezclado y vórtices para intercambio de calor (Singh & Maity, 2021; Cheema, T. A., et al. 2025)

A diferencia de estudios previos realizados mayoritariamente en ANSYS CFX, las tendencias actuales en dinámica de fluidos computacional (CFD) y en especial las herramientas utilizadas en la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio han validado el uso de Ansys Fluent para caracterizar con mayor precisión la interfaz aire-agua mediante el modelo de Volumen de Fluido (VOF). Estos estudios buscan comprender el comportamiento hidrodinámico detallado, analizando parámetros como los perfiles de velocidad (tangencial, axial y radial), la distribución de la energía cinética turbulenta y la estabilidad del núcleo del vórtice.

La optimización geométrica es fundamental para garantizar una formación de flujo coherente y una velocidad tangencial óptima en la zona de admisión de la turbina. Esto permite maximizar la eficiencia de conversión del sistema, minimizando fenómenos indeseables como la aireación excesiva del núcleo o la formación de flujos recirculantes que degradan el rendimiento mecánico y pueden inducir vibraciones estructurales (Muñoz & Arteaga, 2018).

Para llevar a cabo estas investigaciones, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como la metodología predominante frente a los métodos puramente analíticos o experimentales a gran escala. Su eficiencia radica en la capacidad de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), permitiendo una visualización detallada de la estructura interna del flujo que sería costosa o técnicamente compleja de instrumentar en un laboratorio (Khan et al., 2022). Aunque el análisis experimental sigue siendo el estándar de validación, la CFD permite realizar barridos paramétricos de geometría en tiempos significativamente menores.

En el ámbito académico e industrial, el uso de plataformas de simulación multifásica como ANSYS Workbench es recurrente debido a su robustez en el manejo de flujos con superficie libre. Específicamente, los módulos Fluent y CFX son seleccionados en la literatura técnica por su implementación del método de Volumen de Fluido (VOF), el cual es esencial para modelar con precisión la interfase aire-agua y la formación del núcleo de aire característica de los vórtices gravitacionales (Wanchat et al., 2013; Nishi et al., 2020).

Las simulaciones de flujos rotacionales bajo efectos gravitatorios poseen una amplia gama de aplicaciones en diversas áreas de la ingeniería (Rizwan, H. M. et al., 2022, 2024). En el ámbito de la hidráulica, el estudio de estos fenómenos es crucial para el diseño y la optimización de infraestructuras, tales como presas, vertederos, sistemas de captación y canales. En estos contextos, el control preciso de la geometría de la estructura permite gestionar la formación de vórtices para prevenir fenómenos adversos como la cavitación, la vibración estructural o la erosión localizada (Novak et al., 2018).

Asimismo, el análisis de la interacción entre la estructura y el vórtice gravitacional facilita la evaluación de riesgos de inundación en cuencas hidrográficas (Al-Hussaini et al., 2016). Desde una perspectiva de transporte de masa, la configuración geométrica de los cursos de agua o de los sistemas de tratamiento influye directamente en los patrones de sedimentación y en el transporte de sólidos, permitiendo un manejo más eficiente de los depósitos en plantas de tratamiento.

Guevara, (2019) estudia el efecto del diámetro de salida en un tanque cónico en la eficiencia de una Turbina de Vórtice Gravitacional para pico-generación", tuvo como objetivo evaluar el efecto del diámetro del orificio de salida en la eficiencia hidráulica de una turbina de vórtice gravitacional mediante simulación computacional. La metodología incluyó la variación del diámetro de salida en un modelo CAD y simulaciones realizadas con el módulo CFX de ANSYS. Entre sus hallazgos, se determinó que un mayor diámetro de salida favorece una formación más robusta del vórtice gravitacional, lo cual es crucial para evitar fluidos de recirculación que generan pérdidas hidráulicas, subrayando la importancia de la geometría de salida en la optimización de la eficiencia del vórtice.

Patiño, (2014) realizó un estudio del comportamiento hidráulico de un flujo a través de un sistema de vórtice gravitacional utilizando técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), y cuyo trabajo tuvo como objetivo analizar el flujo en un vórtice gravitacional a escala reducida mediante simulación computacional en ANSYS CFX. Su investigación validó un proceso para la simulación de sistemas con superficie libre y régimen transitorio. Al comparar los resultados numéricos con mediciones de un modelo físico real, se determinó que el modelo de turbulencia BSL EARSM mostraba una convergencia más rápida que el modelo k-epsilon, lo que es una consideración importante para la selección del modelo de turbulencia en CFD. Guo, M., et. al., (2024) estudiaron aplicaciones de vórtice gravitacional en la industria química y ambiental usando herramientas de dinámica de fluidos computacional.

Guo. M., et.al., (2024) hicieron una revisión sobre el análisis integral de los avances en el desarrollo de separadores ciclónicos gas-partícula desde distintas perspectivas. Examinaron las ventajas y desventajas de diseños innovadores según su impacto en el rendimiento, y propusieron orientaciones para su aplicación práctica. Su estudio también compara ciclones diseñados con distintos métodos, manteniendo la misma área de entrada para garantizar igual caudal volumétrico y velocidad de ingreso. Los resultados evidencian diferencias significativas en sus dimensiones y describen los patrones de flujo interno, aportando criterios para modificar la geometría y mejorar la eficiencia de separación.

Velasquez (2021), aborda el desarrollo y la optimización de plantas de energía hidroeléctrica de vórtices de agua gravitacionales. El estudio incluye discusiones sobre el diseño de las palas de la turbina, la geometría de la cuenca y el análisis del rendimiento del sistema para

mejorar la eficiencia y efectividad de esta tecnología, este trabajo refuerza la premisa central de la importancia de la optimización geométrica

Dentro del análisis de antecedentes, el estudio de Muñoz y Arteaga (2018) constituye la base técnica más relevante para esta investigación donde se estudian perfiles de velocidad en sistema de flujo a superficie libre con un vórtice rotacional hidráulico, debido a su enfoque específico en sistemas de flujo a superficie libre mediante canales de vórtice. A diferencia de otros estudios centrados únicamente en la cuenca, este trabajo integra la dinámica del canal de alimentación con la formación del vórtice; su aporte principal radica en la validación experimental de los perfiles de velocidad, un componente crítico para asegurar que el modelo computacional en Ansys Fluent represente fielmente la realidad física.

Si bien los antecedentes demuestran avances significativos en el estudio de los flujos rotacionales, existe una brecha crítica en la optimización geométrica paramétrica de la cámara de generación de vórtices, específicamente en la relación entre el diámetro del orificio de descarga y el ángulo de deflexión del canal de entrada. Gran parte de la literatura actual prioriza el rendimiento mecánico del rodete de la turbina, omitiendo un análisis sistemático de cómo la configuración de la estructura de paso condiciona la estabilidad y la energía cinética del vórtice antes del contacto con el álabe.

El presente proyecto busca cerrar este vacío técnico mediante el uso de Ansys Fluent para identificar la configuración geométrica que maximice el potencial hidráulico disponible. Esta validación numérica es un primer paso fundamental para la transferencia tecnológica en regiones con topografía de llanura y pie de monte, como el Departamento del Meta. En esta región, la abundancia de fuentes hídricas de baja caída y caudales constantes representa un escenario ideal para la implementación de sistemas de micro-generación que no requieran grandes embalses, alineándose con las necesidades de electrificación rural dispersa identificadas en los planes de desarrollo regional.

Metodología

Definidos los objetivos de la investigación, se plantea una metodología basada en simulación numérica para analizar el comportamiento hidrodinámico de un vórtice gravitacional. El estudio adopta un enfoque exploratorio-descriptivo con componente predictivo, utilizando herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y Diseño de Experimentos (DOE).

La investigación se centra en evaluar la influencia de parámetros geométricos, como el diámetro del desagüe y el ángulo de entrada, sobre las características del flujo.

Con el propósito de responder a la pregunta de investigación y alcanzar los objetivos propuestos, se ha planteado una metodología rigurosa y sistemática organizada en cuatro etapas consecutivas e interrelacionadas. Cada fase aborda un componente esencial del proceso investigativo, desde la conceptualización inicial y la definición de parámetros, hasta la ejecución de simulaciones y el análisis de resultados. La implementación ordenada de estas etapas permitirá optimizar la geometría del vórtice gravitacional mediante simulaciones CFD, garantizando resultados sólidos y consistentes. Las etapas consideradas son:

1. Revisión de la literatura y definición de parámetros geométricos
2. Diseño de experimentos (DOE) orientado a la optimización de las simulaciones
3. Modelado CAD de las geometrías propuestas
4. Configuración y ejecución de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Figura 3. Diagrama de flujo metodología del proyecto.



Etapas 1: Revisión bibliográfica y definición de parámetros geométricos

En esta primera etapa se realizó una revisión de literatura científica y técnica relacionada con el comportamiento hidrodinámico de los vórtices gravitacionales y con la influencia de sus características geométricas sobre el desempeño del flujo. El propósito de esta revisión fue identificar las configuraciones geométricas empleadas en investigaciones anteriores, así como establecer los parámetros que presentan mayor relevancia para la formación, estabilidad y comportamiento hidrodinámico del vórtice.

La literatura especializada evidencia que el comportamiento de un vórtice gravitacional depende de diferentes parámetros geométricos de la cuenca y del canal de entrada. Velásquez, Posada-Montoya y Chica (2022), mediante simulaciones CFD y Metodología de Superficie de Respuesta (RSM), analizaron simultáneamente seis factores geométricos: la relación entre el diámetro del desagüe y el diámetro de la cuenca (d/D), la relación entre la altura y el diámetro de la cuenca (h/D), el ancho del canal de entrada (w/D), la altura del canal (h/D), la longitud del canal (L/D) y el ángulo de envolvente (γ). Los autores utilizaron como variable de respuesta la circulación del vórtice y determinaron una configuración geométrica que permitió maximizar dicha respuesta.

De manera complementaria, investigaciones posteriores han continuado utilizando estas relaciones geométricas para estudiar la optimización de los vórtices gravitacionales. Velásquez, Posada-Montoya y Chica (2023) emplearon un modelo sustituto para optimización multiobjetivo considerando nuevamente (H/D), (L/D), (h/D), (w/D), (d/D) y γ , teniendo como objetivos maximizar la intensidad del vórtice y minimizar el caudal.

A partir de estos antecedentes, se estableció que la selección de las variables de estudio debía considerar no solamente su presencia en investigaciones anteriores, sino también su relación directa con los objetivos planteados en el presente trabajo. En consecuencia, se analizaron diferentes características geométricas y variables de respuesta con el propósito de determinar cuáles debían mantenerse constantes y cuáles serían utilizadas como factores de entrada en el diseño experimental.

Matriz de selección de parámetros

Para fortalecer el proceso de selección se elaboró una matriz de toma de decisiones. Esta matriz permitió comparar los parámetros geométricos identificados en la revisión bibliográfica mediante criterios relacionados con su relevancia hidrodinámica, presencia en investigaciones anteriores, posibilidad de modificación geométrica y pertinencia respecto al objetivo específico de la investigación.

Se empleó una escala de valoración de **1 a 5**, donde:

- **1:** muy baja relevancia.
- **2:** baja relevancia.
- **3:** relevancia media.
- **4:** alta relevancia.
- **5:** muy alta relevancia.

Los pesos asignados a los criterios corresponden a una ponderación metodológica establecida para este estudio y no representan valores determinados directamente por las fuentes bibliográficas.

Tabla 1. Matriz de toma de decisiones para la selección de parámetros geométricos.

Parámetro	Relevancia hidrodinámica (30 %)	Evidencia en literatura (25 %)	Influencia sobre el vórtice (25 %)	Facilidad de parametrización CFD (20 %)	Puntaje ponderado	Decisión
Diámetro del desagüe (d/D)	5	5	5	5	5	Factor DOE
Ángulo de entrada (θ)	5	4	5	5	4,75	Factor DOE
Altura de la cuenca (H/D)	4	5	5	4	4,5	Constante
Ancho del canal (w/D)	4	5	4	4	4,25	Constante
Altura del canal (h/D)	4	5	4	4	4,25	Constante
Longitud del canal (L/D)	3	5	4	4	3,9	Constante
Ángulo de envolvente (γ)	3	5	4	3	3,8	Constante

La matriz permitió identificar el diámetro relativo del desagüe (d/D) como uno de los parámetros de mayor importancia. Esta selección es consistente con Velásquez et al. (2022), quienes incluyeron (d/D) entre los seis factores utilizados en la optimización mediante RSM y demostraron su influencia sobre la circulación del vórtice.

De igual manera, se seleccionó el ángulo de entrada del canal como segundo factor de estudio, debido a que la configuración del ingreso del flujo constituye un elemento fundamental para establecer las condiciones iniciales del movimiento rotacional. Esta selección permite concentrar el análisis en la influencia conjunta de una variable asociada directamente con la salida del flujo —el diámetro del desagüe— y una variable asociada con las condiciones de entrada.

Los demás parámetros geométricos identificados en la literatura, como (H/D), (w/D), (h/D), (L/D) y (γ), fueron considerados como parámetros controlados en el presente estudio. Esta decisión permite reducir el número de factores del diseño experimental y concentrar el análisis estadístico en las dos variables definidas como objeto principal de investigación.

Esta estrategia resulta coherente con investigaciones que han utilizado metodologías de optimización para estudiar simultáneamente múltiples parámetros geométricos. En particular, Velásquez et al. (2022) demostraron la utilidad de RSM para determinar configuraciones óptimas de un vórtice gravitacional, mientras que Velásquez et al. (2023) ampliaron el análisis mediante optimización multiobjetivo.

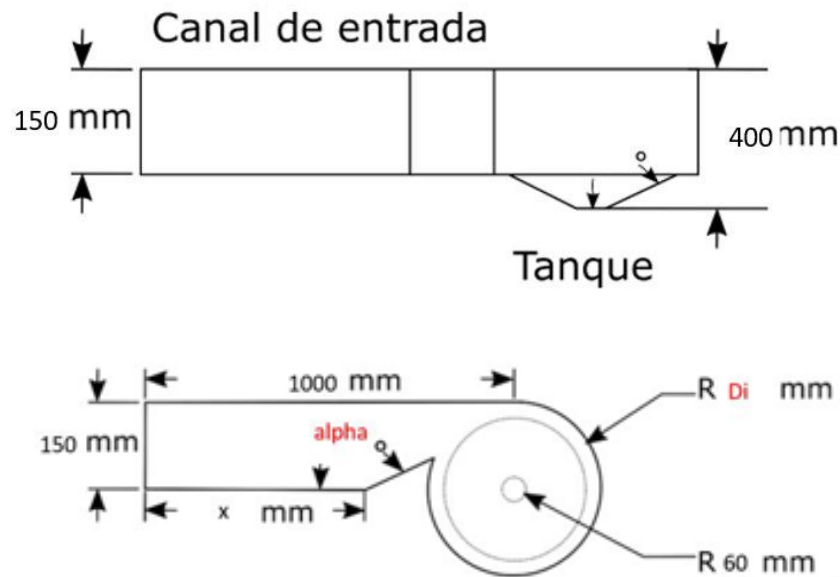
Etapla 2: Diseño de experimentos (DOE) para la optimización de simulaciones

A partir de la geometría base definida en la Etapa 1, se desarrolló un Diseño de Experimentos (DOE) utilizando técnicas de muestreo estadístico como el Diseño Central Compuesto (CCD) o el diseño Box-Behnken. Este enfoque permitirá establecer de forma sistemática las distintas combinaciones de los parámetros geométricos —diámetro y ángulo— que fueron evaluadas en las simulaciones. Una vez ejecutados los modelos CFD y recopilados los resultados, se aplicará la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) con el fin de construir un modelo matemático que facilite la interpolación de los datos, el análisis de las interacciones entre variables y la identificación de las condiciones óptimas que maximicen el desempeño hidrodinámico.

Para la aplicación y el análisis de la RSM se empleó el software estadístico Minitab, el cual permitió generar diseños experimentales específicos, como el Diseño Central Compuesto (DCC) y el diseño Box-Behnken, adecuados para modelar respuestas con comportamiento curvo y determinar condiciones óptimas. Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones CFD, se llevó a cabo un Análisis de Varianza (ANOVA) que permitió evaluar la relevancia estadística de los factores geométricos considerados —diámetro y ángulo del vórtice— sobre la variable de respuesta, en este caso la velocidad de salida. Finalmente, se desarrollaron modelos matemáticos y superficies de respuesta que facilitaron la identificación de la configuración geométrica más eficiente para optimizar el rendimiento hidrodinámico del sistema.

Las configuraciones geométricas seleccionadas fueron evaluadas mediante un análisis comparativo, con el fin de identificar las condiciones más favorables para la formación y estabilidad del vórtice, así como su relación con las velocidades de entrada del flujo.

Figura 4. Geometría planteada del vórtice gravitacional vista lateral (a) y posterior (b).



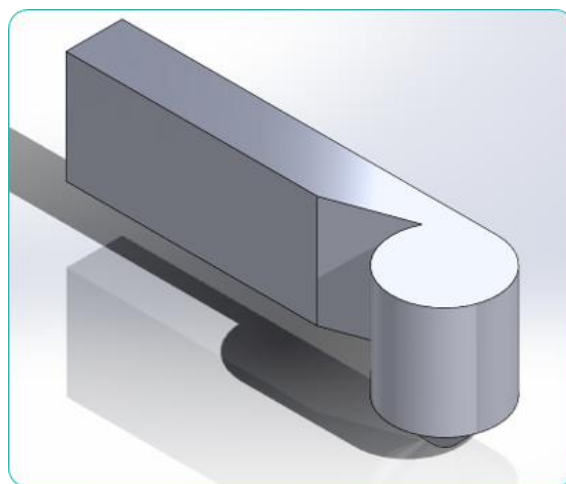
(a)

(b)

Etapla 3: Modelado CAD de geometrías

Una vez definidas las configuraciones geométricas en la Etapa 2, se procedió a su representación tridimensional mediante el software SolidWorks. Esta herramienta se selecciona por su capacidad para trabajar con modelos paramétricos, lo que permite ajustar con precisión las variables asociadas al vórtice. Los modelos fueron desarrollados conforme a los requerimientos del análisis dinámico y posteriormente exportados en formatos estándar como STEP o IGES, asegurando su compatibilidad con el entorno de preprocesamiento de ANSYS.

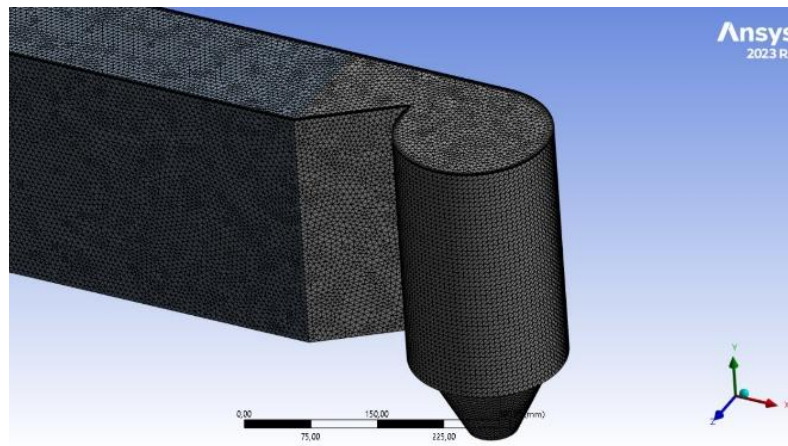
Figura 5. *Geometría planteada del vórtice gravitacional en SOLIDWORK.*



Posteriormente, las geometrías fueron importadas en ANSYS Fluent, donde se inició la etapa de preprocesamiento mediante la generación del mallado computacional. Considerando que la calidad y resolución de la malla influyen directamente en la convergencia de la solución numérica, se realizó un estudio de independencia de malla con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

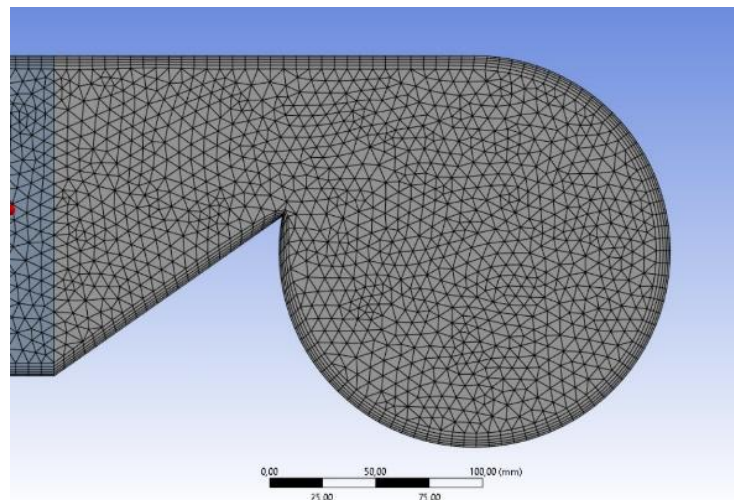
Este análisis permitió validar el modelo al evidenciar que variables clave —como la velocidad máxima o la profundidad del vórtice— se mantienen estables frente a refinamientos adicionales de la malla. Para ello, se evaluarán distintas densidades de discretización mediante herramientas como el Índice de Convergencia de malla (GCI) o el análisis del error relativo, asegurando que los fenómenos complejos en regiones con altos gradientes sean representados adecuadamente por la física del modelo y no como consecuencia de la discretización espacial.

Figura 6. *Mallado de la geometría.*



Nota: Mallado tridimensional de la geometría del vórtice

Figura 7. *Mallado de la geometría vista posterior.*



Etapas 4: Configuración y ejecución de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD)

Una vez generadas las distintas densidades de malla en la Etapa 3, se procedió a verificar la independencia de malla mediante la comparación de una variable escalar de interés —como la velocidad tangencial máxima— entre los diferentes niveles de refinamiento. Se considerará que la independencia ha sido alcanzada cuando la variación porcentual entre una malla y otra más

refinada sea inferior a un umbral establecido (generalmente menor al 2%), garantizando así que la solución numérica no esté influenciada por el tamaño de los elementos.

Seleccionada la malla óptima, se continuó con la configuración detallada del modelo en ANSYS Fluent. Esta fase incluye la elección de los modelos físicos que describen el comportamiento del flujo —en particular, el modelo de turbulencia y el modelo de interacción entre fases—, la definición de las propiedades del fluido, la asignación de condiciones de contorno (entradas, salidas y paredes), y el ajuste de los parámetros del solucionador para asegurar la adecuada convergencia de las ecuaciones de Navier-Stokes.

El comportamiento hidrodinámico del vórtice gravitacional se modela mediante las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes), las cuales describen la conservación de la masa y del momento para flujos turbulentos. Estas ecuaciones constituyen la base de los modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) empleados en ANSYS Fluent.:

1. Conservación de la Masa (Ecuación de Continuidad): Debido a la incompresibilidad, esta se reduce a que la divergencia de la velocidad es cero
2. Conservación del Momento: Que describe cómo las fuerzas (presión, viscosidad y gravedad) aceleran el fluido.

Ecuación de conservación de la masa (o continuidad):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Donde:

- ρ es la densidad del flujo.
- u es el vector de velocidad del flujo.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i}) \quad (2)$$

Ecuación. (2) representa la conservación del momento en el flujo del fluido. Donde, P representa la presión y μ viscosidad del fluido.

El sistema se configuró bajo un régimen estacionario, asumiendo que el flujo alcanza un estado estable tras un periodo de desarrollo. Asimismo, se activó la gravedad con un valor de 9.81 m/s² en la dirección vertical correspondiente (eje -Y o -Z, según la orientación del modelo).

También se establecerán parámetros de referencia, como la presión y la temperatura, y se verificará el sistema de coordenadas tridimensional (X, Y, Z) para una correcta interpretación de los resultados.

En cuanto a los modelos físicos, se empleará el modelo multifásico de Volumen de Fluido (VOF), el cual permite representar la interfaz aire-agua mediante la resolución de la fracción volumétrica en cada celda, facilitando la reconstrucción de la superficie libre y la dinámica del vórtice, incluida la formación de la depresión central.

Sanaguano (2016) asegura los resultados reportados, el flujo experimenta una etapa transitoria caracterizada por turbulencia inicial que tiende a estabilizarse alrededor de los 3 segundos. Este comportamiento resulta clave para el presente estudio, ya que permite establecer los tiempos de simulación adecuados en Ansys Fluent con el fin de alcanzar un régimen de flujo coherente. A diferencia de dicho antecedente, que empleó CFX, en esta investigación se propone utilizar Fluent para mejorar la representación de la interfaz aire-agua mediante el modelo de Volumen de Fluido (VOF).

Adicionalmente, se utilizó el modelo de turbulencia k-epsilon en su versión estándar, adecuado para describir flujos complejos con separación y recirculación, ya que permite estimar tanto la energía cinética turbulenta (k) como su tasa de disipación (ϵ).

Modelo de turbulencia k-epsilon (k- ϵ): Debido al carácter altamente turbulento del flujo de agua en un vórtice de alta velocidad, se adoptó la versión estándar del modelo k-epsilon. Este modelo, basado en dos ecuaciones, permite estimar tanto la energía cinética turbulenta (k) como su tasa de disipación (ϵ). Su aplicación resulta apropiada para la simulación de flujos complejos que presentan fenómenos de separación y recirculación, como ocurre en los vórtices gravitacionales Ferziger y Perić (2002).

$$\frac{\partial}{\partial t}(Pk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (3)$$

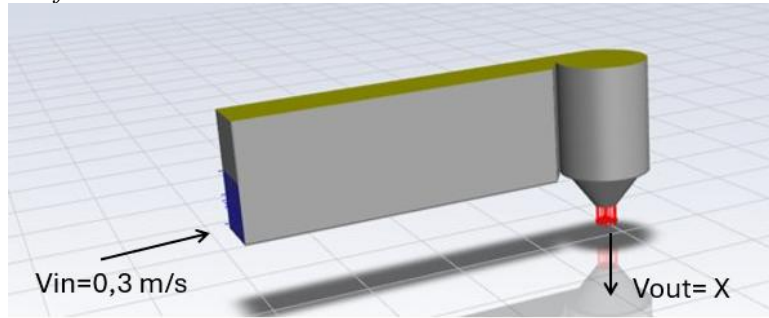
Ecuación. (3), donde k es la energía cinética turbulenta, el valor de $\sigma_k = 1$ y S_k es el término fuente, se utiliza para calcular la transferencia de energía cinética turbulenta en el campo de flujo de la modelización de turbulencias.

$$\frac{\partial}{\partial t}(P\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + S_\varepsilon \quad (4)$$

Para el cálculo del transporte de la tasa de disipación turbulenta durante el flujo, se utiliza la ecuación (5). Donde ε representa la tasa de disipación y S_ε es el término fuente. Aquí, σ_ε es la constante y su valor se toma como $\sigma_\varepsilon = 1,3$ a partir de una correlación empírica.

Las condiciones de contorno, fundamentales en cualquier simulación CFD, se definieron con base en la literatura y en las características típicas de los vórtices gravitacionales. Para la configuración inicial, se consideró una velocidad de entrada de 0.3 m/s con un nivel de turbulencia del 5%, empleando agua como fluido de trabajo a presión atmosférica.

Figura 8. Condición de frontera.



Finalmente, con todos los parámetros definidos, se ejecutó la simulación en ANSYS Fluent, resolviendo de manera iterativa las ecuaciones discretizadas de Navier-Stokes junto con las ecuaciones asociadas a los modelos de turbulencia y multifásico. Para garantizar la convergencia, se realizó un seguimiento continuo de los residuales de variables como continuidad, momento, energía cinética turbulenta (k), tasa de disipación (ε) y fracción de volumen. Se estableció un criterio de convergencia adecuado, fijando inicialmente un máximo de 600 iteraciones como referencia.

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos a partir del proyecto de simulación de vórtices gravitacionales hidráulicos proporcionan una comprensión más profunda del fenómeno analizado, considerando los parámetros definidos para la geometría del sistema. Dichos resultados permiten evaluar de qué manera las variaciones en las características geométricas influyen en el comportamiento del vórtice y en la dinámica del flujo del fluido.

Tabla 2. *Sensibilidad de malla.*

Tamaño de los elementos de la malla (mm)	Elementos de malla	Flujo masico (kg/s)	Velocidad tangencial (m/s)
4	2159300	6.7322	2.6274
5	1264900	6.7343	2.6162
5.5	1005000	6.7201	2.6127
6	807280	6.6967	2.6033
6.5	688620	6.7156	2.6156
7	585580	6.7522	6.6232

El estudio de independencia de malla muestra que las variables de interés (flujo másico y velocidad) en la región de salida del fluido presentan variaciones muy pequeñas al refinar o engrosar la malla. La velocidad oscila únicamente entre 2.6033 m/s y 2.6274 m/s, lo que representa una diferencia aproximada del 0.9 %, mientras que el flujo másico varía menos del 1 % entre los diferentes tamaños de elemento.

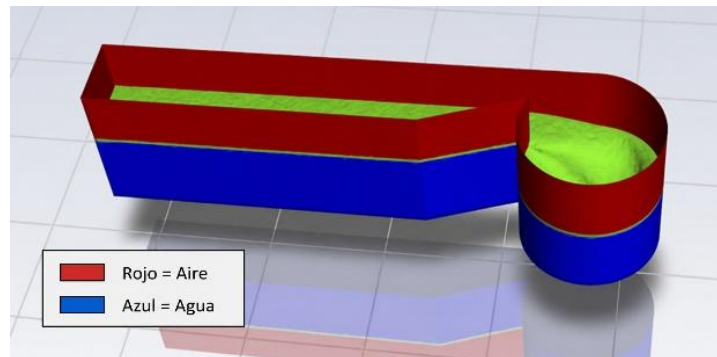
Aunque la malla de 4 mm proporciona la mayor resolución espacial, requiere aproximadamente 2.16 millones de elementos, incrementando significativamente el tiempo de cálculo y los recursos computacionales. Por otro lado, la malla de 6 mm reduce el número de elementos a 8.07×10^5 , es decir, cerca de un 63 % menos elementos que la malla de 4 mm, manteniendo resultados muy similares para las variables analizadas.

Por lo tanto, se seleccionó la malla de 6 mm porque los resultados ya muestran una tendencia prácticamente independiente de la malla, ofreciendo una precisión adecuada con un costo computacional considerablemente menor. Esto permite obtener simulaciones confiables sin incurrir en tiempos de cálculo excesivos.

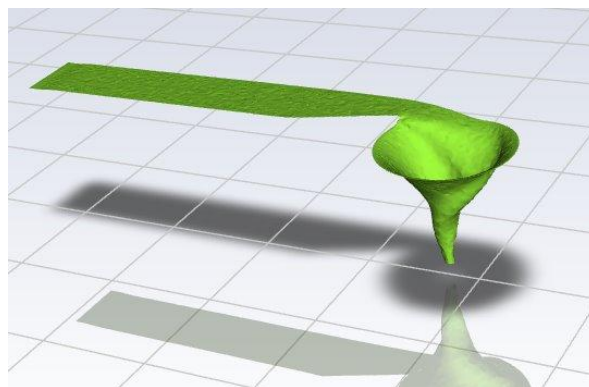
En cuanto a la caracterización dinámica del vórtice, se obtuvieron datos de velocidad y contorno de fases de la formación, evolución y estructura de los vórtices gravitacionales presentes en el sistema hidráulico analizado.

Asimismo, se realizó un análisis visual de los contornos del fluido, considerando tanto el contorno de fases como el contorno de velocidad. El contorno de fases, mostrado en la Figura 9, permite observar la distribución y transición entre las distintas fases del fluido, aportando una visual detallada sobre la interfaz presente entre fluidos inmiscibles, así mismo se muestra la capa limite como un visual donde se separa el agua del aire.

Figura 9. *Contorno de fases (a) y la interfaz (b).*



(a)

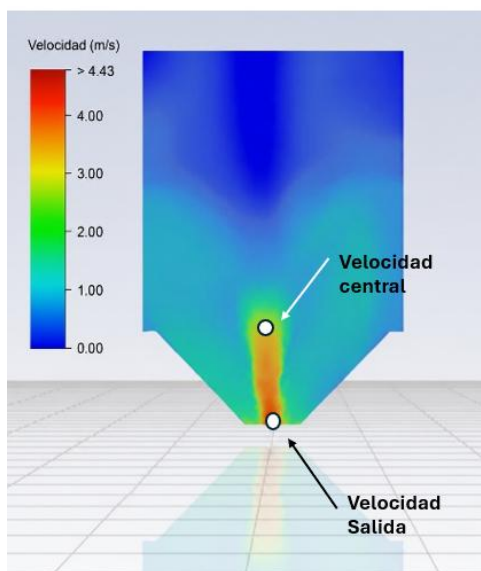


(b)

Por su parte, el contorno de velocidad del agua, presentado en la Figura 10, evidencia la variación de la velocidad dentro del sistema, identificando regiones de alta y baja velocidad que resultan fundamentales para comprender la dinámica del flujo y su interacción con los vórtices,

donde se evidencia que la región de alta velocidad es la zona que se va aproximando a la salida del vórtice por lo cual es más evidente el cambio de color hacia rojo.

Figura 10. *Contorno de velocidad.*



Para la construcción de la posterior superficie de respuesta, se efectuaron mediciones de las velocidades relativas (RV) considerando las velocidades máximas registradas en el vórtice y las velocidades de entrada del flujo. Estas mediciones fueron procesadas mediante el software Minitab, el cual facilitó el análisis estadístico y la elaboración de modelos de superficie de respuesta variando el diámetro de salida (D_i) y ángulo de entrada (α) (tabla 3).

Los intervalos de estudio para el diámetro de salida (18–29 mm) y el ángulo de entrada (123° – 166°) se definieron con base en la revisión bibliográfica y en las características geométricas del modelo de vórtice gravitacional desarrollado. Estos rangos fueron seleccionados porque permiten evaluar un amplio espectro de configuraciones capaces de modificar significativamente la intensidad del vórtice, la distribución de velocidades y el rendimiento hidráulico del sistema, manteniendo al mismo tiempo condiciones de operación estables y físicamente viables.

Una vez establecidos los límites de cada variable independiente, se empleó la metodología de superficie de respuesta, el cual generó automáticamente los puntos experimentales requeridos para construir el modelo matemático y analizar los efectos individuales y de interacción entre el diámetro de salida y el ángulo de entrada.

Tabla 3. *Velocidad en los diferentes modelos.*

Modelos superficie de respuesta: Diámetro salida (mm) / ángulo de entrada (°)	Velocidad Central (m/s)	Velocidad Salida (m/s)
18 / 145	1.33	4.43
20 / 130	1.35	4.5
20 / 160	1.29	4.3
24 / 123	1.17	3.9
24 / 145	1.3	4.3
24 / 166	1.25	4.16
28 / 130	1.13	3.7
28 / 160	1.14	3.8
29 / 145	1.1	3.66

Durante este procedimiento, se obtuvo información acerca de cómo las variaciones en las velocidades relativas influyen en la dinámica del vórtice y en el comportamiento del flujo revelando como la velocidad central aumenta hasta 5 veces respecto a la velocidad de entrada. El uso de Minitab permitió evaluar los datos a través de técnicas de análisis multivariado, generando superficies de respuesta que representan la relación existente entre las variables analizadas y las respuestas del sistema.

Las superficies de respuesta obtenidas ofrecen una representación tanto visual como cuantitativa de las interacciones entre las velocidades relativas y las variables de interés, facilitando la identificación de patrones y tendencias relevantes. Este análisis contribuye a una mejor comprensión del efecto de las velocidades relativas en la formación y evolución del vórtice, permitiendo optimizar las condiciones operativas del sistema para mejorar su desempeño.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

La ecuación (3) fue obtenida mediante el uso del software Minitab, el cual permitió modelar la velocidad relativa en función del diámetro y del ángulo de la geometría del sistema. Dicha ecuación se derivó a partir del análisis estadístico de datos experimentales y simulados, estableciendo una relación cuantitativa entre las variables geométricas y la velocidad relativa del fluido.

Asimismo, Minitab facilitó la construcción de un modelo de regresión capaz de describir cómo las variaciones en el diámetro y el ángulo influyen en la velocidad relativa dentro del vórtice. La ecuación resultante constituye una herramienta analítica útil para predecir la velocidad relativa bajo distintas configuraciones geométricas, tomando como base los datos obtenidos durante el estudio.

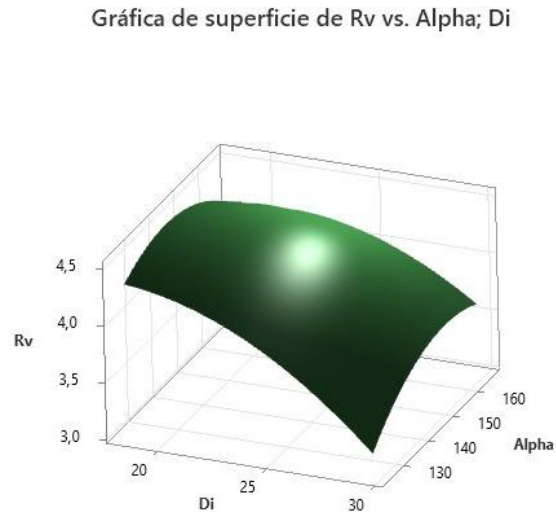
La ecuación (5) resulta fundamental para comprender la influencia de los parámetros geométricos sobre el comportamiento del flujo y para optimizar el diseño del sistema. Su formulación mediante Minitab garantiza que la relación entre las variables esté sustentada en un análisis sólido y estadísticamente significativo.

$$Rv = -5.87 + 0.098 Di + 0.1341 Alpha - 0.00738 Di^2 - 0.000558 Alpha^2 + 0.001250 Di * alpha \quad (5)$$

El software Minitab generó gráficos que permitieron representar cómo los factores geométricos, particularmente el diámetro y el ángulo, influyen en las velocidades relativas dentro del sistema. Estas visualizaciones facilitaron la observación clara y detallada de la relación entre dichas variables y su efecto sobre las velocidades relativas del fluido.

Los gráficos obtenidos mediante Minitab incluyeron representaciones tridimensionales y diagramas de contorno que evidenciaron la influencia conjunta del diámetro y el ángulo en la distribución de las velocidades relativas. Estas representaciones hicieron posible identificar patrones, tendencias y regiones críticas en las que las variaciones geométricas generan efectos significativos en el comportamiento del flujo.

La capacidad de visualizar estos efectos a través de las herramientas gráficas de Minitab resultó esencial para el análisis, ya que permitió comprender con mayor profundidad cómo ajustar los parámetros geométricos para optimizar el desempeño del sistema. Además, dichas visualizaciones proporcionaron una base sólida para la toma de decisiones orientadas a la modificación y mejora del diseño.

Figura 11. *Gráfica de superficie de respuesta.*

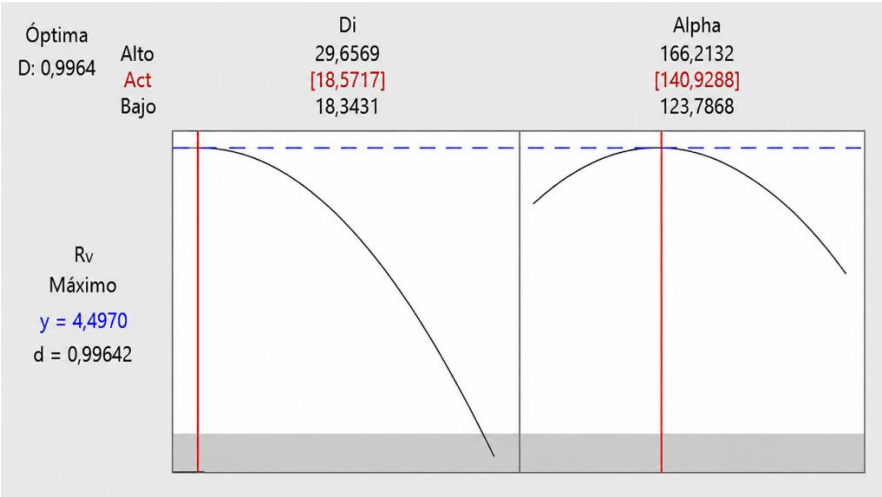
Nota: uso del software MINITAB.

Durante el proceso de optimización de la respuesta de velocidad relativa (R_v), se determinó la configuración geométrica más adecuada para el sistema. La geometría óptima identificada corresponde a un diámetro de 18 cm y un ángulo de 140° , tal como se muestra detalladamente en la Figura 11.

Esta configuración fue determinada a partir de un análisis detallado de las diferentes variaciones geométricas y de su influencia sobre la velocidad relativa del fluido. El proceso de optimización permitió ajustar tanto el diámetro como el ángulo con el propósito de maximizar el desempeño del sistema de acuerdo con los objetivos planteados.

La Figura 12 presenta una representación visual de la geometría óptima, evidenciando cómo estos parámetros específicos favorecen una mayor velocidad de flujo. En consecuencia, esta solución optimizada constituye una referencia importante para el diseño de sistemas hidráulicos con un mejor rendimiento y una mayor eficacia en el control y manejo de los vórtices gravitacionales.

Figura 12. Optimización del resultado de *RV*.



Nota: uso del software MINITAB.

Impactos esperados

Los resultados obtenidos en este proyecto se orientaron a la caracterización y comparación técnica del rendimiento hidrodinámico de las geometrías preseleccionadas. Mediante el uso de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se cuantificó de manera detallada el comportamiento del flujo en régimen estable, lo que permitió validar los hallazgos reportados en la literatura científica y evaluar la sensibilidad del sistema frente a variaciones en sus parámetros geométricos.

En primer lugar, la aplicación del Diseño de Experimentos (DOE) permitió procesar los datos obtenidos de las simulaciones para generar modelos de regresión y superficies de respuesta. Estos modelos facilitaron la identificación de tendencias y la determinación del punto de operación óptimo dentro del rango de parámetros estudiados, correspondiente al diámetro del desagüe y al ángulo de entrada. Como resultado principal, se obtuvo una matriz de desempeño que correlacionó la geometría del sistema con la velocidad del flujo, proporcionando un criterio técnico para la selección de configuraciones aplicables a sistemas de microgeneración hidroeléctrica.

De manera complementaria, se obtuvo una descripción detallada de la estructura tridimensional del vórtice en estado estacionario. Debido a que las simulaciones se desarrollaron bajo un enfoque steady-state, los resultados representaron el régimen de flujo completamente desarrollado y estable. Esta caracterización se presentó mediante contornos de velocidad, líneas de corriente, distribuciones de presión y fracción volumétrica, lo que permitió visualizar la formación del vórtice, el desarrollo del núcleo de aire y la interacción entre las fases agua-aire. Asimismo, el análisis facilitó la comparación del comportamiento hidrodinámico entre las diferentes configuraciones geométricas evaluadas, permitiendo identificar aquella que presentó las mejores condiciones de estabilidad del flujo y mayor velocidad tangencial.

Contornos de fases (VOF): para visualizar la topología de la interfaz aire-agua y la profundidad de la depresión central.

Perfiles de velocidad: para cuantificar la distribución de las componentes tangencial, axial y radial bajo condiciones constantes.

Líneas de corriente: para identificar patrones de flujo y posibles zonas de estancamiento o recirculación que afecten la estabilidad del sistema.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos para la geometría validada, se establecieron criterios de diseño geométrico orientados a la optimización de la cámara de formación del vórtice. Estas recomendaciones permitieron definir los rangos dimensionales más favorables, en términos de la relación entre el diámetro del desagüe y la geometría de la cámara, así como los ángulos de entrada que favorecieron el incremento de la velocidad tangencial y la estabilidad del flujo. Los criterios obtenidos constituyeron una base técnica para futuras investigaciones enfocadas en la integración de sistemas de vórtice gravitacional con microturbinas hidroeléctricas, proporcionando lineamientos para el diseño de configuraciones geométricas que promuevan un funcionamiento estable y eficiente bajo condiciones de baja altura de caída.

Tabla 4. *Sección resultados.*

Resultado Esperado	Indicador de Cumplimiento (Medible/Verificable)	Objetivo Relacionado
R1. Matriz de parámetros geométricos base y rangos de operación.	Documento técnico de síntesis con la selección de variables basado en el estado del arte.	Objetivo Específico 1
R2. Plan de ejecución de simulaciones y ejecución de corridas CFD.	Matriz de diseño experimental (DOE) validada y convergencia en el total de casos simulados.	Objetivo Específico 2 y 3
R3. Modelo matemático de optimización y configuración geométrica final.	Ecuación de regresión con coeficiente de determinación y gráficas de Superficie de Respuesta (RSM).	Objetivo Específico 4

Conclusiones

Este estudio permitió comprender los mecanismos fundamentales que regulan la dinámica de los vórtices y su comportamiento a lo largo de las diferentes etapas del flujo.

- El parámetro con mayor incidencia sobre la velocidad relativa corresponde al diámetro del vórtice. Los resultados obtenidos mediante la simulación y el análisis de superficie de respuesta evidenciaron que el diámetro ejerce una influencia significativa en la velocidad relativa del fluido. Las variaciones en este parámetro modifican de manera importante la dinámica del vórtice, afectando directamente la velocidad de desplazamiento del fluido dentro del sistema.
- Se observó que la disminución del diámetro del vórtice produce un incremento en las velocidades relativas. Los datos analizados muestran que, a medida que el diámetro se reduce, la velocidad relativa del fluido aumenta considerablemente. Este comportamiento indica que una geometría más compacta favorece una mayor aceleración del flujo, aspecto fundamental para aplicaciones que demandan altas velocidades.
- Los resultados obtenidos mediante el Diseño de Experimentos y la metodología de Superficie de Respuesta evidencian que el diámetro del vórtice presenta una mayor incidencia sobre la velocidad relativa que el ángulo de entrada. Esta tendencia puede explicarse desde el comportamiento hidrodinámico del sistema, debido a que el diámetro del desagüe modifica directamente el área disponible para la evacuación del fluido y, por tanto, las condiciones de aceleración, distribución de presión y concentración del flujo hacia el núcleo del vórtice. En el presente estudio, las variaciones del diámetro produjeron cambios importantes en la velocidad relativa, mientras que el ángulo actuó principalmente como un elemento de regulación de la componente tangencial del flujo. Los resultados muestran, además, que la reducción del diámetro favorece un incremento de las velocidades relativas, comportamiento asociado a una geometría más compacta que intensifica la aceleración del flujo. La velocidad del vórtice puede alcanzar valores hasta cinco veces superiores a la velocidad de entrada gracias a la configuración geométrica optimizada (tabla 3). La combinación de un diámetro de 18 cm y un ángulo de 140° permitió obtener velocidades significativamente mayores en comparación con la velocidad de entrada del

fluido. Este incremento resalta la eficacia del diseño optimizado para mejorar el desempeño del sistema hidráulico.

- La configuración geométrica óptima del vórtice contribuye de manera significativa a incrementar la eficiencia del sistema hidráulico. El análisis y la optimización de la geometría, que condujeron a un diámetro de 18 cm y un ángulo de 140° , no solo favorecieron el aumento de la velocidad relativa del fluido, sino que también mejoraron el rendimiento global del sistema. Esta configuración posibilita una gestión más eficiente del flujo, incrementando la capacidad del sistema para alcanzar velocidades elevadas y potencialmente reduciendo el consumo energético requerido para mantener las condiciones de operación deseadas. En consecuencia, la selección de esta geometría representa un avance relevante en el diseño de sistemas hidráulicos basados en vórtices gravitacionales.

Bibliografía

- Arteaga Marín, J., & Benavides Muñoz, H. (2018). Perfiles de velocidad en sistema de flujo a superficie libre con un vórtice rotacional hidráulico. *Revista ESPAMCIENCIA*, 9(1), 33–42.
https://revistasepam.espam.edu.ec/index.php/Revista_ESPAMCIENCIA/article/view/149
- Ayala Chauvin, M. I., Benavides Muñoz, H. M., & Riba, C. (2016). Sistema de generación de energía sumergible basado en un vórtice gravitacional con sifón para comunidades aisladas. *Revista Técnica “energía”*, 12(1), 304–312.
<https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.55>
- Edirisinghe, D. S., Yang, H.-S., Gunawardane, S. D. G. S. P., & Lee, Y.-H. (2022). Enhancing the performance of gravitational water vortex turbine by flow simulation analysis. *Renewable Energy*, 194, 163–180. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.053>
- Esaa, Z., Zaini, J. H., Mehdi, M., Iqbal, A., & Nauman, M. M. (2022). Design, fabrication & analysis of a gravitational water vortex based energy harvester. *International Journal of Green Energy*, 20(1), 77–88. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.2023880>
- Faraji, A., Jande, Y. A. C., & Kivevele, T. (2022). Performance analysis of a runner for gravitational water vortex power plant. *Energy Science & Engineering*, 10(4), 1055–1066. <https://doi.org/10.1002/ese3.1085>
- Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics* (3rd ed.). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>
- Guevara Muñoz, A. J. (2019). *Efecto del diámetro de salida en un tanque cónico en la eficiencia de una turbina de vórtice gravitacional para pico-generación* [Trabajo de grado de pregrado, Instituto Tecnológico Metropolitano]. Repositorio Institucional Instituto Tecnológico Metropolitano. <http://hdl.handle.net/20.500.12622/3978>
- Maika, N., Lin, W., & Khatamifar, M. (2023). A review of gravitational water vortex hydro turbine systems for hydropower generation. *Energies*, 16(14), 5394. <https://doi.org/10.3390/en16145394>

- Nishi, Y., & Inagaki, T. (2017). Performance and flow field of a gravitation vortex type water turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017, Article 2610508. <https://doi.org/10.1155/2017/2610508>
- Nishi, Y., Inagaki, T., Li, Y., & Hatano, R. (2020). Study on the flow field and performance of a gravitational water vortex turbine. *Renewable Energy*, 162, 1201–1217. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.012>
- Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). *Hydraulic structures* (4th ed.). CRC Press. <https://www.routledge.com/Hydraulic-Structures/Novak-Moffat-Nalluri-Narayanan/p/book/9780415386265>
- Patiño Armijos, E. C. (2014). *Estudio del comportamiento hidráulico de un flujo a través de un sistema de vórtice gravitacional utilizando técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)* [Trabajo de fin de titulación, Universidad Técnica Particular de Loja]. Repositorio Institucional UTPL. https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/10765/1/Patino_Armijos_Edison_Carlos.pdf
- Velásquez, L., Posada-Montoya, J. A., & Chica, E. (2022). Optimization of the basin and inlet channel of a gravitational water vortex hydraulic turbine using the response surface methodology. *Renewable Energy*, 187, 508–521. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.113>
- Velásquez, L., Posada, A., & Chica, E. (2023). Surrogate modeling method for multi-objective optimization of the inlet channel and the basin of a gravitational water vortex hydraulic turbine. *Applied Energy*, 330, 120357. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120357>
- Velásquez, L., Rubio-Clemente, A., & Chica, E. (2024). Numerical and experimental analysis of vortex profiles in gravitational water vortex hydraulic turbines. *Energies*, 17(14), 3543. <https://doi.org/10.3390/en17143543>
- Wanchat, S., Suntivarakorn, R., Wanchat, S., Tonmit, K., & Kayanyiem, P. (2013). A parametric study of a gravitation vortex power plant. *Advanced Materials Research*, 805–806, 811–817. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.811>
- Zheng, G., Gu, Z., Xu, W., Lu, B., Li, Q., Tan, Y., Wang, C., & Li, L. (2023). Gravitational surface vortex formation and suppression control: A review from hydrodynamic characteristics. *Processes*, 11(1), 42. <https://doi.org/10.3390/pr11010042>