

Simulación de un vórtice gravitacional y validación en el canal hidráulico de la universidad Santo Tomás

Juan Sebastian Garay Moreno¹, Brayan Andrés Herreño², Juan Manuel Hill³

¹GIMEC, Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomas, Colombia. Email: juangaray@ustavillavo.edu.co

²GIMEC, Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomas, Colombia. Email: brayanrodriguez@ustavillavicencio.edu.co

³GIMEC, Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomas, Colombia. Email: juanhill@ustavillavicencio.edu.co

Resumen

El proyecto se enfoca en la simulación de vórtices gravitacionales hidráulicos, un fenómeno complejo que integra conceptos de hidrodinámica, física de fluidos y principios gravitacionales. Estos vórtices juegan un papel crucial en el diseño y funcionamiento de diversas estructuras hidráulicas, como presas, canales y sistemas de drenaje, y su comprensión es esencial para garantizar tanto la seguridad como la sostenibilidad ambiental. Mediante el uso de avanzadas herramientas de simulación computacional, el proyecto examinará cómo la geometría de los vórtices influye en parámetros clave, tales como la velocidad y la eficiencia del flujo. El objetivo es profundizar en el entendimiento del comportamiento de estos vórtices y desarrollar estrategias efectivas para su mitigación y control, con el fin de optimizar el rendimiento de las estructuras hidráulicas y minimizar los riesgos asociados. Se anticipa que este estudio no solo contribuirá al avance del conocimiento en ingeniería hidráulica y física de fluidos, sino que también ofrecerá nuevas perspectivas y soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos relacionados con los vórtices gravitacionales hidráulicos. Además, se espera que los hallazgos puedan ser aplicados para mejorar la eficiencia de fluidos en una variedad de aplicaciones prácticas, y que los resultados del estudio sirvan como base para futuras investigaciones en entornos de laboratorio dedicados a la exploración de tecnologías para energías renovables.

Palabras clave: vórtice gravitacional, energías renovables, simulación, CFD, geometría.

Abstract

The project focuses on the simulation of hydraulic gravitational vortices, a complex phenomenon that integrates concepts from hydrodynamics, fluid physics and gravitational principles. These vortices play a crucial role in the design and operation of various hydraulic structures, such as dams, canals and drainage systems, and their understanding is essential to ensure both safety and environmental sustainability. Using advanced computational simulation tools, the project will examine how vortex geometry influences key parameters such as flow velocity and efficiency. The objective is to deepen the understanding of the behavior of these vortices and develop effective strategies for their mitigation and control, to optimize the performance of hydraulic structures and minimize the associated risks. It is anticipated that this study will not only contribute to the advancement of knowledge in hydraulic engineering and fluid physics but will also offer new perspectives and innovative solutions to address the challenges related to hydraulic gravitational vortices. Furthermore, it is expected that the findings can be applied to improve fluid efficiency in a variety of practical applications, and that the results of the study will serve as a basis for future research in laboratory settings dedicated to the exploration of renewable energy technologies.

Keywords: gravitational vortex, renewable energy, simulation, CFD, geometry.

1. Introducción

La simulación de vórtices gravitacionales hidráulicos constituye un área de investigación apasionante que fusiona conceptos de hidrodinámica, física de fluidos y principios gravitacionales. Estos vórtices desempeñan un papel crucial en una amplia variedad de aplicaciones hidráulicas, desde presas y canales hasta sistemas de drenaje. En el presente proyecto, se llevará a cabo un análisis detallado de cómo las variaciones en la geometría de los vórtices influyen en parámetros clave como la velocidad del flujo y la eficiencia hidráulica [1]. A través de técnicas avanzadas de simulación computacional, el estudio se centrará en entender las interacciones entre la geometría del vórtice y su comportamiento dinámico, con el objetivo de mejorar la eficiencia de las estructuras hidráulicas y desarrollar estrategias innovadoras para su optimización.

La comprensión detallada de los vórtices gravitacionales hidráulicos es esencial para el diseño y la gestión segura de una amplia variedad de infraestructuras hidráulicas, tales como presas, canales, tuberías y sistemas de drenaje. Estos vórtices no solo influyen en el rendimiento operativo de estas estructuras, sino que también tienen importantes implicaciones para la seguridad y la sostenibilidad ambiental. En este proyecto, se emplearán avanzadas herramientas de simulación computacional para modelar y analizar de manera exhaustiva la formación, evolución y dinámica de los vórtices gravitacionales hidráulicos, explorando cómo las variaciones en su geometría afectan parámetros críticos como la velocidad del flujo y la eficiencia hidráulica [2]. El estudio se centrará en identificar y cuantificar los efectos de la geometría del vórtice sobre el rendimiento hidráulico, con el objetivo de desarrollar estrategias innovadoras para optimizar el diseño de infraestructuras hidráulicas y mejorar la gestión de los riesgos asociados.

Profundizar en la simulación de estos fenómenos busca no solo mejorar la predicción y comprensión de su comportamiento, sino también desarrollar estrategias efectivas para la mitigación de riesgos y la optimización del rendimiento de las estructuras hidráulicas. Este enfoque integral permitirá una mejor identificación de los mecanismos que gobiernan la dinámica de los vórtices gravitacionales hidráulicos, facilitando la creación de soluciones innovadoras para abordar los desafíos asociados a estos fenómenos. Al avanzar en el modelado de sus características, se pretende establecer métodos prácticos y basados en evidencia que contribuyan a mejorar el diseño, la gestión y la operación de infraestructuras hidráulicas,

promoviendo así una mayor seguridad y sostenibilidad en su implementación.

Este proyecto tiene como objetivo contribuir de manera significativa al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería hidráulica y la física de fluidos, ofreciendo perspectivas innovadoras y soluciones prácticas para enfrentar los desafíos actuales asociados con los vórtices gravitacionales hidráulicos. A través de un enfoque integral que combina simulación computacional avanzada y análisis detallado, se busca generar nuevas metodologías y modelos que no solo profundicen en la comprensión de estos fenómenos complejos, sino que también propongan estrategias efectivas para mejorar el diseño y la gestión de infraestructuras hidráulicas. Se espera que los resultados del proyecto faciliten el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras, con aplicaciones prácticas que aborden problemas de eficiencia, seguridad y sostenibilidad en diversos contextos hidráulicos.

El objetivo final de este proyecto es proporcionar una serie de parámetros geométricos detallados y una comprensión más profunda de los vórtices gravitacionales hidráulicos, lo que permitirá optimizar la velocidad y el rendimiento de los fluidos en una variedad de aplicaciones prácticas. A través de un enfoque meticuloso que combina simulaciones avanzadas y análisis detallado, se busca no solo mejorar los modelos existentes, sino también desarrollar nuevas metodologías para el diseño y la gestión de infraestructuras hidráulicas. Además, se espera que los resultados de esta investigación amplíen el conocimiento teórico y práctico al ser aplicados en entornos de estudio, como laboratorios, para profundizar en sistemas que se relacionan con las energías renovables. Este proyecto tiene el potencial de generar nuevas perspectivas y soluciones innovadoras que contribuyan al avance de la ingeniería hidráulica y al desarrollo sostenible de tecnologías hidráulicas en el contexto de las energías renovables [3].

2. Metodología

Una vez definida la problemática a resolver y establecidos los objetivos de investigación, se procede a ejecutar el procedimiento de solución mediante una secuencia meticulosa de pasos diseñada para garantizar la obtención de resultados precisos y significativos. El proceso metodológico se estructura en varias etapas clave, comenzando con la formulación detallada del modelo teórico, seguida de la implementación de simulaciones computacionales avanzadas. Posteriormente, se llevan a cabo análisis rigurosos de los datos obtenidos para validar los modelos y verificar las hipótesis planteadas.

Finalmente, se interpretan los resultados en el contexto de los objetivos del estudio, buscando no solo resolver la problemática inicial, sino también identificar nuevas oportunidades de investigación. Esta metodología asegura que cada fase del proceso contribuya a la generación de conclusiones robustas y a la formulación de recomendaciones prácticas basadas en evidencias.

Etapas del desarrollo de la metodología

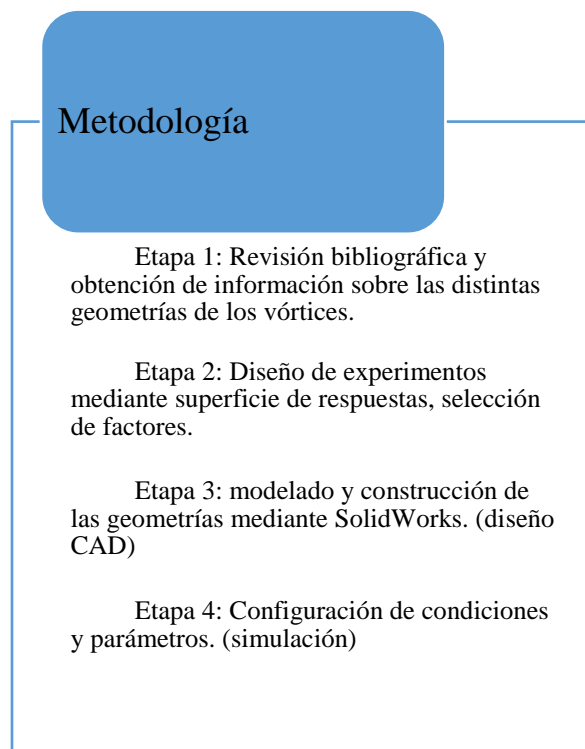


Figura 1. Etapas del desarrollo. Fuente: elaboración propia

Etapas 1

En primer lugar, se llevará a cabo un estudio exhaustivo y una recopilación sistemática de información sobre los vórtices gravitacionales, con un énfasis particular en las diversas geometrías empleadas en estos sistemas. Este proceso comienza con una revisión bibliográfica detallada de proyectos anteriores que han abordado problemas similares, analizando las geometrías utilizadas y sus respectivos enfoques metodológicos. La información recopilada se organizará en una tabla comparativa de toma de decisiones, donde se evaluarán diferentes opciones geométricas en función de criterios como la eficacia, la estabilidad y la eficiencia del flujo. A partir de este análisis, se seleccionará la geometría más adecuada para el estudio detallado de los vórtices gravitacionales en el contexto del proyecto. Este enfoque metodológico asegura una base sólida para la

elección de la geometría óptima, estableciendo el punto de partida para el análisis y simulación de los fenómenos hidráulicos en fases posteriores del proyecto.

Etapas 2

Una vez seleccionada la geometría óptima, se desarrollará un diseño experimental basado en la metodología de superficie de respuestas (RSM, por sus siglas en inglés), que se centra en estudiar la relación entre una o más variables de respuesta y un conjunto de factores o niveles para optimizar estas respuestas. La metodología RSM se implementará a través de una serie de técnicas estadísticas que permiten modelar y analizar cómo los factores experimentales afectan las respuestas de interés. Este enfoque incluye la definición de un plan experimental que cubra un rango de combinaciones de factores y niveles, la ejecución de experimentos para recoger datos, y el análisis de estos datos para identificar las configuraciones óptimas que maximizan o minimizan las respuestas deseadas. A través de este proceso, se busca no solo entender las interacciones entre los factores, sino también optimizar el rendimiento de la geometría seleccionada en relación con las métricas establecidas para el proyecto.

Para llevar a cabo la metodología de superficie de respuestas, se utilizará el software especializado Minitab, una herramienta avanzada que facilitará la optimización de los resultados del estudio. Minitab es un programa de análisis estadístico reconocido por su capacidad para implementar técnicas avanzadas de diseño experimental y análisis de datos. Su funcionalidad incluye herramientas específicas para crear modelos de superficie de respuestas, realizar análisis de regresión, y explorar interacciones entre factores experimentales. La elección de Minitab se basa en su robustez y fiabilidad en el análisis estadístico, así como en su capacidad para gestionar datos complejos y generar visualizaciones claras de los resultados. A través de Minitab, se definirá el plan experimental, se analizarán los datos obtenidos de los experimentos, y se identificarán las configuraciones óptimas que maximicen o minimicen las variables de respuesta establecidas en el proyecto.

La relación para el análisis depende de las velocidades de entrada y la velocidad máxima en el cono donde rota el fluido. Además, se consideran factores geométricos clave, como el diámetro y el ángulo del vórtice. Estos factores se variarán sistemáticamente para modificar los parámetros geométricos específicos, permitiendo así el estudio de diversas configuraciones. Se utilizarán herramientas de modelado y simulación para evaluar el impacto de cada parámetro en el comportamiento del fluido

dentro del cono. Las configuraciones geométricas seleccionadas se analizarán mediante un enfoque comparativo, identificando las condiciones óptimas para la rotación del fluido y su relación con las velocidades de entrada. Los resultados obtenidos se validarán mediante experimentación práctica para asegurar la precisión y la relevancia de los hallazgos.

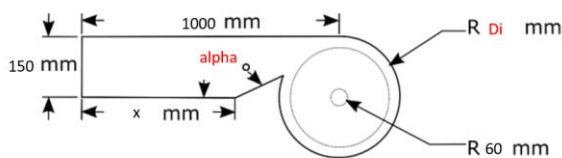


Figura 2. Geometría planteada del vórtice gravitacional.
Fuente: elaboración propia

Etapa 3

Posteriormente, se llevará a cabo el modelado de las diferentes geometrías utilizando el software SolidWorks, que facilita la construcción precisa y eficiente de los modelos tridimensionales. Las geometrías definidas se importarán a ANSYS para su análisis detallado. En ANSYS, se realizará un proceso de mallado adecuado, optimizado mediante un estudio de sensibilidad de malla para asegurar que la discretización del dominio es suficientemente fina como para capturar los detalles críticos del flujo. Este estudio implicará la creación de varias mallas con diferentes densidades y la comparación de los resultados para determinar el equilibrio óptimo entre precisión y tiempo de cálculo.

Etapa 4

Una vez completado el mallado, se llevarán a cabo simulaciones numéricas utilizando modelos de turbulencia apropiados para el régimen de flujo estudiado. Los parámetros de entrada para las simulaciones se basarán en las condiciones experimentales y teóricas previamente definidas. Se analizarán diversos aspectos del comportamiento del fluido, como la distribución de velocidades y la formación de vórtices, en función de las diferentes configuraciones geométricas.

- Configuración básica

En este apartado, se configurará el estado del sistema como estacionario, lo que implica que las propiedades del flujo se considerarán constantes a lo largo del tiempo, permitiendo un análisis más simplificado y enfocado en el equilibrio del sistema. Se incorporará la gravedad en el modelo, asegurando que las fuerzas gravitacionales sean correctamente

representadas en las simulaciones. Esto se logrará definiendo la dirección y magnitud del vector de gravedad en el sistema de coordenadas tridimensional.

Además, se establecerán los valores de referencia para la evaluación del sistema en los ejes X, Y y Z. Estos valores de referencia incluirán parámetros fundamentales como la velocidad del fluido, la presión, la temperatura y la densidad. Para ello, se definirán las condiciones de contorno adecuadas, como las velocidades de entrada y salida, así como las condiciones de no deslizamiento en las paredes. También se seleccionarán los modelos de turbulencia adecuados, si es necesario, para capturar con precisión los efectos del flujo turbulento en el sistema.

Estos ajustes y configuraciones permitirán un análisis detallado y preciso del comportamiento del fluido bajo diferentes condiciones geométricas y operativas, proporcionando una base sólida para la interpretación y validación de los resultados obtenidos.

- Modelos

Se aplicará el modelo multifásico Volumen de Fluido (VOF) al sistema, en el cual se definirán el agua y el aire como los fluidos predominantes. Este modelo es adecuado para capturar la interfaz entre dos fluidos inmiscibles, permitiendo un análisis preciso de las interacciones y la dinámica entre el agua y el aire dentro del sistema. Además, se implementará el modelo de viscosidad k- ϵ debido a su reconocida eficiencia y facilidad de convergencia en simulaciones de flujo turbulento.

El modelo VOF requerirá la especificación de las propiedades físicas de ambos fluidos, como la densidad y la viscosidad, así como las condiciones iniciales y de contorno adecuadas para cada fase. Se configurará la fracción volumétrica inicial de cada fluido en el dominio de simulación para representar con precisión la distribución inicial de agua y aire.

El modelo de viscosidad k- ϵ se utilizará para resolver las ecuaciones de turbulencia, proporcionando una descripción detallada de los efectos viscosos y turbulentos en el flujo. Este modelo es

ampliamente utilizado en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) debido a su balance entre precisión y costos computacionales.

La implementación de estos modelos permitirá un estudio exhaustivo del comportamiento multifásico y turbulento en el sistema, proporcionando resultados confiables y detallados sobre la interacción entre el agua y el aire bajo diferentes condiciones operativas y geométricas. [4].

- Condiciones iniciales

Se utilizarán los valores especificados en la Tabla 2 como configuración de las condiciones iniciales para las simulaciones. Estos valores incluyen parámetros clave como las velocidades de entrada del fluido, la presión relativa, las propiedades físicas específicas de los fluidos involucrados, tales como la densidad y la viscosidad, son establecidas automáticamente por el software ANSYS.

Estas configuraciones serán cuidadosamente implementadas en el software de simulación para asegurar que todas las condiciones iniciales y de contorno sean consistentes y precisas, permitiendo obtener resultados fiables y representativos del comportamiento real del sistema.

Tabla 1. Valores de condiciones.

| Inlet | |
|----------------------|----------------|
| Velocidad de entrada | 0,3 m/s |
| Valor del fluido | agua=1, aire=0 |
| Turbulencia | 5% |
| Outlet | |
| Presión relativa | 0 Pa |

Fuente: elaboración propia

- Solución

En la etapa final, se llevará a cabo el proceso de cálculo inicializando la solución de manera estándar, lo que implica establecer las condiciones iniciales y preparar el sistema para el análisis numérico. Se definirá el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia del sistema. Basándonos en

estudios previos y en la naturaleza del sistema, se ha determinado que aproximadamente 600 iteraciones son suficientes para lograr la convergencia en este tipo de simulaciones.

Durante las iteraciones, se monitorizarán parámetros clave como las residuales de las ecuaciones de continuidad, momento y energía, para asegurar que disminuyan a niveles aceptables, indicando que la solución se está estabilizando. Se utilizarán criterios de convergencia rigurosos para garantizar la precisión de los resultados, asegurando que los cambios entre iteraciones sucesivas sean mínimos.

Además, se realizarán verificaciones intermedias de la solución para detectar y corregir posibles problemas de estabilidad o divergencia. Este enfoque meticuloso garantizará que los resultados finales sean fiables y representativos del comportamiento real del sistema bajo las condiciones simuladas.

Este proceso sistemático y detallado permitirá obtener una solución precisa y convergente, proporcionando una base sólida para el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos de las simulaciones.

Finalmente, los resultados obtenidos de las simulaciones se validarán mediante comparación con datos experimentales disponibles o con resultados de la literatura, asegurando así la precisión y la relevancia de los hallazgos. Este enfoque integral permitirá una comprensión profunda del impacto de las variaciones geométricas en el comportamiento del fluido dentro del cono.

3. Resultados

Los resultados obtenidos de un proyecto de simulación de vórtices gravitacionales hidráulicos brindan una comprensión detallada del fenómeno estudiado, basada en los parámetros establecidos para la geometría del sistema. Estos resultados permiten analizar cómo las variaciones en los parámetros geométricos afectan el comportamiento del vórtice y la dinámica del fluido.

A través de la simulación, se evaluará la influencia de diferentes configuraciones geométricas en la formación y el comportamiento de los vórtices, identificando patrones y tendencias clave. La comparación de los resultados obtenidos con distintas geometrías permitirá determinar cuáles

configuraciones ofrecen un rendimiento óptimo en términos de eficiencia y estabilidad del flujo.

El análisis detallado de estos resultados facilita la definición de la geometría más eficiente para el sistema, optimizando el diseño para lograr un rendimiento mejorado en aplicaciones prácticas. Esta comprensión profunda del fenómeno permitirá no solo una mejor predicción del comportamiento en condiciones específicas, sino también una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en el diseño de sistemas hidráulicos.

En la caracterización dinámica del vórtice, se logró una comprensión detallada de la formación, evolución y estructura de los vórtices gravitacionales dentro del sistema hidráulico estudiado. Este análisis permitió desentrañar los mecanismos subyacentes que gobiernan la dinámica de los vórtices y su comportamiento en diferentes etapas del flujo.

Además, se examinó minuciosamente el contorno del fluido, incluyendo el contorno de fases y el contorno de velocidad. El contorno de fases, presentado en la Figura 2, muestra la distribución y transición entre diferentes fases del fluido, proporcionando información crucial sobre la interfaz entre los fluidos inmiscibles. Por otro lado, el contorno de velocidad, ilustrado en la Figura 3, revela la variación de la velocidad del fluido en el sistema, destacando áreas de alta y baja velocidad que son esenciales para entender la dinámica del flujo y la interacción con los vórtices.

Estos análisis detallados proporcionan una visión integral del comportamiento del vórtice y de cómo los diferentes parámetros del sistema influyen en su dinámica, ofreciendo información valiosa para la optimización y el diseño de sistemas hidráulicos futuros.

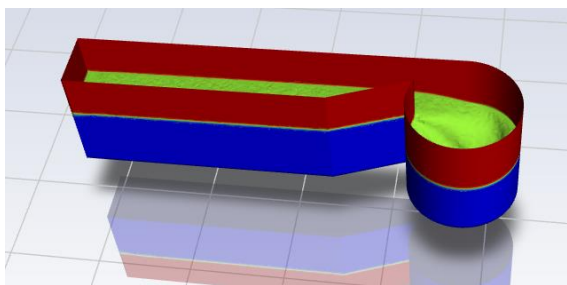


Figura 3. Contorno de fases. Fuente: elaboración propia

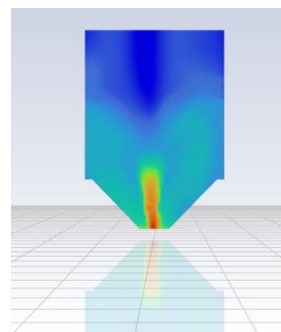


Figura 4. Contorno de velocidad. Fuente: elaboración propia

Para la generación de la superficie de respuesta, se realizaron mediciones de las velocidades relativas (RV) en relación con las velocidades máximas observadas en el vórtice y las velocidades de entrada. Estas mediciones se llevaron a cabo utilizando el software Minitab, que facilitó el análisis estadístico y la creación de modelos de superficie de respuesta.

En este proceso, se recopiló información detallada sobre cómo las variaciones en las velocidades relativas afectan la dinámica del vórtice y el comportamiento del flujo. Minitab permitió la evaluación de estos datos mediante técnicas de análisis multivariado, generando superficies de respuesta que ilustran la relación entre las variables estudiadas y las respuestas del sistema.

Las superficies de respuesta obtenidas proporcionan una representación visual y cuantitativa de las interacciones entre las velocidades relativas y las variables de interés, facilitando la identificación de tendencias y patrones clave. Este análisis ayuda a entender mejor el impacto de las velocidades relativas en la formación y evolución del vórtice, permitiendo optimizar las condiciones del sistema para mejorar su rendimiento.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas.

Se obtuvo la ecuación (1) utilizando el software Minitab, que modela la velocidad relativa en función del diámetro y el ángulo de la geometría del sistema. Esta ecuación se derivó a partir del análisis estadístico de los datos experimentales y simulados, permitiendo establecer una relación cuantitativa entre las variables geométricas y la velocidad relativa del fluido.

Minitab facilitó la creación de un modelo de regresión que describe cómo las variaciones en el diámetro y el ángulo afectan la velocidad relativa dentro del vórtice. La ecuación resultante proporciona una herramienta analítica para predecir la velocidad relativa bajo

diferentes configuraciones geométricas, basada en los datos recolectados durante el estudio.

La ecuación (1) es crucial para entender cómo los parámetros geométricos influyen en el comportamiento del flujo y para optimizar el diseño del sistema. Su obtención a través de Minitab asegura que la relación entre las variables se basa en un análisis robusto y estadísticamente significativo.

$$R_v = -5,87 + 0,098 D_i + 0,1341 \text{ Alpha} - 0,00738 D_i^2 - 0,000558 \text{ Alpha}^2 + 0,001250 D_i \cdot \text{Alpha} \quad (1)$$

El programa Minitab generó gráficos que ilustraban cómo los factores geométricos, específicamente el diámetro y el ángulo, afectan las velocidades relativas dentro del sistema. Estas visualizaciones permitieron observar de manera clara y detallada las relaciones entre estas variables y sus impactos en las velocidades relativas del fluido.

Los gráficos proporcionados por Minitab incluyeron representaciones tridimensionales y de contorno que mostraban la influencia combinada del diámetro y el ángulo en la distribución de las velocidades relativas. Estos gráficos facilitaron la identificación de patrones, tendencias y áreas críticas donde las variaciones en los factores geométricos tienen un efecto significativo en el comportamiento del flujo.

La capacidad de visualizar estos efectos a través de los gráficos de Minitab fue fundamental para el análisis, permitiendo una comprensión más profunda de cómo ajustar los parámetros geométricos para optimizar el rendimiento del sistema. Las visualizaciones también proporcionaron una base sólida para la toma de decisiones en la modificación y mejora del diseño.



Figura 5. Grafica de efectos para la velocidad relativa. Fuente: elaboración propia usando el software MINITAB.

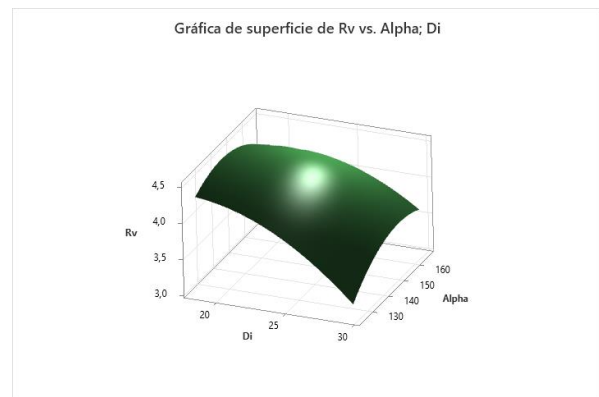


Figura 6. Gráfica de superficie de respuesta. Fuente: elaboración propia usando el software MINITAB.

Durante el proceso de optimización de la respuesta de velocidad relativa, se identificó la configuración geométrica óptima para el sistema. La mejor geometría encontrada presenta un diámetro de 18 cm y un ángulo de 140°, lo que se ilustra en detalle en la Figura 7.

Esta configuración se determinó mediante un análisis exhaustivo de las distintas variaciones geométricas y su impacto en la velocidad relativa del fluido. La optimización permitió ajustar el diámetro y el ángulo para maximizar el rendimiento del sistema en función de los objetivos establecidos.

La Figura 7 proporciona una representación visual clara de la geometría óptima, destacando cómo estos parámetros específicos contribuyen a una mejora en la eficiencia del flujo. Esta solución optimizada ofrece una base para el diseño de sistemas hidráulicos con un rendimiento mejorado y una mayor efectividad en la gestión de los vórtices gravitacionales.

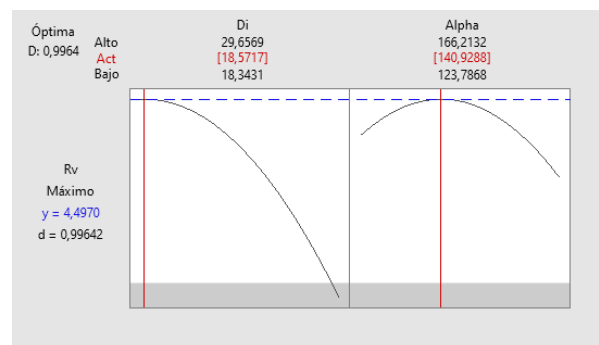


Figura 7. Optimización del resultado de RV. Fuente: elaboración propia usando el software MINITAB.

4. Conclusiones

- El factor con mayor influencia en la velocidad relativa es el diámetro del vórtice. Los resultados de la simulación y el análisis de la superficie de respuesta revelan que el diámetro del vórtice tiene un impacto significativo en la velocidad relativa del fluido. Variaciones en el diámetro modifican notablemente la dinámica del vórtice, afectando directamente la velocidad con la que el fluido se mueve dentro del sistema.
- Una reducción en el diámetro del vórtice conduce a mayores velocidades relativas. Los datos obtenidos muestran que a medida que disminuye el diámetro del vórtice, las velocidades relativas del fluido aumentan. Este comportamiento sugiere que una geometría más compacta permite una mayor aceleración del fluido, lo cual es crucial para optimizar el rendimiento en aplicaciones que requieren alta velocidad del flujo.
- La velocidad del vórtice puede alcanzar hasta cinco veces la velocidad de entrada, gracias a la configuración óptima de la geometría. La optimización de la geometría del vórtice, con un diámetro de 18 cm y un ángulo de 140° , permite que la velocidad del vórtice sea hasta cinco veces mayor que la velocidad de entrada del fluido. Este incremento significativo en la velocidad subraya la efectividad del diseño optimizado para mejorar la eficiencia del sistema hidráulico.
- La configuración geométrica óptima del vórtice mejora significativamente la eficiencia del sistema hidráulico. El análisis detallado y la optimización de la geometría del vórtice, que resultaron en un diámetro de 18 cm y un ángulo de 140° , no solo aumentaron la velocidad relativa del fluido, sino que también optimizaron el rendimiento global del sistema. Esta configuración permite una gestión más eficiente del flujo, mejorando la capacidad del sistema para alcanzar velocidades elevadas y potencialmente reduciendo el consumo energético necesario para mantener el flujo deseado. La elección de esta geometría óptima representa un avance significativo en el diseño de sistemas hidráulicos con vórtices gravitacionales.

5. Referencias

- [1] Ayala, M., Benavides, H., y Riba, C. 2016. Sistema de generación energía sumergible basado en un vórtice gravitacional con sifón para comunidades aisladas. *Revista Técnica Energía* 12: 304-312.
- [2] Barlari, M., y Pérez, I. 2015. Medición del campo de velocidades tangencial de un vórtice en un medio cilíndrico y estudio de su superficie libre. *Laboratorio V, FCEN, UBA*.
- [3] Cadavid, J. H. 2006. *Hidráulica de canales: fundamentos*. Universidad Eafit, Medellín
- [4] Smith, J. D., & Johnson, A. B. (2020). Application of Computational Fluid Dynamics in Aerospace Engineering. *Journal of Fluid Mechanics*