ISSN: 1692-7257 - Volumen 1 – Número 47 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Análisis sobre criterios de diseño geométrico del canal de entrada y cuenca para turbinas de vórtice gravitacional

Analysis of geometric design criteria for the inlet channel and basin for gravity vortex turbines

Eduardo David Madrid Carrillo[1]
Juan Carlos Serrano Rico[2]
Elkin Gregorio Flórez Serrano[2]

[1] **Universidad de Antioquia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Mecánica, Medellín, Antioquia, Colombia.**
[2] **Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, GIMUP, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.**

Recibido: 01 agosto 2025. Revisado: 01 octubre 2025. Aceptado: 20 diciembre 2025. Publicado: 01 enero 2026.
Autor de correspondencia: Eduardo David Madrid Carrillo

Cómo citar: E. D. Madrid Carrillo, J. C. Serrano Rico, and E. G. Flórez Serrano, "Análisis sobre criterios de diseño geométrico del canal de entrada y cuenca para turbinas de vórtice gravitacional", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 47, ene. 2026, art. no. 4307, doi: 10.24054/rcta.v1i47.4307

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

Este artículo presenta una revisión de los estudios más relevantes sobre los canales de entrada y las cuencas empleadas en turbinas de vórtice gravitacional, con el propósito de identificar los parámetros geométricos y operativos que controlan la formación, estabilidad y eficiencia del vórtice. Se analizan configuraciones cilíndricas y cónicas, así como variaciones en la geometría e inclinación del canal de entrada, integrando resultados experimentales y numéricos para comparar su influencia en el desempeño hidráulico. Estos hallazgos permiten reconocer las tendencias de diseño más eficientes e identificar propuestas innovadoras que buscan optimizar la generación del vórtice y el rendimiento global de la turbina.

Palabras clave: Energía, canal, cuenca, turbina, vórtice.

Abstract:

This article presents a review of the most relevant studies on inlet channels and basins used in gravitational vortex turbines, with the aim of identifying the geometric and operational parameters that control the formation, stability, and efficiency of the vortex. Cylindrical and conical configurations are analyzed, as well as variations in the geometry and inclination of the inlet channel, integrating experimental and numerical results to compare their influence on hydraulic performance. These findings allow the recognition of the most efficient design trends and the identification of innovative proposals that seek to optimize vortex generation and the overall performance of the turbine.

Keywords: Energy, channel, basin, turbine, vortex.

INTRODUCCIÓN

La generación eléctrica en Colombia depende de manera significativa de la energía hidroeléctrica; sin embargo, con el fin de reducir la codependencia y diversificar la matriz energética, el gobierno promueve el desarrollo de fuentes no convencionales de energías renovables, incluyendo las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), la energía solar, eólica y de biomasa[1]. Estos proyectos de PCH permiten una generación distribuida, apoyan la electrificación regional y contribuyen a una transición energética resiliente y ambientalmente sostenible[2].

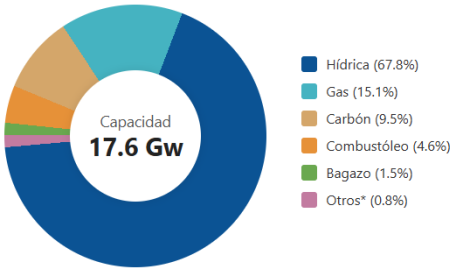

Fig. 1. *Tipos de fuentes de energía según la matriz energética nacional.*
Fuente: BBVA Research 2024 [1].

La turbina hidráulica de vórtice gravitacional (TVG, por sus siglas en español) es una tecnología de generación hidroeléctrica de baja altura y cabeza que extrae energía cinética y potencial a partir de un vórtice de agua inducido artificialmente en una cuenca. Un aspecto crítico en el desempeño de la TVG es la geometría y configuración del canal de entrada, el cual conduce el flujo de agua de la fuente de forma tangencial hacia la cámara de vórtice o cuenca, garantizando una formación eficiente del vórtice y una máxima conversión de energía[3].

El agua de la fuente se canaliza desde el borde y se conduce hacia la cuenca mediante un canal de entrada abierto, el cual es responsable de dirigir tangencialmente el flujo de agua hacia la cuenca. En la cuenca se genera un vórtice inducido por gravedad, y la energía cinética del agua es extraída por una turbina de eje vertical ubicada en el centro del vórtice, cuyo rotor gira coaxialmente con este para aprovechar dicha energía cinética[4].

El canal de entrada puede construirse como un canal horizontal o inclinado, y en algunos casos puede ser sustituido por una tubería para facilitar su transporte e instalación. El ancho del canal entre ambos extremos puede ser diferente o el mismo[5].

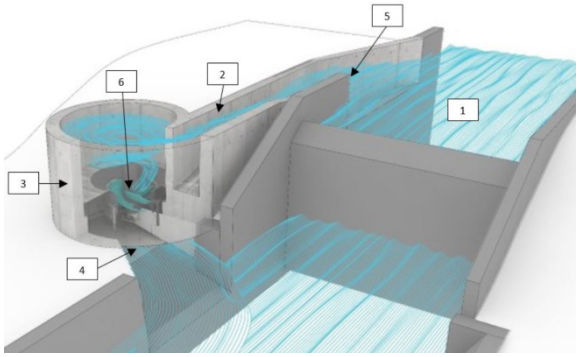

Fig. 2. *Partes de una turbina de vórtice gravitacional.*
Fuente: Velásquez, L., Chica, E. and Posada, J. [4]

En la Fig. 2 se representa el sistema de la TVG, siendo el 1 el canal de aproximación en donde el caudal se conduce de manera controlada hacia la estructura. El (2) define el canal de entrada que guía el flujo hacia la cuenca con una trayectoria envolvente, regulando la dirección y la distribución de velocidades. El (3) identifica la cuenca que asegura su correcta transición hacia la zona de formación del vórtice, mientras que el (4) señala el orificio de descarga, por donde el agua abandona el sistema tras transferir energía al rotor. La (5) muestra la captación del canal, y finalmente el (6) corresponde al rotor encargado de convertir la energía hidráulica en potencia mecánica[6].

La configuración geométrica del canal de entrada es ampliamente reconocida como un factor crítico que influye en la eficiencia hidráulica y en la formación del vórtice en las TVG. Los primeros estudios experimentales y las implementaciones en campo establecieron que la entrada tangencial del flujo, inducida por el canal, es esencial para la formación de un vórtice estable de superficie libre dentro de la cuenca, afectando directamente la extracción de energía y el desempeño de la turbina[7].

Los avances recientes se han centrado en la realización de análisis paramétricos, empleando tanto montajes experimentales

como simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) con el fin de definir configuraciones óptimas entre el canal y la cuenca [8]. Velásquez et al. realizaron una investigación numérica comparando entradas tangenciales, envolventes y tuberías directas, revelando que un canal tangencial envolvente, combinado con una cuenca cónica, produce vórtices más simétricos y estables, con una mayor energía cinética en el núcleo [9]. De manera similar, estudios demostraron que la entrada envolvente, especialmente cuando el ancho del canal es aproximadamente la mitad de la altura de la cuenca, mejora la circulación del vórtice [10].

Los parámetros geométricos óptimos, tales como las relaciones ancho-diámetro (w/D) y altura-diámetro (h/D), así como el ángulo de envolvimiento de la entrada, han sido determinados en estudios anteriores mediante en diseños de experimentos y metodologías de superficie de respuesta, brindando configuraciones con w/D entre 0.2–0.3 y ángulos de envolvimiento cercanos a 180° que favorecen una transferencia eficiente de energía con pérdidas hidráulicas mínimas[4],[11]. Además, la conicidad de la cuenca y la alineación precisa del canal influyen adicionalmente en la estabilidad del vórtice, como lo demuestran estudios avanzados de CFD que aplican modelos de turbulencia para capturar la estructura del flujo[12].

La cuenca es uno de los componentes con mayor número de estudios, enfatizando la modificación de su geometría y evolucionando de configuraciones cilíndricas a cónicas, ajustando los parámetros característicos de cada forma. Diversos estudios como el de Khan[13]concluyen que en las cuencas de forma cilíndrica la reducción del diámetro provoca un incremento en el nivel del agua dentro de la misma, aunque simultáneamente disminuye la altura del cono de aire. Por el contrario, un incremento excesivo en el diámetro de la cuenca genera pérdidas significativas por fricción, lo que permite que una fracción del flujo se deslice a lo largo del fondo sin contribuir eficientemente al proceso de conversión de energía[14].

La presente investigación abordará una revisión de los estudios recientes relacionados con las turbinas de vórtice gravitacional y sus parámetros de diseño, partiendo desde el diseño geométrico en su sistema de canal de entrada y la forma de la cuenca que evidencie mejor desempeño en la formación del vórtice y aprovechamiento de la energía. El objetivo principal es estudiar y proponer un modelo innovador de canal de entrada y cuenca que permita optimizar la generación del vórtice, incorporando mejoras geométricas basadas en los avances y resultados reportados en la literatura científica actual. Esta revisión fomentará la integración de criterios técnicos y diseños que potencien la eficiencia y estabilidad del vórtice, contribuyendo así al desarrollo de tecnologías más efectivas para la generación de energía hidráulica de bajo impacto.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El funcionamiento de las TVG está regido por la hidráulica de canales abiertos y la dinámica de vórtices dentro de una cuenca confinada. La geometría y alineación del canal de entrada inducen directamente un componente de velocidad tangencial que inicia y mantiene el vórtice de superficie libre, formando el núcleo del proceso de extracción de energía[4]. El diseño del canal debe garantizar una redirección eficiente del flujo, desde un movimiento lineal hacia un movimiento rotacional, con pérdidas mínimas de energía, por lo que resulta fundamental optimizar parámetros como el ancho del canal (w), la altura (h), el ángulo de entrada y la longitud de envolvimiento (L)[15]. La generación de vórtices y el comportamiento del flujo en sistemas hidráulicos, como las turbinas de vórtice gravitacional, se modelan comúnmente mediante las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, incluyendo las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. Estas describen el movimiento de fluidos viscosos e incompresibles y constituyen la base de las simulaciones numéricas. Los modelos de turbulencia, como el ampliamente utilizado modelo k-ε y k-ω se emplean para aproximar los efectos de los remolinos turbulentos sobre el campo de flujo medio y en las paredes, permitiendo predecir las distribuciones de velocidad, la formación de vórtices y los gradientes de presión dentro de la cámara de descarga o cuenca y el canal de entrada[16].

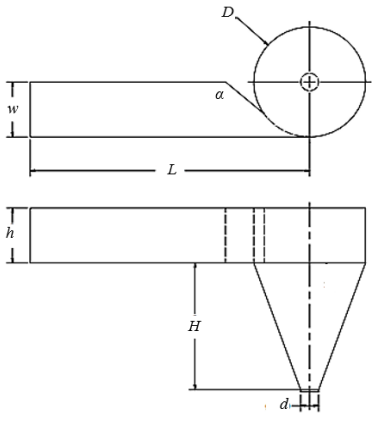

Fig. 3. *Parámetros geométricos de la turbina de vórtice gravitacional (GVHT).*
Fuente: R. Gómez. Et al. [15]

La generación de vórtices y el comportamiento del flujo de fluido en los sistemas hidráulicos están regidos por las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, principalmente las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho u) = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación establece que la masa del fluido se conserva a lo largo del tiempo. Para fluidos incompresibles se simplifica a:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

lo que significa que la divergencia del campo de velocidades u es cero, garantizando así un flujo incompresible.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (3)$$

Donde:

u= Vector de velocidad del fluido

t= Tiempo

ρ= Densidad del fluido

p= Presión

μ= Viscosidad dinámica

g= Gravedad

Esta ecuación representa el balance de fuerzas actuando sobre una partícula del fluido, incluyendo la inercia, presión, viscosidad y fuerzas gravitacionales.

En la formación del vórtice y cómo se comporta el mismo, dentro del marco de la búsqueda del aprovechamiento de la energía que este genera, se describe la ecuación de transporte de vorticidad.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (u \bullet \nabla)\,\omega = (\omega \bullet \nabla)\,u + v\nabla^2 \omega \quad (4)$$

Donde $\frac{\mu}{\rho}$ es la viscosidad cinemática. Esta es la ecuación que evidencia cómo la vorticidad es transportada y difundida dentro del fluido. En un vórtice libre, la velocidad tangencialv_(θ)=(K)/(r) varía inversamente proporcional al radio del recipiente en donde se genera. Siendo K una constante relacionada a la circulación.

En el contexto de un vórtice forzado, el fluido rota como un cuerpo sólido, por lo que la velocidad tangencial varía linealmente con el radio.

$$v_\theta = \omega r \quad (5)$$

En donde ω es la velocidad angular.

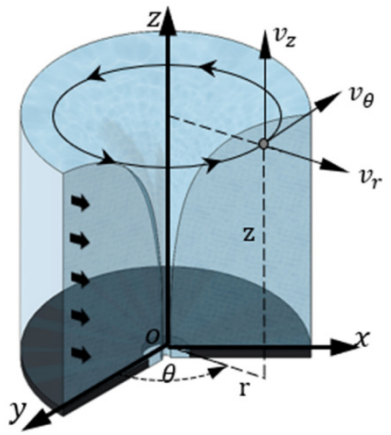

Fig. 4. *Física de formación del vórtice.*
Fuente: Dhakal, et al. [16].

Estos comportamientos gobiernan la distribución de velocidad en diferentes tipos de vórtices encontrados en turbinas

hidráulicas.

Los modelos de turbulencia descritos con anterioridad (k-ε y k-ω) son ampliamente utilizados como modelos de turbulencia de dos ecuaciones, basados en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds. Ambos modelos introducen dos ecuaciones de transporte adicionales para representar los efectos de la turbulencia en los flujos de fluido, lo que permite el cierre de las ecuaciones RANS y la simulación práctica de fenómenos turbulentos en aplicaciones de ingeniería[17].

El modelo de k-ε tiene como principio fundamental el cálculo de la viscosidad turbulenta a partir de *k* y ε, bajo el supuesto de turbulencia isotrópica y con base en constantes empíricas. El modelo k-ε es robusto y generalmente adecuado para flujos totalmente desarrollados, capas de cizalla libre y flujos alejados de las paredes. Sin embargo, su precisión disminuye en casos con gradientes de presión adversos, fuertes separaciones o en regiones cercanas a las paredes, a menos que se utilicen funciones de pared o variantes mejoradas (como el k-ε realizable o el k-ε RNG).

Sus ecuaciones de transporte se definen como (6) y(7):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (u \bullet \nabla)\, k = P_k - \epsilon + \nabla \bullet \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] \quad (6)$$

$$(\partial \epsilon)/(\partial t) + (u \cdot \nabla)\epsilon = C_(1\epsilon)(\epsilon)/(k) P_(k) - C_(2\epsilon)(\epsilon\hat{}(2))/(k) + \nabla \cdot [(v + (v_(t))/(\sigma_(\epsilon)))\nabla \epsilon] \quad (7)$$

Donde Pk es el término de producción de turbulencia y vt es la viscosidad turbulenta, siendo los demás términos las constantes empíricas.

El modelo k-ω generalmente ofrece una mayor precisión en la región cercana a la pared en comparación con el modelo k-ε, ya que ω se ve menos afectado por la distancia a la pared y mantiene su validez cerca de las fronteras. Es especialmente eficaz para simular flujos con capas límite, separación y superficies complejas. Para una aplicabilidad más amplia y una mayor estabilidad en flujos de cizalladura libre, la variante Shear Stress Transport (SST) k-ω combina los enfoques k-ε y k-ω, logrando un rendimiento óptimo en todo el dominio del flujo[17].

Las ecuaciones de transporte para este modelo son:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (u \cdot \nabla)k = P_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot [(\nu + \sigma_k \; v_t) \nabla k] \quad (8)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (u \cdot \nabla)\omega = \alpha \left(\frac{\omega}{k}\right) P_k - \beta \; \omega\hat{}2 + \nabla \cdot [(\nu + \sigma_\omega \; v_t) \nabla \omega] \quad (9)$$

Donde α, β, β*, σk, σω son constantes empíricas del modelo, y el término de producción Pk y la viscosidad turbulenta se definen de manera similar[18].

METODOLOGÍA

Rahman et al.[19]realizaron un análisis integral sobre el efecto de la inclinación del canal en el comportamiento del flujo en sistemas de vórtice gravitacional, evaluando ángulos de inclinación de 0°, 30° y 60°. Su estudio incluyó tanto observaciones experimentales como simulaciones numéricas, con el fin de analizar cómo dichos ángulos influían en variables hidráulicas clave, tales como los perfiles de velocidad del flujo, la formación del vórtice y la eficiencia global de la turbina.

Al incrementar progresivamente el ángulo de inclinación, observaron cambios significativos en el desarrollo y la intensidad del vórtice dentro de la cuenca; por ejemplo, ángulos de inclinación mayores tendieron a promover un chorro de entrada más concentrado y una mayor velocidad tangencial en el núcleo del vórtice, mientras que los ángulos menores facilitaron una entrada más amplia y menos concentrada.

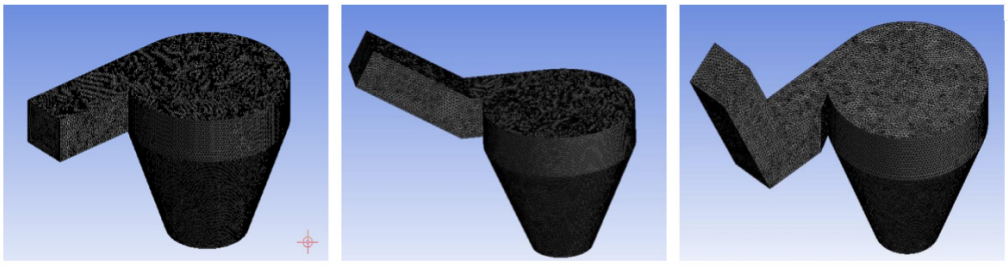

Fig. 5. *Canales de entrada con inclinación en diferentes ángulos.*
Fuente: Rahman et al. [19].

Los resultados demostraron que la selección adecuada del ángulo de inclinación del canal puede ser un factor decisivo para optimizar la estabilidad del vórtice y maximizar la generación hidroeléctrica, dado que cada configuración angular modifica la distribución de velocidades y el campo de presiones dentro de la cámara del vórtice. Estos hallazgos aportan criterios geométricos valiosos para el diseño óptimo de las turbinas de vórtice gravitacional[19].

Otra configuración de entrada superior de fluido hacia la cuenca es la estudiada por Havaldar et al. Su investigación analizó dos configuraciones geométricas para el canal de entrada: un canal recto e inclinado y un canal curvo. En particular, el canal curvo seguía una trayectoria basada en la curva braquistócrona dentro de un plano vertical[20].

Esta curva, también conocida como la "curva de descenso más rápido", optimiza la trayectoria del flujo al minimizar el tiempo de recorrido de las partículas de fluido que se desplazan desde el punto más alto de la entrada del canal hasta la cuenca. Esta trayectoria optimizada permite que las partículas de fluido alcancen mayores velocidades en su trayecto hacia la cuenca, lo que favorece la formación del vórtice y mejora la eficiencia en la extracción de energía en los sistemas de vórtice gravitacional.

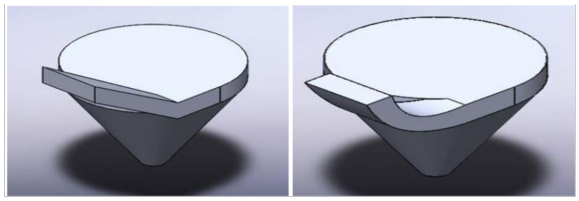

Fig. 6. *Configuraciones geométricas de canal de entrada con inclinación recta y curva.*
Fuente: Havaldar et al. [20].

Thapa et al. realizaron un estudio detallado para investigar la influencia de la geometría del canal de entrada en la formación del vórtice en una TVG de bajo salto hidráulico. En su análisis numérico, utilizaron el software ANSYS Fluent ® para simular el comportamiento del flujo bajo diferentes configuraciones geométricas. El estudio evaluó cuatro formas distintas de canal de entrada: triangular, rectangular, circular y curvada. Los resultados del análisis experimental y numérico revelaron que la formación del vórtice induce fuerzas sobre el eje de la turbina, lo cual impacta negativamente en la eficiencia operativa. Cabe destacar que el canal rectangular generó un campo de presiones altamente simétrico con valores de presión elevados, lo que indica su adecuación para sistemas de bajo salto. Sin embargo, bajo condiciones de alto salto, dicha distribución de presiones podría generar momentos flectores inesperados en el eje de la turbina, aumentando el riesgo de falla estructural.

Por el contrario, la geometría de entrada triangular demostró una eficiencia superior, al favorecer un patrón de vórtice simétrico que minimiza las fuerzas radiales. Estas fuerzas radiales son las principales responsables de inducir momentos flectores en el eje, los cuales pueden comprometer la integridad estructural. Por tanto, la geometría triangular representa un enfoque de diseño prometedor para mejorar la estabilidad mecánica y el rendimiento de las turbinas de vórtice gravitacional[21].

En términos de cuenca o cámara de descarga como algunos estudios indican, se ha demostrado como en la investigación de Sharif que en las cuencas cilíndricas la reducción del diámetro provoca un incremento en el nivel del agua dentro de la misma, lo que representa una disminución de la altura del cono de aire. En cambio, un incremento excesivo del diámetro genera pérdidas debido a la fricción, lo que lleva a que una fracción del flujo sea deslizado a lo largo del fondo sin contribuir eficientemente en la conversión de la energía[22].

De forma similar Chattha realizó estudios que se basaron en simulaciones numéricas y experimentación con cuencas de geometría cónica, lo que les ayudó a demostrar que los mejores resultados de la operación son obtenidos cuando el vórtice y el cono de aire generado alcanzan la misma altura que la cuenca, es decir, cuando esta se extiende hasta el fondo de la misma[23].

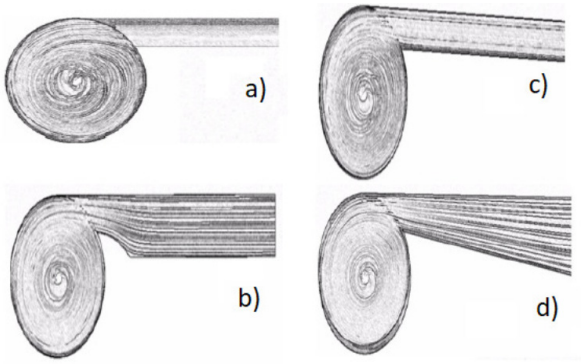

Fig. 7. *Configuraciones geométricas de canal de entrada y formación del vórtice en términos de flujo.*
Fuente: Thapa et al. [21].

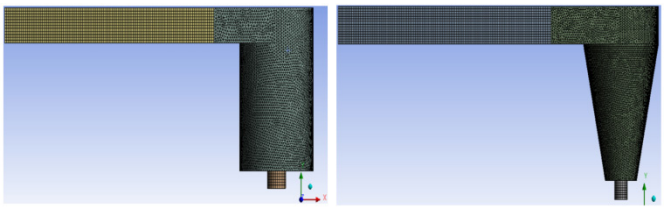

Fig. 8. *Cuencas cilíndricas y cónicas estudiadas por métodos de simulación numérica.*
Fuente: Dhakal et al. [24].

Dhakal llevaron a cabo simulaciones en una cuenca de geometría cónica, manteniendo fijos tanto la altura como el diámetro superior D, mientras modificaban el diámetro de descarga d y el ángulo del cono, parámetros que se encuentran directamente vinculados. El propósito del estudio fue preservar la relación d/D dentro del intervalo del 14 % al 18 %, dado que dicho rango favorece la formación adecuada del vórtice. Los resultados mostraron que un incremento en la inclinación de la cuenca producía mayores velocidades de flujo, alcanzándose las velocidades de salida más altas cuando la relación d/D se aproximaba al 18 %[24].

Las modificaciones propuestas por Sánchez se fundamentaron en la premisa de que la cuenca constituye el componente más crítico dentro de un sistema de turbina de vórtice gravitacional. Reconociendo la importancia de esta sección para el desempeño global del sistema, los autores implementaron ajustes específicos en la geometría del cono de descarga con el objetivo de optimizar la eficiencia hidráulica y la velocidad de salida del fluido. En particular, se incorporaron dos configuraciones geométricas distintas: una cóncava y otra convexa. Estas modificaciones fueron evaluadas mediante un montaje experimental a escala, permitiendo analizar detalladamente cómo cada diseño influye en las características del flujo y, por ende, en la eficiencia energética del sistema. Los resultados obtenidos aportan información valiosa para el diseño y mejora de TVG, evidenciando que pequeñas variaciones en la geometría pueden tener un impacto significativo en el rendimiento global[25].

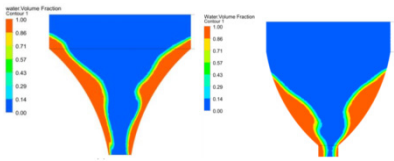

Fig. 9. *Cuencas cónicas con sección transversal cóncava y convexa.*
Fuente: Sánchez et al. [25].

Según Velásquez, en un estudio realizado mediante una metodología multiobjetivo para optimizar la geometría del sistema canal y cuenca de una TVG, se muestran avances en la formación del vórtice y la circulación alcanzada, implementando un canal envolvente que rodea la entrada a la cuenca y una cuenca cónica alargada, evidenciándose el modelo en la misma figura. Concluyeron en su estudio que la circulación y el caudal volumétrico fueron de 1.6999 [m²/s] y 0.0030 [m³/s], respectivamente. Dado que los parámetros geométricos seleccionados fueron adimensionales, estos resultados les permitieron generar nuevas geometrías[26].

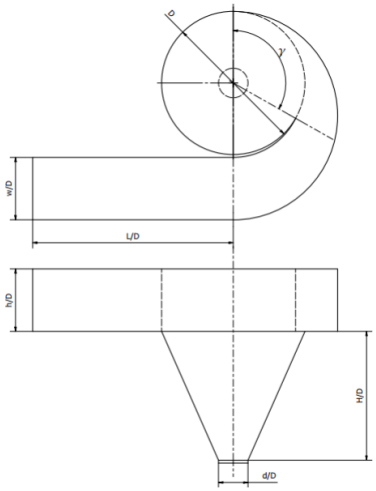

Fig. 10. *Geometría y parámetros adimensionales de canal y cuenca.*
Fuente: Velásquez et al. [24].

RESULTADOS

Los parámetros que intervienen geométricamente en el diseño afectan la formación del vórtice, la eficiencia de conversión de energía y la estabilidad del flujo dentro del sistema. Estos parámetros incluyen la geometría del canal de entrada, la forma y dimensiones de la cuenca de vórtice, la configuración del rotor y las características del canal de descarga.

Tabla 1: Parámetros geométricos estudiados según la literatura para cuenca cilíndrica

d/D	H/D	w/D	h/D	L/D
0.19	0.23	0.31	-	-
0.20	1.00	-	-	-
0.30	1.00	-	-	-
0.28	1.38	0.28	0.43	3.90
0.20	1.00	-	-	-
0.05	1.00	-	-	-
0.20	0.20	0.40	0.30	1.00
0.05	1.40	-	-	-
0.06	0.83	0.23	0.63	0.63
0.10	0.80	0.20	0.20	0.47
0.10	0.90	0.25	0.25	0.57
0.40	0.90	0.25	0.25	0.57
0.20	1.00	-	-	-
0.18	1.25	-	-	1.28
0.16	1.00	-	0.02	-

Fuente: Velásquez et al. [27]

Las tablas recopiladas sintetizan los parámetros geométricos, operativos y de desempeño reportados en estudios que analizan cuencas cilíndricas y cónicas empleadas en TVG. En ellas se concentran las relaciones adimensionales más utilizadas, obtenidos mediante simulaciones y ensayos experimentales.

Tabla 2: Parámetros geométricos estudiados según la literatura para cuenca cónica

d/D	H/D	w/D	h/D	L/D
0.15	0.83	-	-	-
0.15	2.08	-	-	-
0.17	1.42	-	-	-
0.15	0.27	0.27	1.82	0.14
0.15	1.44	0.50	2.81	0.25
0.22	1.00	0.22	3.20	0.11
0.23	0.75	0.50	4.00	0.25
0.23	0.75	0.50	4.00	0.25
0.30	0.90	0.25	5.00	0.28
0.22	1.14	0.50	4.00	0.25
0.05	1.42	0.50	2.83	0.25
0.06	0.90	0.50	1.50	0.13
0.22	1.22	0.32	0.45	-

Fuente: Velásquez et al. [27]

Estudios presentados en el International Conference on Renewable Energies and Power Quality 24 (ICREPQ'24) han planteado líneas de investigación innovadoras orientadas a optimizar la eficiencia hidráulica de las turbinas de vórtice gravitacional.

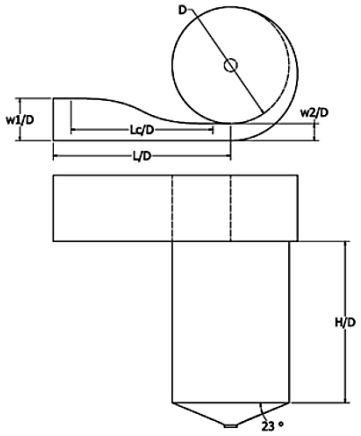

Fig. 11. *Geometría del canal y la cuenca con adaptaciones de contracción en la entrada y cuenca cónica y cilíndrica. Source: Madrid et al. [28].*

Esta propuesta tiene la incorporación de geometrías inspiradas en configuraciones tradicionalmente empleadas en túneles de viento, particularmente aquellas diseñadas para inducir perfiles de velocidad más uniformes, reducir pérdidas energéticas y controlar gradientes de presión dentro de conductos de flujo complejo. Esta adaptación geométrica busca establecer un puente

conceptual entre los diseños de cuencas cónicas y cilíndricas, integrando las ventajas que cada una ofrece en términos de estabilidad del vórtice, concentración del flujo y disipación reducida de energía.

La aproximación presentada en el ICREPQ sugiere que una geometría híbrida, derivada de los principios aerodinámicos aplicados en túneles de viento y ajustada a las exigencias hidráulicas propias de las TVG, puede favorecer la generación de un vórtice más uniforme y estable, minimizando zonas de separación o recirculación no deseadas. Asimismo, este tipo de diseño podría contribuir a disminuir las pérdidas por fricción y turbulencia excesiva, lo que resulta particularmente relevante para sistemas de baja y media carga hidráulica. En conjunto, estos desarrollos representan una alternativa prometedora para el diseño avanzado de cuencas, abriendo la puerta a nuevas configuraciones que combinan criterios aerodinámicos e hidráulicos con el fin de maximizar el rendimiento energético de las turbinas de vórtice gravitacional[28].

CONCLUSIONES

Los estudios analizados evidencian que las configuraciones basadas en cuencas cónicas presentan un desempeño mayor en términos de estabilidad del vórtice, distribución de velocidades y eficiencia global. También se ha demostrado que ciertas adaptaciones geométricas independientes de la forma de la cuenca pueden introducir mejoras sustanciales en el proceso de formación del vórtice. Estas configuraciones favorecen un ingreso más ordenado y con mayor componente tangencial, lo que intensifica la estructura del vórtice y reduce pérdidas energéticas por turbulencias indeseadas. En conjunto, los resultados sugieren que, si bien la cuenca cónica se mantiene como la opción más eficiente, su rendimiento puede potenciarse notablemente mediante un diseño adecuado del canal de entrada.

REFERENCIAS

[1] A Reyes, M P Castañeda, “Colombia necesita avanzar hacia una diversificación de fuentes de energía”, *BBVA Res.*, vol. 33, no. 2, abr. 2024, art. No. 034251, doi: 10.1109.BBVA.034251.

[2] S Álvarez, “El Desafío Energético de Colombia y el Rol Crucial de las PCH”, *GSV Ingeniería*, vol. 8, no. 2, may. 2024, art. No. 002921, doi: 10.1109.GSV.002921.

[3] DF Ayala, JG Criollo, “Implementación de una turbina hidráulica de vórtice de agua gravitacional,” *Rev. UIS Ingenierías*, vol. 22, no. 2, jul. 2023, art. No. 13678, doi: 10.1109.UIS.13678.

[4] L. Velásquez, E. Chica, J. Posada, “Implementación de una turbina hidráulica de vórtice de agua gravitacional en Colombia: potencial hidroeléctrico y perspectivas,” *Rev. UIS Ingenierías*, vol. 22, no. 3, pp. 39–54, jul. 2023, doi: 10.18273/revuin.v22n3-2023004.

[5] M. Ayala, H. Benavides, C. Riba, “Sistema de generación energía sumergible basado en un vórtice gravitacional con sifón para comunidades aisladas”, Rev. Técnica “energía”, no. 12, ene. 2016, pp. 304–312, doi: 10.1109.CENACE.0055.

[6] D. Fernández, J. Gómez, “Implementación de una turbina hidráulica de vórtice de agua,” *Rev. UIS Ingenierías*, vol. 22, no. 2, jul. 2023, art. No. 13678, doi: 10.1109.UIS.13678.

[7] L. Velásquez, J. P. Rengifo, J. Urrego, A. Rubio-Clemente, E. Chica, “Experimental Assessment of Hydrodynamic Behavior in a Gravitational Vortex Turbine with Different Inlet Channel and Discharge Basin Configurations”, *Energies*, vol. 17, no. 22, Nov. 2024, art. 5773, doi: 10.3390/en17225773.

[8] L. Velásquez, A. Posada, E. Chica, “Optimization of the basin and inlet channel of a gravitational water vortex hydraulic turbine using the response surface methodology”, *Renewable Energy*, vol. 187, 2022, pp. 508-521.

[9] L. I. Velásquez García, A. Rubio-Clemente, E. Chica, “Numerical analysis of the inlet channel and basin geometries for vortex generation in a gravitational water vortex power plant”, Galería TDEA, 2020.

[10] V. J. Alzamora Guzmán, J. A. Glasscock, “Analytical solution for a strong free-surface water vortex describing flow in a full-scale gravitational vortex hydropower system”, *Water Sci. Eng.*, vol. 14, no. 4, Mar. 2021, art. no. 72, doi: 10.1016/j.wse.2021.03.004.

[11] Abdul S. Saleem, Taqi A. Cheema, Rizwan Ullah, Sarvat M. Ahmad, Javed A. Chattha, Bilal Akbar, Cheol W. Park, “Parametric study of single-stage gravitational water vortex turbine with cylindrical basin”, *Energy*, vol. 200, 2020, art. 117464, doi: 10.1016/j.energy.2020.117464.

[12] E. Septyaningrum, R. Hantoro, N. K. Mouti, W. R. Rahayu, S. Sutardi, “Gravitational Vortex Water Turbine (GVWT) conical basin design: the effects of cone angle and outlet diameter on vortex characteristics”, *J. Mech. Eng. (JMechE)*, vol. 21, no. 1, ene. 2024, pp. 177–198, doi: 10.24191/jmeche.v21i1.25366.

[13] N. H. Khan, T. A. Cheema, J. A. Chattha, C. W. Park, “Effective basin–blade configurations of a gravitational water vortex turbine for microhydropower generation”, *J. Energy Eng.*, vol. 144, no. 4, Abr. 2018, art. 04018042, doi: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000558.

[14] S. R. Sreerag, C. K. Raveendran, B. S. Jinshah, “Effect of outlet diameter on the performance of gravitational vortex turbine with conical basin”, *J. Scientific & Engineering Research*, vol. 7, no. 4, 2016, pp. 457–463.

[15] R. Gómez, L. Velásquez, A. Rubio-Clemente, E. Chica, “Design Optimization of an Inclined Inlet Channel, an Archimedean Spiral Basin, and a Discharge Cone in a Gravitational Vortex Turbine”, *Processes*, vol. 13, no. 5, May 2025, art. 1533, doi: 10.3390/pr13051533.

[16] R. Dhakal, T. R. Bajracharya, S. R. Shakya, B. Kumal, S. Williamson, K. Khanal, S. Gautam, D. P. Ghale, “Computational and Experimental Investigation of Runner for Gravitational Water Vortex Power Plant”, en Proc. 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, 2017, pp. 365–373, doi: 10.1109/ICRERA.2017.8191087.

[17] T. A. Cheema, N. H. Khan, C.-W. Park, "CFD-based performance evaluation of a gravitational water vortex turbine with optimized basin geometry", *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 4, Apr. 2019, pp. 1771–1782, doi: 10.1007/s12206-019-0329-0.

[18] D. C. Wilcox, "Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models", *AIAA J.*, vol. 26, no. 11, Nov. 1988, pp. 1299–1310, doi: 10.2514/3.10041.

[19] M. M. Rahman, J. Jian-Hong, F. Mohd Tamiri, "Effects of Inlet Flow Rate and Penstock's Geometry on the Performance of Gravitational Water Vortex Power Plant", Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag. (IEOM), 2018.

[20] S. N. Havaldar, P. A. Gadekar, S. M. Baviskar, N. M. Jadhav, S. H. Inamdar, "Analyzing Geometries for Inlet Flow Channels to Gravitational Water Vortex Chamber", Int. J. Res. Eng. App. & Manag. (IJREAM), Special Issue AMET-2019.

[21] Thapa, D., Mishra, A., & Sarath, K. S., "Effect of Inlet Geometry in the Quality of Vortex Formed Using Vortex Flow Channel", *Int. J. Mech. Eng. Technol. (IJMET)*, vol. 8, no. 5, 2017, pp. 515–524.

[22] A. Sharif, C. Siddiqi, et al., "Enhancing the performance of Gravitational Water Vortex Turbine", Journal of Technology Innovations & Energy, 2023, donde también se discuten efectos geométricos de la cuenca.

[23] J. A. Chattha, T. A. Cheema, N. H. Khan, "Numerical investigation of basin geometries for vortex generation in a gravitational water vortex power plant", Proc. 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC), IEEE, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/IREC.2017.7926028.

[24] S. Dhakal, A. B. Timilsina, R. Dhakal, D. Fuyal, T. R. Bajracharya, H. P. Pandit, "Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 662-669, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.030.

[25] A. R. Sánchez, J. A. Sierra Del Rio, A. J. Guevara-Muñoz, J. A. Posada, "Numerical and Experimental Evaluation of Concave and Convex Designs for Gravitational Water Vortex Turbine", *J. Adv. Res. Fluid Mech. Thermal Sci.*, vol. 64, no. 1, 2019, pp. 160-172, doi: 10.37934/arfmts.64.1.160172.

[26] L. Velásquez, A. Posada, & E. Chica, "Surrogate modeling method for multi-objective optimization of the inlet channel and the basin of a gravitational water vortex hydraulic turbine," *Appl. Energy*, vol. 330, 2023, art. 120357, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120357.

[27] L. Velásquez, A. Posada, E. Chica, "Optimization of the basin and inlet channel of a gravitational water vortex hydraulic turbine using the response surface methodology", *Renew. Energy*, vol. 187, no. (–), Apr. 2022, pp. 508-521, doi: 10.1016/j.renene.2022.01.113.

[28] E. D. Madrid, J. C. Serrano, E. G. Flórez, "Optimization for the inlet channel and basin of a gravitational vortex turbine through the maximization of circulation", *RE&PQJ*, vol. 22, no. 5, Ago. 2024, art. 4021, doi: 10.52152/4021.

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Eduardo David Madrid Carrillo, Juan Carlos Serrano Rico, Elkin Gregorio Flórez Serrano.

Redacción - revisión y edición: Eduardo David Madrid Carrillo, Juan Carlos Serrano Rico, Elkin Gregorio Flórez Serrano.