TecnoLógicas

# Influencia de la velocidad de entrada en el comportamiento de vórtices gravitacionales de agua para generación de energía eléctrica

## Effect of the Inlet Velocity on the Behavior of Gravitational Water Vortex for Electricity Generation

Daniel Augusto Suárez Castelblanco[1]; Jhon Fredy Hincapié Montoya[1]; Iván David Patiño Arcila[1]; José Alejandro Posada Montoya[1]

[1]Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín-Colombia

Correspondencia: alejandro.posada@pascualbravo.edu.co

**Recibido:** 16 Julio 2024 **Aceptado:** 12 Febrero 2025 **Disponible:** 26 Marzo 2025

**Cómo citar / How to cite**

D. A. Suárez Castelblanco, J. F. Hincapié Montoya, I. D. Patiño Arcila, and J. A. Posada Montoya, "Influencia de la velocidad de entrada en el comportamiento de vórtices gravitacionales de agua para generación de energía eléctrica," *TecnoLógicas*, vol. 28, no. 62, e3171, 2025. https://doi.org/10.22430/22565337.3171

CC BY NC SA

## Resumen

El cambio climático es impulsado principalmente por el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, las energías renovables, como la hidroeléctrica, causan deforestación y desplazamiento de la población, y su energía no suele llegar a zonas remotas. Las plantas de potencia por vórtice gravitacional de agua (GWVPP, por sus siglas en inglés) son una alternativa hidroeléctrica que no altera el cauce y caudal de los ríos y pueden usarse en áreas desconectadas de la red eléctrica. Este trabajo se enfocó en estudiar la influencia de la velocidad de entrada en la morfología de vórtices gravitacionales de agua (GWV, por sus siglas en inglés) y sus propiedades fluidodinámicas como presión, velocidad y fracción volumétrica. La metodología empleada consistió en el uso del software de CFD OpenFOAM para hacer las simulaciones, donde se cambió la velocidad de entrada del canal y se graficaron los contornos de magnitud de velocidad, presión estática y fracción volumétricas en la cuenca. Los resultados de la investigación permitieron encontrar que vórtices bien desarrollados se obtienen a partir de una velocidad de entrada de 0.03 m/s, mientras que las velocidades más altas (0.05 m/s y 0.06 m/s) producen contornos de magnitud de velocidad más uniformes. Aunque todos los vórtices tienen un núcleo de aire en la descarga, las velocidades de entrada altas inducen una mayor probabilidad de formación de vórtices débiles. Finalmente, se concluye que velocidades altas también conllevan mayores fracciones volumétricas al interior de la cuenca, lo cual puede ser práctico para sistemas de generación de energía por vórtices de agua debido a su mayor inercia. La velocidad de entrada también influye en el comportamiento de la altura, curvatura y velocidad tangencial de la superficie libre con el radio.

## Palabras clave

Dinámica de fluidos computacional, energía renovable, flujo volumétrico, simulación numérica, vórtice gravitacional.

## Abstract

Climate change is primarily driven by the use of fossil fuels. However, renewable energies, such as hydropower, cause deforestation and population displacement, and their energy usually does not reach remote areas. Gravitational Water Vortex Power Plants (GWVPPs) are a hydroelectric alternative that does not alter the course and flow of rivers and can be used in areas not connected to the power grid. This work focused on studying the influence of the inlet velocity on the morphology of water gravitational vortices (GWVs) and their fluid-dynamic properties such as pressure, velocity, and volumetric fraction. The methodology employed consisted of using the OpenFOAM CFD software to run the simulations, where the channel input velocity was changed and the contours of velocity magnitude, static pressure, and volumetric fraction in the basin were plotted. The results of the investigation showed that well-developed vortices were obtained from an input velocity of 0.03 m/s, while the higher speeds (0.05 m/s and 0.06 m/s) produced more uniform velocity magnitude contours. Although all vortices have an air core at discharge, high inlet speeds induce a greater likelihood of weak vortex formation. Finally, the conclusions of this work are that high speeds also lead to higher volume fractions inside the basin, which can be practical for water vortex power generation systems due to their higher inertia. The input velocity also influences the behavior of the height, curvature, and tangential speed of the free surface with the radius.

## Keywords

Computational fluid dynamics, renewable energy, volumetric flow rate, numerical simulation, gravitational vortex.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles han sido la mayor fuente de energía que satisface las necesidades humanas durante muchos años. Aproximadamente un 82 % de la oferta total de energía primaria corresponde a los combustibles fósiles, y un 99 % de las emisiones de $CO_2$ es producido por la quema de estos combustibles [1]. Sin embargo, estas fuentes de energía han contribuido negativamente al cambio climático; por ejemplo, se estima que en 2022 fueron responsables del 65 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo [2]. Los sistemas de energías renovables como las plantas hidroeléctricas brindan una considerable cantidad de energía, pero las grandes represas requieren inundar áreas forestales, lo cual genera deforestación y desplazamiento humano y animal. Además, las grandes plantas de generación de electricidad comúnmente alcanzan a suplir las necesidades energéticas de ciudades con un gran número de personas, pero no las de comunidades alejadas. La opción de plantas de potencia por vórtices gravitacionales de agua (GWVPP, por sus siglas en inglés) ofrece una alternativa hidroeléctrica que no requiere alterar significativamente el caudal y cauce del río, además de poder ser usada en zonas no interconectadas a las redes eléctricas.

Las variables más influyentes en las mediciones de potencia, velocidad angular y torque de GWVPP son principalmente los parámetros geométricos del canal y la cuenca, y la velocidad o flujo volumétrico de entrada [3]. Esta última variable influye en la velocidad tangencial del vórtice, y el nivel del agua del canal y la cuenca. La velocidad de entrada en el vórtice es una variable importante debido a que: si esta se modifica, lo hace también la altura del agua dentro del canal y la cuenca, influyendo en la formación de vórtices fuertes o débiles.

En estudios experimentales se ha determinado que las alturas del nivel del agua en la cuenca y el canal son directamente proporcionales a los caudales de entrada. En el estudio [4] se analiza la influencia del flujo volumétrico de entrada en la altura de la cabeza de agua en el canal, pero no se profundiza cómo es el comportamiento del vórtice, esto es, si es un vórtice fuerte o débil. Además, existen estudios experimentales comparados con simulaciones CFD que muestran la tendencia a un incremento en el nivel del agua, como la investigación [5], en la cual se consideraron tres caudales de entrada con tres anchos (bi) diferentes en la entrada para una cuenca cilíndrica, y se observaron las alturas (h) del nivel del agua resultante. Esto se hizo en ensayos experimentales y simulaciones de CFD.

En el estudio [6] también hacen una comparación experimental con simulaciones CFD. En este estudio usan una cuenca cilíndrica y se varía la velocidad de entrada, observando cómo cambia la altura del nivel del agua en la cuenca. Se midió la velocidad de salida en la descarga del sistema, al igual que la altura del nivel del agua. Además, se estimó la velocidad del agua

agregando pequeñas esferas al flujo, y capturando fotografías con una cámara de alta velocidad Phantom V710. En [6] se puede ver la comparación entre las velocidades de salida experimentales y computacionales.

Otras investigaciones consideran la turbina al interior de la cuenca, cambiando las dimensiones de la turbina, así como el caudal de entrada. Este es el caso [7], donde se utilizó una cuenca cilíndrica, con una turbina con tres álabes planos verticales, de radio 0.146 m, y se variaron las longitudes y anchos de entrada de la cuenca. En este estudio se observa el cambio de desempeño en la eficiencia de una tubería Penstock con diferentes dimensiones al cambiar el caudal de entrada.

En el estudio [8] se hace un análisis similar. Sin embargo, se utiliza una cuenca cilíndrica con tres turbinas de flujo radial, donde la turbina 1 tiene álabes rectos, la 2 tiene álabes semi curvos y la 3 tiene álabes curvos. El cambio en el desempeño de las turbinas se analizó variando la velocidad de entrada.

Las investigaciones de [9] utilizaron una cuenca cilíndrica con tres flujos volumétricos de entrada (0.0019 $m^3/s$, 0.00285 $m^3/s$ y 0.00379 $m^3/s$) y observó cómo éstos afectaban el rendimiento de una turbina de flujo radial de geometría fija. En [9] se pueden apreciar las pérdidas hidráulicas del sistema, donde se pueden discernir las pérdidas por el tanque (*hT*), las pérdidas por la salida del tanque (hTo), las pérdidas por la fricción en el tanque (*hTf*), las pérdidas por la turbina (*hR*), y las pérdidas por fricción en la turbina *hRf*.

Todas las investigaciones anteriores mostraron una considerable pérdida de rendimiento para caudales demasiado altos, lo cual indica que existe un flujo volumétrico óptimo de entrada para GWVPP. El caudal de entrada también puede afectar el torque generado, como se muestra en la investigación [10], que utilizó una cuenca cilíndrica con una turbina de flujo radial con álabes curvos. En la Figura 6 de [10] se encuentran las dimensiones de la turbina utilizada. Este estudio muestra una relación casi lineal del caudal ingresado con el torque generado.

Como se ha observado, los caudales de entrada influyen de manera significativa en el comportamiento del vórtice y en las propiedades dependientes de la velocidad y presión del agua en la cuenca. Los estudios realizados por [11] utilizaron una cuenca con entrada tangencial y otra con entrada evolvente, tomando una velocidad de entrada de 0.1 m/s. En uno de los vórtices originados con la cuenca con entrada tangencial, los autores obtuvieron vórtice débil (núcleo de aire no es continuo hasta la descarga). En uno de los casos con la cuenca con entrada evolvente, los autores obtuvieron un vórtice fuerte pero inestable (núcleo de aire continuo, pero no de sección uniforme en la descarga).

Otros estudios buscan encontrar el flujo volumétrico de entrada óptimo para lograr las mayores velocidades tangenciales en la cuenca, maximizando de esa forma la circulación, como es el caso del informe técnico [12], en el cual encontraron un rango de velocidades entre 0.04 m/s y 0.05 m/s para obtener vórtices fuertes en una geometría específica. Además, la geometría de la cuenca influye en la morfología del vórtice y en las velocidades tangenciales. Esto se ve reflejado en la investigación [13], donde se encontró el mayor aumento de la velocidad en la cuenca al utilizar un ángulo de estrechamiento de 14° en la entrada de una cuenca cónica.

En este estudio se buscó investigar cómo la velocidad de entrada del agua al canal de vórtices gravitacionales afecta la formación de vórtices fuertes y débiles, teniendo en cuenta la forma del vórtice, y los perfiles de altura y velocidad tangencial de la superficie libre en la dirección radial. Estos resultados permitirán entender mejor la formación del vórtice y cómo se deben diseñar las turbinas para aprovechar mejor la energía de éste.

## 2. METODOLOGÍA

Mediante el software CFD OpenFOAM se hicieron simulaciones en estado transitorio de una cuenca cilíndrica y un canal con envolvente del GWVPP. Se usó el modelo de turbulencia k-ω SST, debido a que, en la mayoría de la literatura consultada, es el más utilizado en sistemas

GWVPP, y para fines prácticos, se pueden obtener errores relativos menores al 1 %. El error relativo hace referencia a la diferencia entre el caudal de salida y el caudal de entrada. En las simulaciones se varió la velocidad de entrada para evaluar su efecto en la formación del vórtice en el interior de la cuenca. Se utilizó agua y aire como fluidos de trabajo (análisis multifásico), los cuales se consideraron incompresibles debido a que las velocidades alcanzadas en la cuenca corresponden a un número de Mach muy pequeño.

Se inició construyendo la geometría del canal, la cual se dibujó en el software FreeCAD, generando un conjunto de superficies en formato STL, utilizadas para implementar las condiciones de fronteras en cada una de ellas. Esta geometría optimizada se obtuvo de [3], como se puede observar en la Figura 1a. En el proceso de mallado, se utilizó las utilidades blockMesh; para crear una malla base, y snappyHexMesh; para ajustar la malla a las superficies del canal. En las superficies de las paredes se implementó un mayor nivel de refinamiento, dado que se presentan mayores gradientes de velocidad del agua, tal como se puede apreciar en la Figura 1b. Además, se seleccionaron tres tipos de mallas, cada una con una cantidad de elementos diferentes. Como condiciones de frontera, se ingresaron a la entrada velocidades constantes de 0.01 m/s, 0.02 m/s, 0.03 m/s, 0.04 m/s, 0.05 m/s y 0.06 m/s, paredes de no deslizamiento, abierto a una presión atmosférica, y en la salida un gradiente de velocidad igual a cero, tal como puede apreciarse en la Figura 2.

Se usó un clúster computacional con 64 procesadores por simulación, 256 Gigabytes de memoria RAM por cada servidor de tipo DDR4-3200. Los tiempos de flujo para que las simulaciones se estabilizaran variaron según el caudal, con valores establecidos para los residuales de 2.7x10-8 en promedio, tardando un poco más de 50 horas por cada simulación. Este tiempo de cómputo se debe a la cantidad de celdas y el uso óptimo de los núcleos del procesador. El tiempo total en las simulaciones fue de 120 s, con un paso de tiempo de 0.005 s.

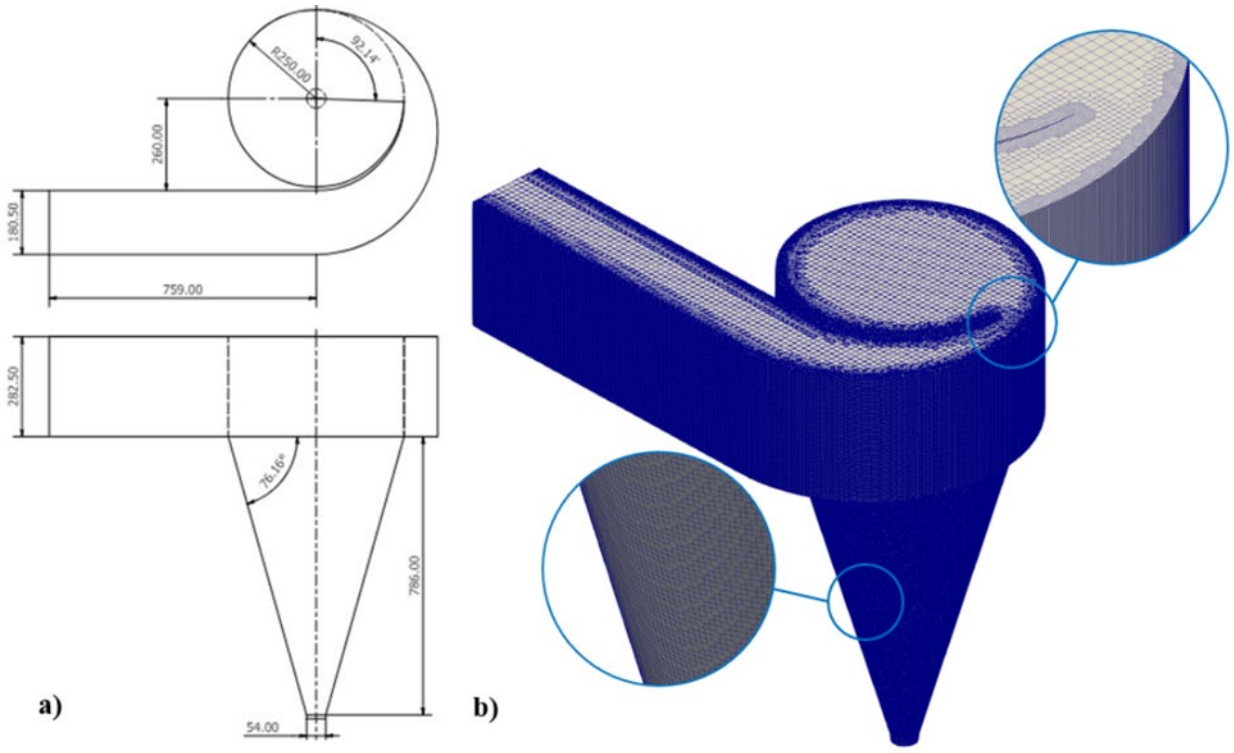


**Figura 1.** a) Dimensiones en mm de la geometría optimizada del canal y la cuenca, b) Malla de la geometría. Fuente: elaboración propia.

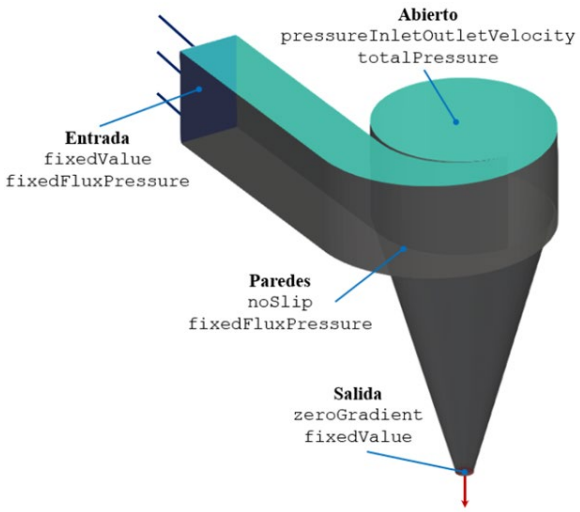


**Figura 2.** Condiciones de frontera. Fuente: elaboración propia.

Para la selección de la cantidad óptima de celdas, se hizo un estudio de independencia de malla, el cual consiste en definir una variable clave de salida en la simulación, que en este caso fue el flujo volumétrico a la salida de la cuenca. Se comienza con utilizar una simulación con una malla tosca, que actúe como base para simulaciones con mayor cantidad de celdas. Luego, se mide el flujo volumétrico a la salida de la cuenca, y se compara con el caudal de entrada, obteniendo un error relativo para cuantificar el desbalance de masa entre la entrada y la salida, el cual debe ser muy pequeño. La velocidad de entrada usada en este estudio fue de 0.03 m/s. En la Tabla 1 se pueden observar los resultados para las tres mallas evaluadas.

**Tabla 1.** Error relativo con respecto a caudales de entrada y salida. Fuente: elaboración propia.

| Número de celdas | Flujo volumétrico de entrada ($m^3/s$) | Flujo volumétrico de salida ($m^3/s$) | Error relativo (%) |
|---|---|---|---|
| 83.890 | 0.00152972 | 0.0015275 | 0.145125 |
| 1.486.214 | 0.0015291 | 0.0015315 | 0.156955 |
| 2.060.616 | 0.0015301 | 0.0015278 | 0.150317 |

Después de observar las variaciones del flujo volumétrico a la salida, se grafica el número de celdas contra dicho flujo con el fin de evaluar la influencia de la cantidad de celdas en los cambios del mismo. En la Figura 3 se puede apreciar que dicho cambio es muy pequeño.

De forma adicional, se hace uso de otro método de análisis de independencia de malla, la extrapolación de Richardson, que busca definir el número adecuado de celdas con base en el cambio de la variable de interés, que en este caso es el flujo volumétrico de salida. Primero se seleccionan tres mallas, tosca (1), media (2), y fina (3), y luego se calcula la constante de refinamiento (r) usando (1). En este caso fi y fi+1 es el número de celdas de cualquier malla "i" y la posterior más refinada "i+1". Primero se calcula r para las mallas 1 y 2, y luego para las mallas 2 y 3. Cabe resaltar que como son tres mallas, se hace el promedio entre los resultados de r, y este valor se utiliza como la constante de refinamiento.

$$r = \frac{f_{i+1}}{f_i} \tag{1}$$

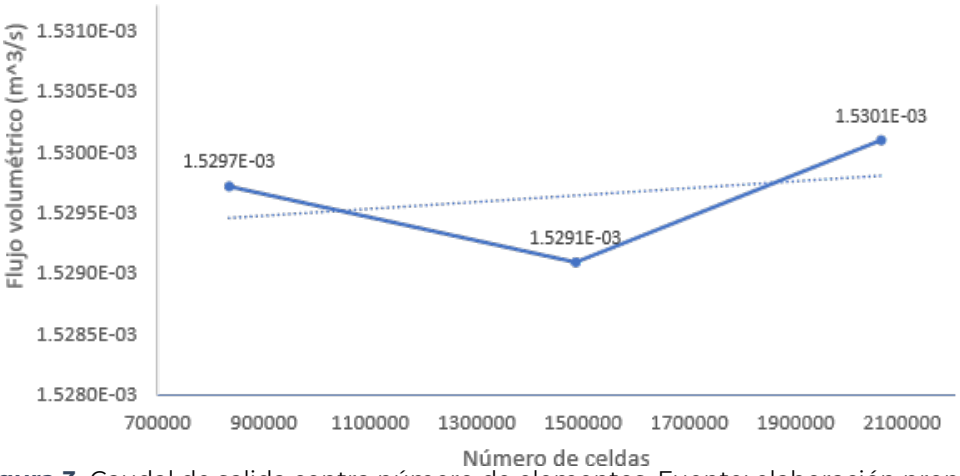


**Figura 3.** Caudal de salida contra número de elementos. Fuente: elaboración propia.

Luego se calcula el orden de convergencia (p) usando (2), donde Qi representa el flujo volumétrico de salida para la malla "i".

$$p = \ln\left(\frac{Q_1 - Q_2}{Q_2 - Q_3}\right) / \ln(r) \tag{2}$$

Para predecir el caudal de salida con una malla con un espaciado normalizado infinitamente pequeño (h=0), se hace uso de la aproximación dada por (3).

$$Q_{h=0} = Q_3 + \frac{|Q_3 - Q_2|}{r^p - 1} \tag{3}$$

Después, se calcula el error relativo entre los flujos volumétricos de salida, obteniéndose dos errores, uno entre la malla tosca y media, y otro entre la malla media y fina, como se muestra en (4).

$$e = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{Q_i} \tag{4}$$

Luego, se calculan el Grid Convergence Index para la malla fina $(GCI_{32})$ con el error entre la malla media y fina, y se calcula el Grid Convergence Index para la malla media $(GCI_{12})$ con el error entre la malla media y tosca. Se utilizó un factor de seguridad Fs = 1.25. Esto se hace utilizando (5) y (6).

$$GCI_{12} = \frac{Fs|e|}{(r^p - 1)} \tag{5}$$

$$GCI_{32} = \frac{Fs|e|r^p}{(r^p - 1)} \tag{6}$$

Por último, se calcula el Grid Convergence Index (GCI) usando (7), el cual debe dar un valor aproximado a 1 cuando se alcanza la convergencia numérica.

$$GCI = \frac{GCI_{12}}{r^p GCI_{23}} \cong 1 \tag{7}$$

Luego de calcular el GCI, se calcula el espaciado de la malla normalizado. Debido a que cada celda tiene diferente tamaño, se calcula el espaciado promedio total $h_{prom,total}$ utilizando (8), donde se considera la longitud característica (L) como el diámetro de la cuenca (500 mm), además del volumen total del sistema (V) y el número de celdas (C).

$$h_{prom,total} = (\frac{V}{L^3 C})^{1/3} \tag{8}$$

En la Tabla 2 se hace una representación del análisis de malla mediante el GCI, comparando las tres mallas, con sus números de celdas y sus respectivos caudales de salida.

**Tabla 2.** Resultados de las pruebas de independencia utilizando GCI. Fuente: elaboración propia.

| Extrapolación de Richardson | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mallas | Caudal de entrada ($m^3/s$) | # Celdas | r | p | e | $GCI_{12}$ y $GCI_{23}$ | GCI | Caudal de salida ($m^3/s$) |
| 1 | Tosca | 0.00152972 | 834.890 | 1.7801 | | 0.000407 | -1.34E-01 | | 0.0015275 |
| 2 | Media | 0.0015291 | 1.486.214 | 1.3864 | -1.04 | 0.000656 | -2.16E-01 | 1.00 | 0.0015315 |
| 3 | Fina | 0.0015301 | 2.060.616 | 1.5833 | | | | | 0.0015278 |

En la Figura 4 se compara el espaciado de la malla normalizada (h) con respecto al caudal de salida, donde se puede observarse que con una malla con un espaciado (h) de aproximadamente cero, no se encuentra una diferencia significativa en comparación a las otras mallas, lo que indica que ya no es necesario refinar más la malla. Esto quiere decir que, aunque se generen celdas cada vez más pequeñas, no habrá una diferencia significativa en los caudales de salida. En la Figura 4 se muestra un caudal de salida aproximado para el GCI de 0.0015275 $m^3/s$. Luego de hacer los estudios de independencia de malla, se hace la selección de una malla óptima. Según los resultados de la Tabla 1, se encontró que la malla con 834.890 elementos es lo suficientemente fina para que se presente un error relativo entre los caudales de entrada y salida muy pequeño (0.145125 %). Adicionalmente, en la Tabla 2 se puede apreciar un GCI aproximadamente igual a 1, lo que confirma la independencia de malla. Con esta malla, se realizaron seis (6) simulaciones con diferentes velocidades de entrada, en las cuales se observaron los cambios en la presión, fracción volumétrica y velocidad resultante en la cuenca.

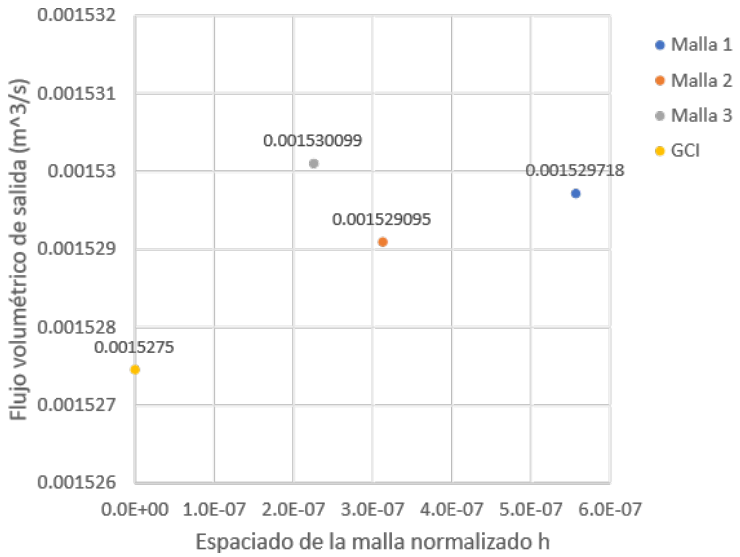


**Figura 4.** Extrapolación de Richardson. Fuente: elaboración propia.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se muestran los tiempos de flujo de simulación contra el flujo volumétrico de salida de la cuenca. Las simulaciones correspondientes a velocidades de entrada entre 0.03 m/s y 0.06 m/s se estabilizaron entre tiempos de flujo de 30 s y 40 s. Por otro lado, las simulaciones que tardaron más en estabilizarse corresponden a las velocidades más pequeñas, 0.01 m/s y 0.02 m/s, que tuvieron tiempos de estabilización entre 45 s y 65 s.

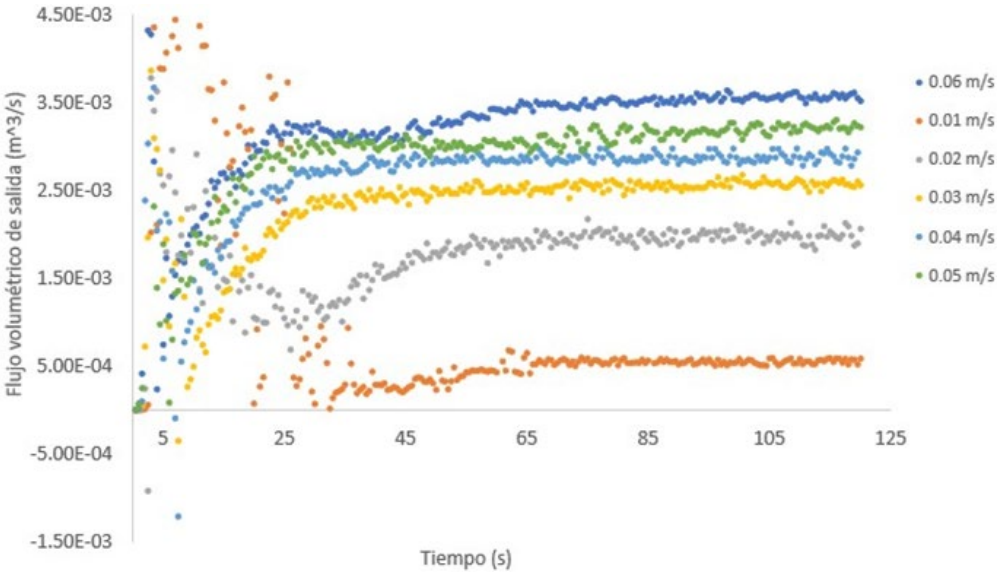


**Figura 5.** Caudal de salida vs tiempo de flujo. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 se muestran los contornos de fracciones volumétricas con diferentes velocidades de entrada. Aunque se hizo un aumento gradual de las velocidades de entrada (cada 0.01 m/s), no se encuentra un aumento proporcional en el nivel del agua en el canal y en la cuenca para todos los casos. Esto puede confirmarse numéricamente en la Tabla 3, donde se muestra la variación de la altura del nivel del agua en el canal ($h_c$) y la cuenca ($h_{max}$) con respecto a la velocidad de entrada ($v_{in}$). En esta tabla, también se puede apreciar el radio del núcleo de aire a la salida ($r_{aire}$) y el radio correspondiente a la altura máxima del agua en la cuenca ($r_{max}$). La Figura 6 también muestra que, aunque para todos los casos existe un núcleo de aire a la salida, se da una tendencia a formarse un vórtice débil para las dos últimas velocidades (0.05 m/s y 0.06 m/s), ya que los frentes de flujo tienden a unirse justo antes de la salida de la cuenca.

**Tabla 3.** Características del vórtice según velocidad de entrada. Fuente: elaboración propia.

| Velocidad de entrada, $v_{in}$ (m/s) | Cabeza de agua en el canal, $h_c$ (mm) | Radio del núcleo de aire del vórtice en la salida, $r_{aire}$ (mm) | Altura máxima del agua en la cuenca medida desde la descarga, $h_{max}$ (mm) | Radio correspondiente a la altura máxima del agua en la cuenca, $r_{max}$ (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 0.01 | 13.45 | 26.40 | 136.15 | 65.02 |
| 0.02 | 26.90 | 24.20 | 572.40 | 186.47 |
| 0.03 | 40.35 | 20.63 | 671.30 | 214.65 |
| 0.04 | 60.53 | 19.34 | 726.51 | 230.19 |
| 0.05 | 67.26 | 19.12 | 823.85 | 249.93 |
| 0.06 | 74.00 | 17.10 | 857.83 | 249.93 |

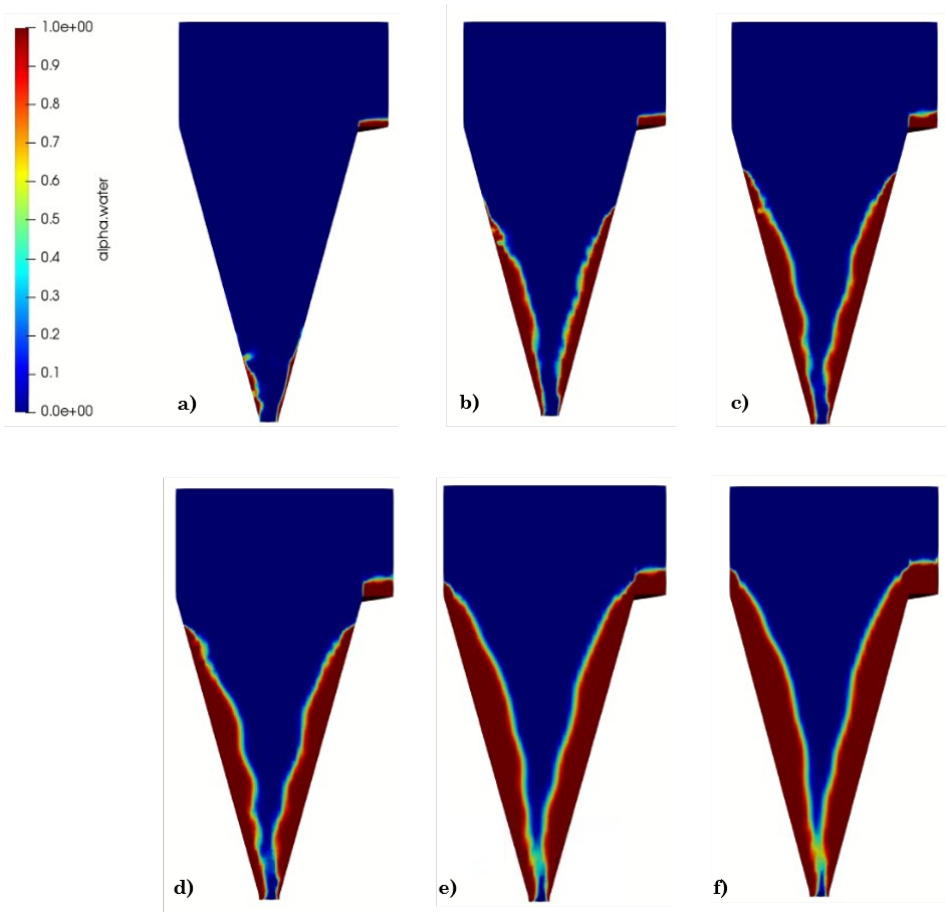


**Figura 6.** Contornos de fracción volumétrica para diferentes velocidades de entrada. (a) $v_{in} = 0.01\ m/s$, (b) $v_{in} = 0.02\ m/s$, (c) $v_{in} = 0.03\ m/s$, (d) $v_{in} = 0.04\ m/s$, (e) $v_{in} = 0.05\ m/s$, (f) $v_{in} = 0.06\ m/s$.
Fuente: elaboración propia.

La variación de la forma del vórtice, de la altura del mismo en la cuenca y del radio del núcleo de aire al cambiar la velocidad de entrada ($v_{in}$) pueden explicarse a partir del balance de fuerzas en un elemento de fluido de la superficie libre, como se muestra en la Figura 7. En términos generales, se identifican dos radios de curvatura medidos desde el eje de simetría, esto es, el radio del vórtice en el plano r-θ identificado como "r" y el radio del vórtice en el plano r-z identificado como "ξ", los cuales tienen asociados diferenciales de fuerzas centrífugas ($dF_{cr}$y $dF_{c\xi}$, respectivamente) y de fuerzas de tensión superficial ($dF_{sr}$y $dF_{s\xi}$, respectivamente). Los diferenciales $dF_{cr}$y $dF_{c\xi}$, al igual que el diferencial de fuerzas de cuerpo ($dW$), tienden a generar una forma cóncava en la superficie libre del vórtice, mientras que los diferenciales de fuerzas superficiales, $dF_{sr}$y $dF_{s\xi}$, junto con el diferencial de fuerzas por gradiente de presión ($dF_P$), una forma convexa. El aumento del nivel del agua en la cuenca respecto a la velocidad de entrada ($v_{in}$), una vez se han alcanzado condiciones estables, puede explicarse a partir del balance entre estas fuerzas. En general, el aumento de la velocidad de entrada ($v_{in}$) genera un aumento de la velocidad tangencial ($v_\theta$), lo que podría incrementar la fuerza centrífuga en la dirección radial, $dF_{cr}$, que a su vez tiende a empujar el agua hacia las paredes de la cuenca. No obstante, al ingresar más caudal, también puede disminuir el radio del vórtice en el plano r-θ (r), lo que conllevaría a una disminución de dF_cr; además, puede ocurrir un aumento de la velocidad axial ($v_z$) y un aumento del ángulo φ formado entre las fuerzas de presión, $dF_P$, y la horizontal (el diferencial de superficie se torna más horizontal), lo que incrementaría $dF_{c\xi}$ y la tendencia del agua a desplazarse hacia el interior de la cuenca en lugar de hacia las paredes de forma

radial. De acuerdo con los resultados de la Tabla 3, cuando la velocidad se incrementa el doble de 0.01 m/s a 0.02 m/s, el nivel del agua en la cuenca lo hace 4.2 veces (de 136.15 mm a 572.4 mm), lo que indica que se imponen los efectos del incremento de las fuerzas centrífugas en la dirección radial. Para los casos restantes, el nivel del agua en la cuenca ($h_{max}$) aumenta en menor medida respecto al incremento de velocidad de entrada (1.17 veces de 0.02 m/s a 0.03 m/s, 1.08 veces de 0.03 m/s a 0.04 m/s, 1.13 veces de 0.04 m/s a 0.05 m/s, 1.04 veces de 0.05 m/s a 0.06 m/s), lo que muestra que los efectos del aumento de la circulación no son tan preponderantes como en el primer caso debido al aumento en la masa de agua y por ende un aumento de la resistencia a la rotación, y los efectos que estimulan el llenado del interior de la cuenca empiezan a ser importantes, lo que también se manifiesta en el aumento de la fracción volumétrica de agua.

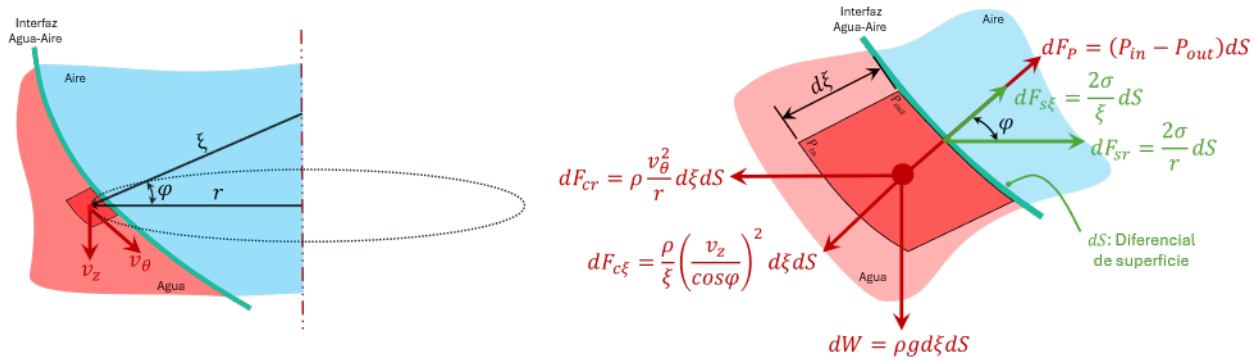


**Figura 7.** Balance de fuerzas en la superficie libre del vórtice. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Tabla 3 se puede apreciar también que el cambio del radio de núcleo de aire a la salida es decreciente ($r_{aire}$) con la velocidad de entrada ($v_{in}$), lo cual también puede explicarse a partir del balance de fuerzas representado en la Figura 7. Como se puede observar en la Figura 6 y se confirmará más adelante, la superficie libre en la descarga es convexa, lo que significa que la fuerza de tensión superficial en el plano r-z ($dF_{s\xi}$) queda orientada en sentido contrario al mostrado en la Figura 7, sumándose a las fuerzas centrífugas ($dF_{cr}$ y $dF_{c\xi}$) que tienden a aumentar el radio del núcleo del aire ($r_{aire}$) con el incremento de la velocidad de entrada ($v_{in}$); no obstante, aumentar $v_{in}$también puede conllevar a un aumento en la presión hidrostática del agua cercana a la descarga, incrementándose el gradiente de presión y por lo tanto $dF_P$, lo que tiende a mover la superficie libre del vórtice hacia el interior cerrando el núcleo de aire. En este caso, el segundo efecto parece imponerse, esto es, el aumento de las fuerzas centrífugas en la salida de la cuenca no es lo suficientemente alto para evitar la acumulación de agua y la subsecuente reducción de $r_{aire}$ producto del aumento de la presión hidrostática. Para las dos últimas velocidades (0.05 m/s y 0.06 m/s), la convexidad de la superficie libre cercana a la descarga es más pronunciada, lo que origina una tendencia a formarse un vórtice débil.

En la Figura 8 se muestran los contornos de presión estática, donde se puede observar un incremento considerable de la presión en la cuenca a partir de una velocidad de entrada de 0.03 m/s. Además, la presión estática máxima registrada fue de 3.600 Pa en las periferias de la cuenca con las simulaciones de velocidad de entrada de 0.05 m/s y 0.06 m/s. Esto muestra como el vórtice va creciendo de forma radial desde esas zonas donde la presión hidrostática es más alta hasta un punto donde los frentes de avance tratan de unirse para formar un vórtice débil.

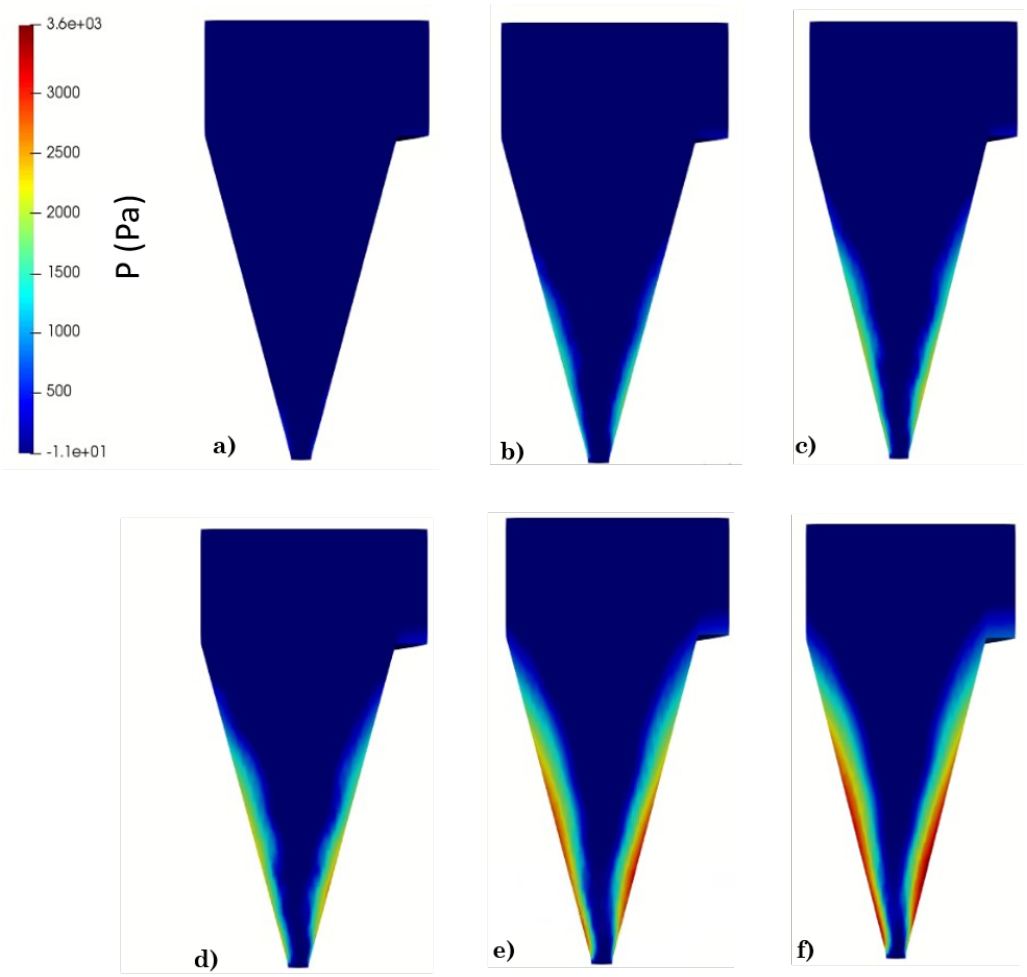


**Figura 8**. Contornos de presión estática (Pa) para diferentes velocidades de entrada. (a) $v_{in} = 0.01\ m/s$, (b) $v_{in} = 0.02\ m/s$, (c) $v_{in} = 0.03\ m/s$, (d) $v_{in} = 0.04\ m/s$, (e) $v_{in} = 0.05\ m/s$, (f) $v_{in} = 0.06\ m/s$.
Fuente: elaboración propia.

La Figura 9 representa los contornos de magnitud de velocidad para los seis casos simulados, donde se puede observar que con una velocidad de entrada de 0.01 m/s, se obtiene una velocidad resultante máxima de 4.2 m/s en una zona localizada muy pequeña de las paredes de la cuenca, lo cual puede deberse a la caída libre del agua desde el canal para este caso. Para esta velocidad de entrada en particular, la distribución de los contornos de velocidad es poco uniforme respecto a los otros cinco casos. Para las demás velocidades, se puede ver que la velocidad oscila en un rango relativamente estrecho (1.8 m/s a 2.2 m/s) en la mayor parte del dominio de agua, pero con un mayor volumen abarcado para una velocidad de entrada de 0.06 m/s, confirmándose la mejor uniformidad de los valores de velocidad. Se pueden notar unos pequeños aumentos de velocidad en la salida.

Los perfiles de altura del vórtice (*h*) y velocidad tangencial (vθ) en la superficie libre obtenidos de OpenFoam para cada una de las velocidades de entrada se muestran en las Figuras 10a-f y 11a-f, respectivamente. Debido a errores de difusión interfacial, se presentan oscilaciones en los resultados obtenidos, y se realiza un tratamiento numérico para obtener curvas con tendencias mejor definidas.

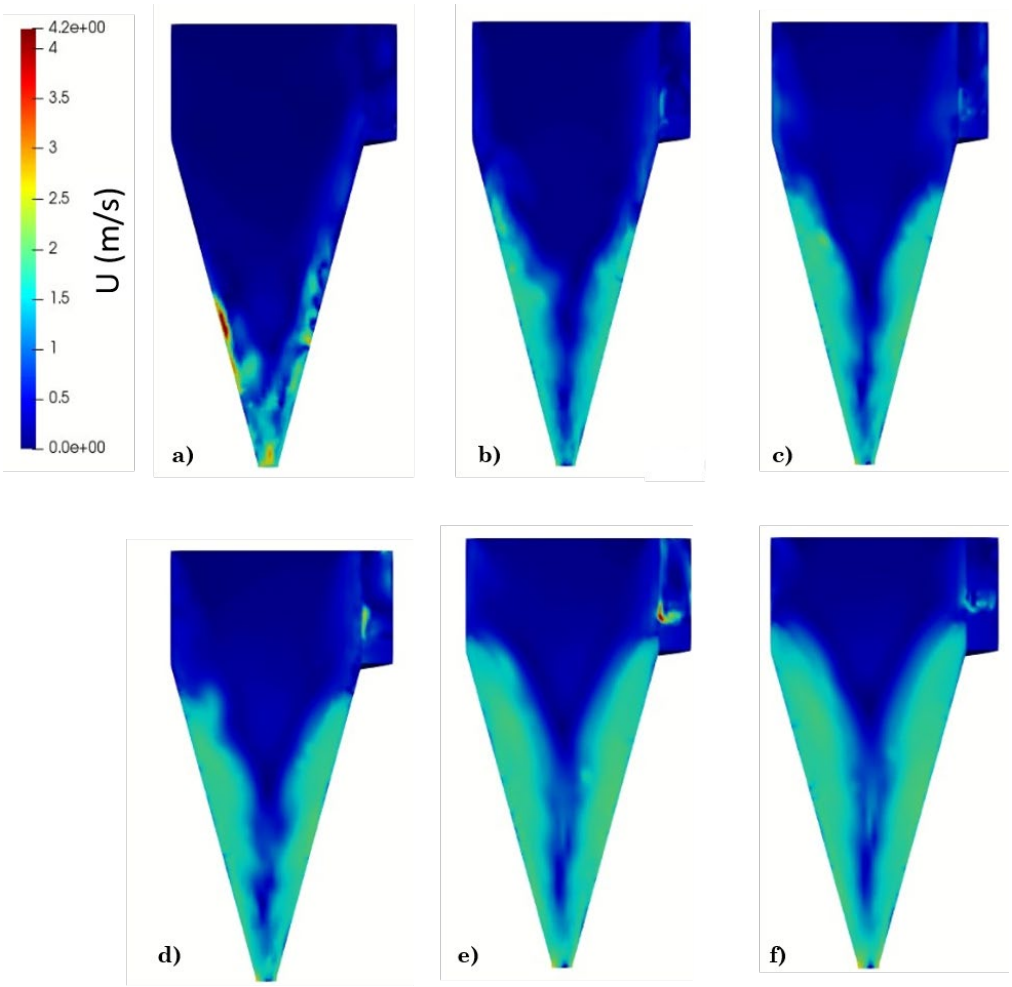


**Figura 9**. Contornos de magnitud de velocidad (m/s) para diferentes velocidades de entrada: (a) $v_{in}$=0.01 m/s, (b) $v_{in}$=0.02 m/s, (c) $v_{in}$=0.03 m/s, (d) $v_{in}$=0.04 m/s, (e) $v_{in}$=0.05 m/s, (f) $v_{in}$=0.06 m/s. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, se obtienen polinomios interpolantes con la herramienta Fitting Toolbox de MatlabTM que cumplan con las siguientes restricciones: (1) El coeficiente de determinación entre la curva de ajuste y los datos originales debe estar por encima de $R^2$=0.92, (2) Las curvas deben pasar por los valores h y vθ correspondientes al radio del núcleo de aire ($r_{aire}$) y el radio máximo del vórtice ($r_{max}$), (3) Las curvas deben reproducir adecuadamente el tipo de curvatura (cóncava o convexa) mostrada por los datos originales. Para tal propósito, se introduce una función interpolante customizada según (9).

$$y = \sum_{i=1}^{N} p_i (x - x_0)^i + y_0 \tag{9}$$

Para reproducir correctamente las curvaturas del perfil de altura del vórtice (h), es conveniente recalcular las coordenadas radiales dejando fijas las axiales y respetando la condición (2) mencionada anteriormente. Por lo tanto, para la interpolación del perfil de alturas (h), se toma $x = h,\ x_0 = 0, y = r,\ y_0 = r_{aire}$ y se condicionan los coeficientes de ajuste $p_i$de forma tal que la curva pase por el punto ($r_{max}, h_{max}$), obteniendo las líneas de ajuste representadas en la Figuras 10a-f, con los respectivos coeficientes mostrados en la Tabla 4.

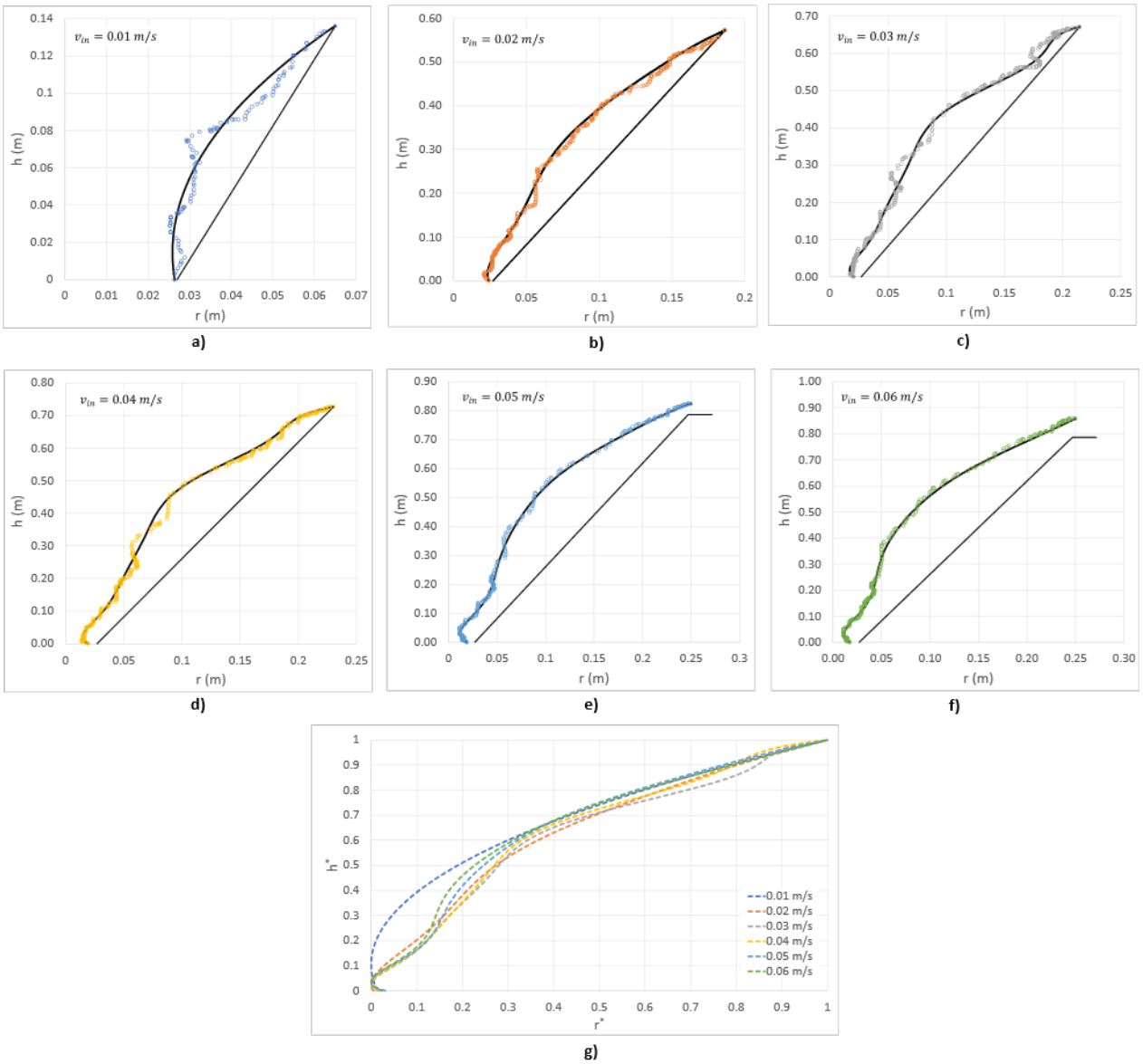


**Figura 10.** Altura del vórtice vs. radio del vórtice. (a) $v_{in} = 0.01\ m/s$, (b) $v_{in} = 0.02\ m/s$, (c) $v_{in} = 0.03\ m/s$, (d) $v_{in} = 0.04\ m/s$, (e) $v_{in} = 0.05\ m/s$, (f) $v_{in} = 0.06\ m/s$, (g) Valores normalizados. La línea recta inclinada corresponde a la superficie de la cuenca. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, para reproducir el comportamiento del perfil de velocidades tangenciales en la superficie libre, se toman los radios recalculados en el paso anterior, $r_{new}$, como variable independiente, x, y se ajustan los valores de las velocidades tangenciales, $v_\theta$, de forma tal que $x = r_{new}$, $x_0 = r_{aire}, y = v_\theta$, , $y_0 = v_\theta|_{r_{new}=r_{aire}}$, condicionando también los coeficientes de ajuste p_i de forma tal que la curva pase por el punto $(r_{max}, v_\theta|_{r_{new}=r_{max}})$. El algoritmo utilizado para realizar los ajustes polinómicos es Levenberg-Marquardt y el método es el de los mínimos cuadrados. Los coeficientes interpolantes para v_θ también se muestran en la Tabla 4, mientras que las líneas de ajuste están representadas en las Figuras 10a-f.

Para poder hacer una comparación más precisa de los perfiles ajustados de h y $v_\theta$, los mismos son normalizados en un dominio entre 0 y 1 aplicando las ecuaciones (10), (11) y (12).

$$r^* = \frac{(r - r_{min})}{(r_{max} - r_{min})} \tag{10}$$

$$h^* = \frac{(h - h_{min})}{(h_{max} - h_{min})} \tag{11}$$

$$v_\theta^* = \frac{(v_\theta - v_{\theta,min})}{(v_{\theta,max} - v_{\theta,min})} \tag{12}$$

**Tabla 4**. Coeficientes de interpolación polinómica para los perfiles de altura (h) y velocidad tangencial (vθ). Fuente: elaboración propia.

| | $v_{in} = 0.01\ m/s$ | | $v_{in} = 0.02\ m/s$ | | $v_{in} = 0.03\ m/s$ | | $v_{in} = 0.04\ m/s$ | | $v_{in} = 0.05\ m/s$ | | $v_{in} = 0.06\ m/s$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *h* | vθ | *h* | vθ | *h* | vθ | *h* | vθ | *h* | vθ | *h* | vθ |
| $p_1$ | -7.244 E-02 | 1.014 E+02 | -1.255 E-01 | 5.281 E+01 | -4.371 E-01 | 2.659 E+00 | -4.810 E-01 | 2.628 E+01 | -5.703 E-01 | 1.329 E+01 | -4.509 E-01 | 1.352 E+01 |
| $p_2$ | 2.523 E+00 | -1.159 E+04 | 4.907 E+00 | -3.917 E+03 | 1.651 E+01 | 1.084 E+03 | 1.546 E+01 | -2.050 E+03 | -1.243 E-03 | -1.235 E+03 | 1.059 E+01 | -9.026 E+02 |
| $p_3$ | -2.608 E-01 | 5.867 E+05 | -3.338 E+01 | 1.391 E+05 | -1.856 E+02 | -6.054 E+04 | -1.537 E+02 | 7.454 E+04 | -1.486 E-03 | 4.664 E+04 | -7.604 E+01 | 3.332 E+04 |
| $p_4$ | 1.680 E+01 | -1.867 E+07 | 1.050 E+02 | -2.621 E+06 | 1.086 E+03 | 1.407 E+06 | 8.038 E+02 | -1.360 E+06 | -1.516 E-03 | -8.285 E+05 | 2.768 E+02 | -5.888 E+05 |
| $p_5$ | -1.103 E+02 | 3.644 E+08 | -1.505 E+02 | 2.795 E+07 | -3.567 E+03 | -1.662 E+07 | -9.594 E-09 | 1.375 E+07 | -2.748 E-03 | 7.980 E+06 | -5.658 E+02 | 5.697 E+06 |
| $p_6$ | 2.775 E+02 | -3.132 E+09 | 8.139 E+01 | -1.693 E+08 | 6.589 E+03 | 1.051 E+08 | 4.022 E+03 | -7.796 E+07 | -3.019 E-03 | -4.297 E+07 | 6.616 E+02 | -3.101 E+07 |
| $p_7$ | 0.000 E+00 | 7.104 E-01 | 0.000 E+00 | 5.424 E+08 | -6.355 E+03 | -3.397 E+08 | -3.561 E+03 | 2.316 E+08 | -8.253 E+02 | 1.214 E+08 | -4.124 E+02 | 8.866 E+07 |
| $p_8$ | 0.000 E+00 | 3.750 E-01 | 0.000 E+00 | -7.146 E+08 | 2.482 E+03 | 4.403 E+08 | 1.283 E+03 | -2.799 E+08 | 2.356 E+02 | -1.399 E+08 | 1.061 E+02 | -1.032 E+08 |
| $r_{min}$ (mm) | 25.88 | | 23.31 | | 17.14 | | 14.79 | | 11.76 | | 11.26 | |
| $r_{max}$ (mm) | 65.02 | | 186.47 | | 214.65 | | 230.19 | | 249.93 | | 249.93 | |
| $h_{min}$ (mm) | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| $h_{max}$ (mm) | 132.15 | | 572.40 | | 671.30 | | 726.51 | | 823.85 | | 857.83 | |
| $v_{\theta,min}$ (m/s) | 0.95 | | 1.04 | | 0.88 | | 0.96 | | 0.87 | | 0.85 | |
| $v_{\theta,max}$ (m/s) | 1.44 | | 1.71 | | 1.88 | | 1.89 | | 1.83 | | 1.93 | |

Donde $r_{min}$, $h_{min}$ y $v_{\theta,min}$ son los valores mínimos de la coordenada radial, altura y velocidad tangencial en la superficie libre del vórtice, mientras $r_{max}$, $h_{max}$ y $v_{\theta,max}$ corresponde a los valores máximos. Estos valores son mostrados también en la Tabla 4. Los perfiles de $h^*\ vs\ r^*$ y $v_\theta^*\ vs\ r^*$son mostrados en las Figuras 10g y 11g, respectivamente. De acuerdo con la Figura 10g, todos los perfiles de la superficie libre son convexos cercanos a la descarga. Desde la descarga hasta un valor del 30 % del radio máximo de cada perfil $(r^* = 0.3)$, se notan diferencias importantes entre algunos perfiles en cuanto a la altura normalizada ($h^*$) y la curvatura. Por ejemplo, el perfil correspondiente a la velocidad mínima de 0.01 m/s tiene diferencias notorias respecto a los otros, los perfiles de las velocidades entre 0.02 m/s y 0.04 m/s no presentan curvaturas tan pronunciadas en ese rango respecto a los otros, mientras que los perfiles de las velocidades más altas (0.05 m/s y 0.06 m/s) presentan una curvatura cóncava y luego convexa más pronunciadas. A partir de $r^* = 0.3$ aproximadamente, los perfiles normalizados se comportan de forma relativamente similar, con excepción de pequeñas curvaturas presentes

en algunos de ellos, denotando así la no existencia o baja magnitud de fuerzas superficiales y centrífugas en el plano r-z considerando que $\xi \to \infty$ (Figura 7).

En la Figura 11 se observa el comportamiento de las velocidades tangenciales en la superficie libre normalizadas, $v_\theta^*$. Se encuentran puntos en común para todas las curvas: (1) El comportamiento de $v_\theta^*$ con $r^*$ no es monotónico, alcanzándose una velocidad tangencial máxima en un radio intermedio entre $r_{min}$ y $r_{max}$, (2) La velocidad tangencial mínima se alcanza en el radio máximo del vórtice ($r^* = 1$), (3) Con excepción del perfil correspondiente a la velocidad de 0.01 m/s, todos los perfiles exhiben una zona de meseta entre $r^* = 0.1$ y $r^* = 0.3$ aproximadamente, donde $v_\theta^*$ varía muy poco con respecto a $r^*$. La velocidad tangencial máxima en la superficie libre se alcanza en $r^* = 0.19$ para $v_{in} = 0.01\ m/s$, $r^* = 0.74$ para $v_{in} = 0.02\ m/s$, $r^* = 0.55$ para $v_{in} = 0.03\ m/s$, $r^* = 0.61$ para $v_{in} = 0.04\ m/s$, $r^* = 0.53$ para $v_{in} = 0.05\ m/s$ y $r^* = 0.54$ para $v_{in} = 0.06\ m/s$. En términos generales, entre más cercana esté la superficie libre del vórtice a la pared de la cuenca, se espera una velocidad tangencial más pequeña por los efectos de capa límite de pared no deslizante (fricción entre el agua y la superficie), lo que coincide con el comportamiento de las curvas de $v_\theta^*\ vs\ r^*$ (Figura 11g), ya que la superficie libre está más cercana a la pared en la descarga y en la altura máxima del vórtice para los casos considerados en este trabajo debido a que la cuenca es cónica (Figuras 10a-f). Por otro lado, los valores de $r^*$donde se alcanzan los máximos valores de velocidad tangencial en la superficie libre no son coincidentes con los puntos más alejados entre dicha superficie y la pared (Figuras 10a-f), lo que es un indicio de la existencia de una zona de vórtice libre donde se conserva el momento angular, una zona de transición donde la velocidad tangencial es máxima y que no coindice necesariamente con la superficie libre para todas las coordenadas axiales, y una zona de vórtice forzado cercana al núcleo de aire donde se conserva la velocidad angular. Esto es consistente con los resultados reportados por diferentes autores [14]-16], donde la velocidad tangencial alcanza un pico máximo entre la descarga y la pared de la cuenca. Por ejemplo, en [14] se obtuvieron perfiles radiales de velocidad tangencial para dos diámetros de descarga de la cuenca (0.20 m y 0.25 m) con una velocidad de entrada constante (0.1 m/s), hallando un pico máximo en aproximadamente el 50 % y el 65 % del radio de la cuenca (0.4 m), respectivamente. Por otro lado, una variación muy leve de la localización del pico máximo de velocidad tangencial con el diámetro de descarga de la cuenca y la coordenada axial del vórtice respecto a la base de la cuenca fue reportada por [15], de forma tal que el pico máximo siempre se localizó alrededor del 67 % del radio de la cuenca (1 m). Caso contrario se presentó con la altura máxima del vórtice, la cual si parece tener una influencia importante en la localización radial del pico de velocidad tangencial según el trabajo mencionado [15]. En [16], también reportaron una variación no monotónica de la velocidad tangencial en la dirección radial para diferentes diámetros de descarga y ángulo de cono de la cuenca, con un pico máximo muy cercano a la pared de la cuenca en todos los casos, siendo ésta una diferencia importante con los resultados de la presente investigación.

Adicionalmente, como se puede apreciar en las Figuras 11a-f, el comportamiento de la velocidad tangencial máxima con la velocidad de entrada, $v_{in}$, no es monotónico creciente ($v_{\theta,max} = 1.44\ m/s$ para $v_{in} = 0.01\ m/s$, $v_{\theta,max} = 1.69\ m/s$ para $v_{in} = 0.02\ m/s$, $v_{\theta,max} = 1.91 m/s$ para $v_{in} = 0.03\ m/s$, $v_{\theta,max} = 1.89\ m/s$ para $v_{in} = 0.04\ m/s$, $v_{\theta,max} = 1.83\ m/s$ para $v_{in} = 0.05\ m/s$, $v_{\theta,max} = 1.94\ m/s$ para $v_{in} = 0.06\ m/s$), lo que sugiere que incrementar el flujo volumétrico de entrada no necesariamente deriva en un aumento del rendimiento de la GWVPP. Algunos estudios previos sustentan esta afirmación. Por ejemplo, en un trabajo reciente [17], obtuvieron curvas experimentales de Eficiencia vs. Velocidad rotacional para dos tipos de turbinas, tres posiciones relativas de dichas turbinas (50 %, 60 %, y 70 %), dos clases de cuencas (cilíndricas y cónicas) y tres flujos volumétricos (2.5 L/s, 3.0 L/s y 3.5 L/s), hallando que, para ciertas velocidades rotacionales, la eficiencia puede disminuir con el aumento del flujo volumétrico de entrada. Otros trabajos también han obtenido una variación no monotónica del torque y/o la eficiencia de la turbina en una GWVPP con el flujo volumétrico de entrada [18]-[21].

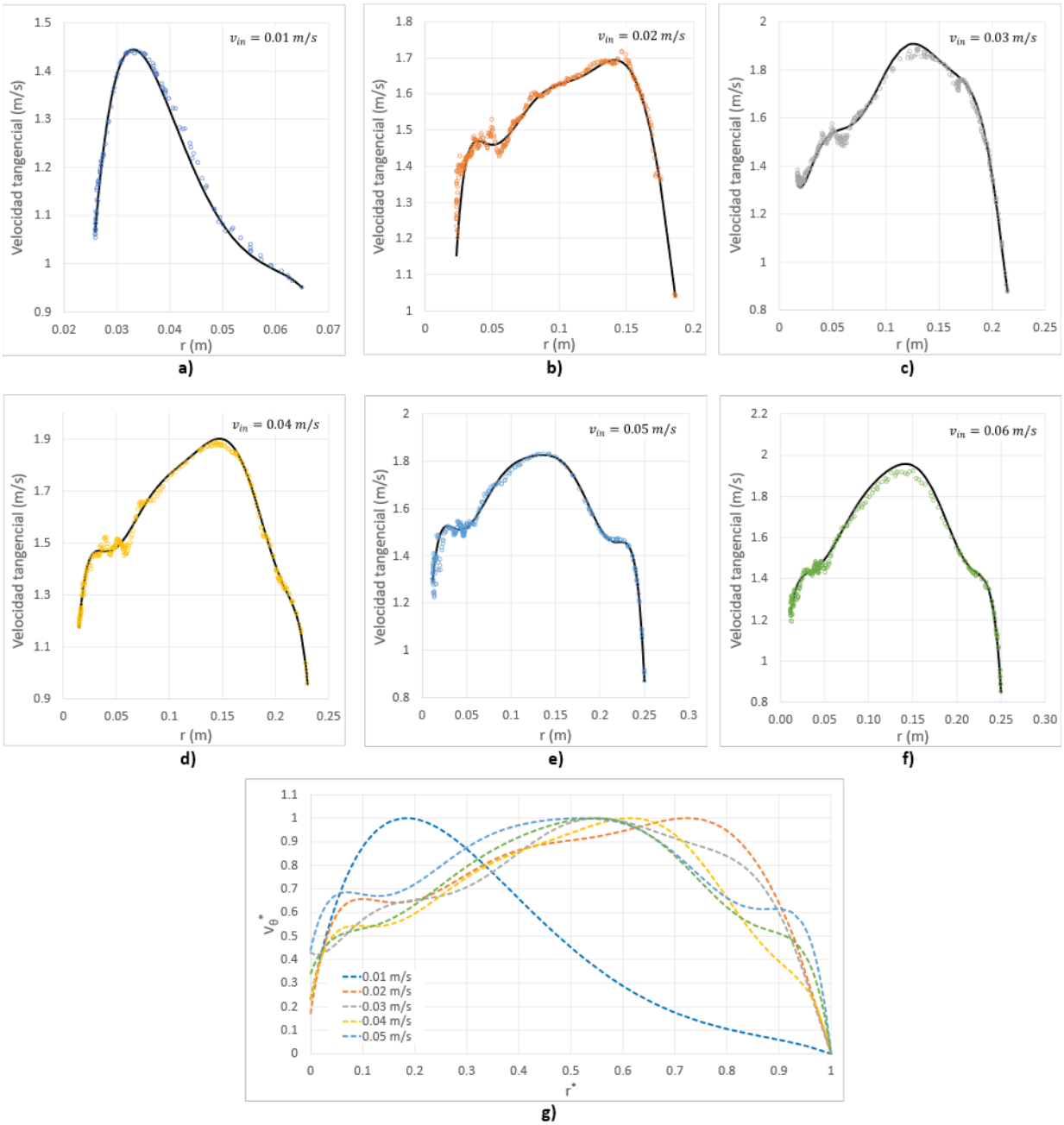


**Figura 11.** Velocidad tangencial de la superficie libre vs. radio del vórtice. (a) $v_{in} = 0.01$ m/s, (b) $v_{in} = 0.02$ m/s, (c) $v_{in} = 0.03$ m/s, (d) $v_{in} = 0.04$ m/s, (e) $v_{in} = 0.05$ m/s, (f) $v_{in} = 0.06$ m/s, (g) Valores normalizados. Fuente: elaboración propia.

## 4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo, la velocidad de entrada *($v_{in}$)* tiene una influencia importante en el perfil de alturas *(h)* y velocidades tangenciales *($v_\theta$)* de la superficie libre de vórtices gravitacionales de agua, al igual que en los contornos de presión estática y magnitud de velocidad. Esto puede ser importante para futuros estudios donde se busque capturar la mayor parte de la energía del fluido mediante una turbina de vórtice gravitacional. A partir de una velocidad de entrada de 0.03 m/s, las presiones estáticas en el

agua se incrementan de forma significativa, permitiendo obtener vórtices mejor desarrollados (con curvaturas mejor definidas). Respecto a los contornos de magnitud de velocidad, las velocidades de entrada más altas (0.05 m/s y 0.06 m/s) favorecen una distribución más uniforme de esta variable de campo, mientras que para una velocidad de entrada de 0.01 m/s, dicha distribución es inaceptablemente desigual, con una zona localizada donde se alcanza una velocidad muy alta probablemente producto de la caída libre de agua desde el canal hacia la cuenca.

La altura máxima del vórtice *($h_{max}$)* aumentó de forma monotónica con la velocidad de entrada *($v_{in}$)*, pero dicho incremento tiende a ser menor conforme esta velocidad aumenta. Este comportamiento fue atribuido a la disminución de la importancia relativa de aumentar las fuerzas centrífugas en la dirección radial respecto a aquellas que estimulan el llenado hacia el interior de la cuenca. Por el contrario, el radio del núcleo de aire mostró una tendencia decreciente con el aumento de la velocidad de entrada *($v_{in}$)*, lo que puede ser explicado por el aumento de la presión estática del agua cercana a la descarga, que a su vez origina una mayor fuerza de gradiente de presión que parece superar las centrífugas y las de tensión superficial al incrementar la velocidad de entrada *($v_{in}$)*. Adicionalmente, se observó que todos los vórtices tienen un núcleo de aire en la descarga, sin embargo, para las velocidades de entrada de 0.05 m/s y 0.06 m/s, se observa una tendencia a generar vórtices débiles debido a la cercanía de los frentes de flujo, lo cual es coincidente con las simulaciones de otros autores, en las cuales, usando una velocidad de entrada de 0.06 m/s, se alcanza a disociar el núcleo de aire.

Las gráficas de $h^* \; vs \; r^*$ mostraron que la velocidad de entrada *($v_{in}$)* tiene una influencia muy importante en la curvatura y alturas normalizadas de la superficie libre del vórtice hasta aproximadamente un 30 % del radio máximo; a partir de este porcentaje, los perfiles de altura son relativamente parecidos, salvo por la presencia de algunas pequeñas curvaturas. Por otro lado, de acuerdo con las gráficas de $v_\theta^* \; vs \; r^*$, la máxima velocidad tangencial en la superficie libre se alcanza en una coordenada radial intermedia que depende de la velocidad de entrada *($v_{in}$)*, mientras que la mínima velocidad tangencial siempre se obtiene en la coordenada radial máxima de la superficie libre.

Las fracciones volumétricas de agua más altas se obtienen a velocidades de entrada altas (0.05 m/s y 0.06 m/s), lo cual es ventajoso si se desea incorporar un sistema de generación de energía por vórtices gravitacionales de agua, ya que fracciones volumétricas relativamente altas implican mayor masa, y, por lo tanto, mayor inercia.

Esta investigación se limita a vórtices gravitacionales con cuenca cónica y velocidades de entrada del agua entre 0.01 m/s y 0.06 m/s. Las líneas de posible trabajo futuro incluyen el estudio en vórtices con cuenca cilíndrica, el diseño de turbinas de vórtices que maximicen la eficiencia, el estudio acerca de cómo la presencia de una turbina afectaría la forma de vórtices débiles y fuertes, y ejercicios de optimización numérica del caudal de entrada de la cuenca. Estos resultados pueden impactar el diseño de turbinas hidráulicas que maximicen la captura de la energía del fluido mediante el análisis de los campos de presión, velocidad y vorticidad del flujo.

## 5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por la Convocatoria No. 890 de 2020 “Convocatoria para el fortalecimiento de CTeI en Instituciones de Educación de Educación Superior (IES) Públicas 2020”. Los autores también agradecen el apoyo financiero proporcionado por la convocatoria Pascualino Creativo e Innovador de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

## 6. REFERENCIAS


[1] N. Gaulin and P. Le Billon, "Climate change and fossil fuel production cuts: assessing global supply-side constraints and policy implications," *Clim. Policy*, vol. 20, no. 8, pp. 888–901, Feb. 2020. https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1725409

[2] J. Lu, H. Chen, and X. Cai, "From global to national scenarios: Exploring carbon emissions to 2050," *Energy Strat. Rev.*, vol. 41, p. 100860, May. 2022. https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100860

[3] L. Velásquez, F. Romero-Menco, A. Rubio-Clemente, A. Posada, and E. Chica, "Numerical optimization and experimental validation of the runner of a gravitational water vortex hydraulic turbine with a spiral inlet channel and a conical basin," *Renew. Energy*, vol. 220, p. 119676, Jan. 2024. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119676

[4] A. Sharif *et al.*, "e" *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments,* vol. 44, no. 11, pp. 156-168, 2021.

[5] V. J. Alzamora Guzmán, and 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. 1, pp. 72–79, Mar. 2021. https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.03.004

[6] H. M. Shabara, O. B. Yaakob, Y. M. Ahmed, A. H. Elbatran, and M. S. M. Faddir, "CFD Validation for Efficient Gravitational Vortex Pool System," *J. Teknol.*, vol. 74, no. 5, pp. 97-100, May. 2015. https://doi.org/10.11113/jt.v74.4648

[7] M. Mizanur Rahman, T. Jian Hong, and 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.*, vol. 2018, p. 2968-2976, 2018. https://ieomsociety.org/ieom2018/papers/688.pdf

[8] A. Obozov, R. Akparaliev, T. Mederov, B. Ashimbekova, A. Tolomushev, and K. Orazbaev, "Research and development of a gravitational water vortex micro-HPP in the conditions of Kyrgyzstan," *Energy Rep.*, vol. 10, pp. 544–557, Nov. 2023. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.041

[9] Y. Nishi, R. Suzuo, D. Sukemori, and T. Inagaki, "Loss analysis of gravitation vortex type water turbine and influence of flow rate on the turbine's performance," *Renew. Energy*, vol. 155, pp. 1103–1117, Aug. 2020. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.186

[10] B. Vinayakumar, R. Antony, V. A. Binson, and S. Youhan, "Experimental and numerical study on gravitational water vortex power plant for small water bodies," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, p. 100460, Mar. 2024. https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100460

[11] R. Ullah, T. A. Cheema, A. S. Saleem, S. M. Ahmad, J. A. Chattha, and C. W. Park, "Preliminary experimental study on multi-stage gravitational water vortex turbine in a conical basin," *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 2516–2529, Jan. 2020. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.128

[12] J. Betancour Osorio, "Desarrollo de un sistema de generación por vórtice gravitacional," Tesis de maestría, Universidad de Antioquia, Medellín Colombia, 2022. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/31736/1/BetancourJohan_2022_DesarrolloTurbinaVortice.pdf

[13] Y. Jiang *et al.*, "Multi–disciplinary optimizations of small-scale Gravitational Vortex Hydropower (SGVHP) system through computational hydrodynamic and hydro–structural analyses," *Sustainability*, vol. 14, no. 2, p. 727, Jan. 2022. https://doi.org/10.3390/su14020727

[14] S. Wanchat, R. Suntivarakorn, S. Wanchat, K. Tonmit, and P. Kayanyiem, "A parametric study of a gravitation vortex power plant," *Adv. Mat. Res.*, vol. 805–806, pp. 811–817, Sep. 2013. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.805-806.811

[15] A. Mamadjanov, D. Yusupov, E. Berkinov, J. Akmalov, and M. Jalilov, "The effect of conical basin geometry on gravitational water vortex power plant," *E3S Web Conf.*, vol. 563, p. 01010, Aug. 2024. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456301010

[16] S. R. Sreerag, C. K. Raveendran, and B. S. Jinshah "Effect of outlet diameter on the performance of gravitational vortex turbine with conical basin," *International Journal of Science Engineering and Research*, vol. 7, no. 4, Apr. 2016. https://www.ijser.org/researchpaper/effect-of-outlet-diameter-on-the-performance-of-gravitational-vortex-turbine-with-conical-basin.pdf

[17] L. Velásquez, J. P. Rengifo, J. Urrego, A. Rubio-Clemente, and 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, p. 5773, Nov. 2024. https://doi.org/10.3390/en17225773

[18] D. S. Edirisinghe, H.-S. Yang, S. D. G. S. P. Gunawardane, and Y.-H. Lee, "Enhancing the performance of gravitational water vortex turbine by flow simulation analysis," *Renew. Energy*, vol. 194, pp. 163–180, Jul. 2022. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.053

[19] T. Ahmad Cheema, R. Ullah, and A. S. Saleem, "Performance analysis of a two-stage gravitational water vortex turbine," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 291, no. 1, p. 012039, Jun. 2019. https://doi.org/10.1088/1755-1315/291/1/012039

[20] P. Sritram, and R. Suntivarakorn, "The efficiency comparison of hydro turbines for micro power plant from free vortex," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 7961, Nov. 2021. https://doi.org/10.3390/en14237961

[21] D. A. Sinaga, M. D. Septiyanto, Z. Arifin, G. Rusdiyanto, S. D. Prasetyo, and S. Hadi, "The effect of blade distances on the performance of double-stage Gravitational Water Vortex Turbine," *Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 109, no. 1, pp. 196–209, Oct. 2023. https://doi.org/10.37934/arfmts.109.1.196209

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros, ni relaciones personales conocidas que pudieran influir en el trabajo presentado en este artículo.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Jhon Fredy Hincapié Montoya: modelado, asesoría en el software de CFD OpenFOAM.
Iván David Patiño Arcila: diseño de experimentos, revisión del estado del arte.
José Alejandro Posada Montoya: revisión del estado del arte, asesoría teoría CFD.
Daniel Augusto Suárez Castelblanco: simulaciones, redacción.