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

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Evaluación experimental de una microturbina hidrocinética Gorlov para uso rural de bajo caudal

Experimental assessment of a Gorlov hydrokinetic microturbine for rural low-flow use

Jorge Enrique Meneses Flórez[1]
Kevin Alexander Ramírez Rodríguez[1]
Henry David Méndez Chávez[1]

[1] **Universidad Industrial de Santander (UIS), Escuela de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación en Conectividad y Procesado de Señales - CPS, Bucaramanga, Santander, Colombia.**

Recibido: 10 agosto 2025. Revisado: 10 septiembre 2025. Aceptado: 20 diciembre 2025. Publicado: 01 enero 2026.
Autor de correspondencia: Jorge Enrique Meneses Flórez

Cómo citar: J. E. Meneses Flórez, K. A. Ramírez Rodríguez, and H. D. Méndez Chávez, "Evaluación experimental de una microturbina hidrocinética Gorlov para uso rural de bajo caudal", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 47, ene. 2026, art. no. 4295, doi: 10.24054/rcta.v1i47.4295

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

Resumen:

El estudio desarrolla y evalúa una microturbina hidrocinética tipo Gorlov para generar electricidad en ríos de bajo caudal en zonas rurales de Colombia. Se caracterizó hidráulicamente un cauce en Santander y se diseñó un rotor NACA 0015 fabricado por impresión 3D. Las pruebas experimentales registraron 3.3 W de potencia y 8.8 % de eficiencia, aumentando 40 % la energía captada mediante canalización del flujo con una tubería de 2.5 m. El desempeño estable del rotor y la transmisión por caja de engranajes validan su viabilidad técnica y educativa como alternativa renovable de bajo costo para electrificación descentralizada.

Palabras clave: microturbina hidrocinética, rotor Gorlov, manufactura aditiva, electrificación rural.

Abstract:

This study develops and evaluates a Gorlov-type hydrokinetic microturbine for electricity generation in low-flow rivers in rural Colombia. A river in Santander was hydraulically characterized, and a NACA 0015 rotor was designed and 3D-printed. Experimental tests delivered 3.3 W of power and 8.8 % efficiency, with a 40 % increase in extracted energy when channeling the flow through a 2.5 m pipe. The stable rotor behavior and gearbox-based transmission confirm its technical and educational feasibility as a low-cost renewable solution for decentralized electrification.

Keywords: hydrokinetic microturbine, Gorlov rotor, additive manufacturing, rural electrification.

INTRODUCCIÓN

El suministro eléctrico en áreas rurales de Colombia enfrenta desafíos históricos, pese a que el 70 % de la energía proviene de grandes centrales hidroeléctricas con alto impacto ambiental y social[1]. La UPME[2]señala que más de 500.000 personas en zonas no interconectadas carecen de acceso continuo a electricidad o dependen de combustibles fósiles, limitando el desarrollo. Las soluciones de generación distribuida, basadas en micro fuentes renovables, ofrecen una vía sostenible para enfrentar esta problemática. Específicamente, las microturbinas hidráulicas de flujo libre (sistemas hidrocinéticos) son una alternativa viable, ya que convierten la energía cinética de las corrientes fluviales en electricidad sin requerir presas ni canales de derivación, reduciendo costos y minimizando el impacto ambiental.

Contexto energético y desafío rural

El acceso desigual a la electricidad limita el desarrollo humano, la educación y la salud en comunidades rurales. En Colombia, la CREG[1]y la UPME[3]señalan que la electrificación convencional en zonas dispersas implica altos costos y baja viabilidad económica, por lo que los sistemas híbridos autónomos (solar, hidráulico y eólico) surgen como alternativa para las Zonas No Interconectadas (ZNI). Su implementación exige soluciones modulares, económicas y de bajo mantenimiento, adaptadas a las condiciones locales. En Colombia, los estudios recientes sobre generación distribuida mediante sistemas fotovoltaicos de autoconsumo demuestran la factibilidad de integrar fuentes renovables en entornos urbanos y rurales, apoyando la transición hacia esquemas energéticos descentralizados[4].

El aprovechamiento de la energía hidráulica a pequeña escala es viable por la abundancia de ríos y quebradas. Según el Atlas Hidrológico de Colombia[2]y el Manual de Medición de Caudales del IDEAM[5], los flujos típicos presentan velocidades entre 0.3 y 2.5 m/s, rango adecuado para operar microturbinas hidrocinéticas si se optimizan diseño y canalización.

Justificación del estudio

El proyecto se desarrolló en la vereda La Judía, municipio de Floridablanca, departamento de Santander (Colombia), localizada a 7.09° N y –73.05° O, a una altitud aproximada de 1 200 (m s. n. m.). Esta zona rural del piedemonte andino se caracteriza por la presencia de pequeñas corrientes fluviales de bajo caudal utilizadas para riego y abastecimiento local.

La iniciativa surgió ante la necesidad de implementar una fuente energética renovable que supliera la demanda básica de electricidad en una institución educativa rural, con el fin de ofrecer una alternativa sostenible y replicable para la comunidad. Las corrientes de agua de bajo caudal que atraviesan la zona, aún sin aprovechamiento energético, constituyen un laboratorio natural idóneo para la experimentación y la demostración tecnológica.

El objetivo fue diseñar, construir y validar un prototipo funcional de microturbina hidráulica capaz de operar en condiciones reales del cauce, priorizando materiales asequibles y técnicas de manufactura de bajo costo, como la impresión 3D. La investigación buscó no solo demostrar la viabilidad técnica del sistema, sino también su potencial como herramienta educativa en el ámbito de la formación en energías renovables y la apropiación tecnológica comunitaria.

Estado del arte de las microturbinas hidrocinéticas

Los sistemas hidrocinéticos emplean rotores axiales o transversales inmersos en corrientes fluviales. Dentro de las configuraciones más estudiadas destacan los rotores Darrieus, Savonius y Gorlov, los cuales operan bajo el principio de sustentación aerodinámica[6]. El rotor tipo Gorlov (GHT – Gorlov Helical Turbine) se caracteriza por su geometría helicoidal, que permite un flujo continuo sobre los álabes, reduciendo la pulsación de par y mejorando la eficiencia en regímenes de baja velocidad.

La ecuación general de potencia disponible en un flujo de velocidad (v) se expresa como:

$$P_h = \frac{1}{2}\rho A\, v^3 \qquad (1)$$

Dondeρes la densidad del agua (≈1000 kg/m³) y (A) el área barrida por el rotor. El límite teórico de Betz establece que ninguna turbina puede capturar más del 59.3 % de esta potencia[7]. En la práctica, los coeficientes de potencia$C_p$medidos para turbinas de laboratorio oscilan entre 0.1 y 0.35, dependiendo de la geometría, el número de palas, la relación de aspecto y la turbulencia del flujo.

Diversos estudios han abordado el desarrollo y evaluación de microturbinas hidrocinéticas con resultados experimentales consistentes. Espina-Valdés et al. [8] realizaron una comparación experimental entre configuraciones de rotores Gorlov y Darrieus en flujos de baja velocidad (< 1 m/s), obteniendo coeficientes de potencia$C_p$cercanos a 0.25. Por su parte, Ferraiuolo et al. [9] analizaron el desempeño de una turbina hidrocinética impresa en 3D, demostrando que el ajuste geométrico de las palas y la alineación del flujo pueden incrementar la eficiencia operativa. En el contexto colombiano, Pineda-Ortiz [10] desarrolló un modelo numérico para turbinas de eje vertical tipo Darrieus/Helicoidal, destacando el efecto de la relación de

aspecto y las pérdidas mecánicas sobre el rendimiento global. Estos trabajos coinciden en que las pérdidas por fricción, la desalineación del flujo y el acoplamiento ineficiente con el generador son las principales limitaciones para alcanzar mayores eficiencias en prototipos a pequeña escala.

En la última década, la tendencia internacional se ha orientado hacia la aplicación de manufactura aditiva (impresión 3D) para el desarrollo rápido y de bajo costo de turbinas hidrocinéticas experimentales. Estudios recientes han demostrado que esta tecnología permite ajustar la geometría del rotor a las condiciones locales de flujo, reducir tiempos de prototipado y descentralizar la producción, aspecto clave para entornos rurales. Ferraiuolo et al.[9]caracterizaron una turbina horizontal impresa en 3D operando en canales de baja velocidad, mientras Rouway et al.[11]compararon métodos SLS ((Selective Laser Sintering) y FFF (Fused Filament Fabrication) en palas de polímero reforzado (Poliamida 12 - PA12), evidenciando mejoras estructurales y de rendimiento. Del mismo modo, Rengifo et al.[12]optimizaron una turbina espiral de Arquímedes fabricada en PLA, y Armañanzas et al.[13]validaron un modelo de turbina en tubería cerrada mediante impresión 3D. Estos avances confirman que la manufactura aditiva se consolida como una herramienta viable para la generación hidrocinética descentralizada, aunque persisten desafíos en resistencia a la erosión, precisión geométrica y certificación de materiales, que este estudio aborda en el contexto rural colombiano.

Aporte de esta investigación

El presente estudio aporta una implementación integral y experimental en condiciones reales, integrando simulación aerodinámica, manufactura digital y evaluación hidráulica en campo. Se eligió un perfil NACA 0015 por su simetría y estabilidad angular en flujos bidireccionales. La combinación de diseño paramétrico CAD, simulaciones en QBlade y fabricación aditiva permitió una iteración rápida entre el modelado y las pruebas experimentales.

A diferencia de trabajos previos centrados exclusivamente en entornos de laboratorio, este prototipo fue instalado directamente en el cauce natural, evaluando los efectos de la canalización parcial del flujo mediante una tubería de 2.5 m de longitud y 0.2 m de diámetro. Esto permitió analizar cómo la geometría del canal y la aceleración local del fluido influyen sobre el coeficiente de potencia real y la estabilidad rotacional.

Formulación del problema y pregunta de investigación

La investigación se centra en la pregunta: ¿Qué parámetros de diseño y construcción necesita un prototipo de microturbina hidráulica para ser aprovechado como fuente de energía alternativa en ríos de caudal modesto? Para responder a este interrogante, se definieron cinco objetivos específicos y secuenciales: primero, caracterizar hidráulicamente el cauce seleccionado en la vereda La Judía; segundo, diseñar un rotor Gorlov optimizado para velocidades menores a 0.5 m/s; tercero, fabricar el prototipo mediante impresión 3D y ensamblaje modular; cuarto, evaluar experimentalmente la eficiencia global del sistema bajo dos escenarios (flujo libre y canalizado); y finalmente, analizar los resultados obtenidos frente al límite teórico de Betz y a investigaciones comparables en el área.

Relevancia ambiental y educativa

El uso de tecnologías hidrocinéticas de baja potencia no solo contribuye a la reducción de emisiones, sino que promueve un modelo de aprendizaje activo en comunidades rurales. La instalación del prototipo en una institución educativa local permitió integrar la ciencia aplicada con la sensibilización ambiental, demostrando cómo un recurso natural puede transformarse en energía limpia de forma tangible.

De igual forma, la simplicidad constructiva y la accesibilidad del material, principalmente PETG impreso en 3D y PVC industrial, facilitan su replicabilidad en entornos de bajos recursos. Su bajo impacto ambiental, al no requerir represamientos ni alteraciones del cauce, refuerza la compatibilidad de este tipo de tecnologías con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima).

METODOLOGÍA

La metodología empleada en el desarrollo del prototipo de microturbina hidráulica se estructuró en cinco fases principales: (1) caracterización hidráulica del río, (2) diseño aerodinámico y cálculo de parámetros del rotor, (3) fabricación y ensamblaje del sistema, (4) implementación experimental en campo, y (5) procesamiento y análisis de datos. El proceso completo se resume en la Figura 1, que ilustra las etapas seguidas desde la caracterización inicial del entorno hasta la validación del prototipo.

El enfoque metodológico adoptado fue experimental y analítico, fundamentado en los principios de la ingeniería hidráulica, la mecánica de fluidos y el diseño asistido por computador (CAD), asegurando coherencia entre los resultados numéricos, el comportamiento físico observado y las condiciones reales de operación.

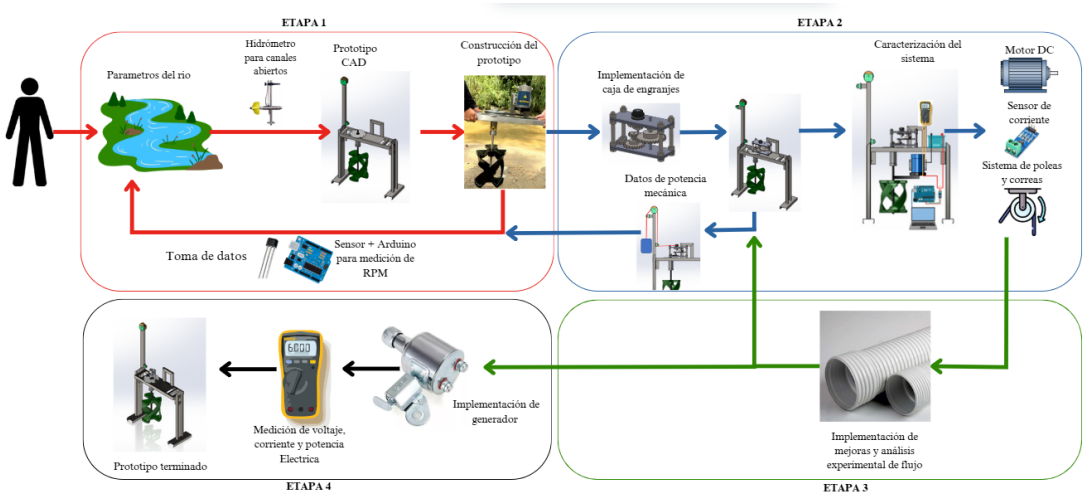

Fig. 1. *Etapas seguidas desde la caracterización inicial del entorno hasta la validación del prototipo.*

Fuente: elaboración propia

El estudio se realizó en la vereda La Judía, municipio de Floridablanca (Santander), seleccionada por presentar un flujo permanente con velocidad promedio de 0.38 m/s y un caudal aproximado de 0,49 m³/s. Las mediciones se efectuaron mediante molinete SEBA F1, aplicando el método de Ven Te Chow[14], que considera la velocidad a 0,6 de la profundidad total para estimar la media representativa del flujo. El cálculo de la potencia hidráulica disponible se basó en la ecuación de energía cinética del flujo, adecuada para sistemas de flujo libre sin salto de agua. De este modo, se obtiene la potencia promedio real del río bajo condiciones naturales:

$$P_h = \frac{1}{2}\rho A v^3 \rightarrow P_h = 37.33\ W \qquad (2)$$

Dondeρ=997 (kg)/(m^(3)),A=1.3125 m^2yv=0.38 (m)/(s).

Asimismo, se calculó la potencia máxima teórica según el límite de Betz (59.3 %)[7], obteniéndose un valor que se constituye en el umbral físico superior para cualquier conversión hidrocinética sin pérdidas.

$$P_{Betz} = 0.593\ x\ P_h \rightarrow P_{Betz} = 22.14\ W \qquad (3)$$

Diseño aerodinámico del rotor

Selección del perfil y parámetros geométricos

El rotor se diseñó con la configuración de Turbina Helicoidal de Gorlov (GHT), empleando tres álabes helicoidales de perfil NACA 0015. Este perfil se eligió por su simetría, estabilidad y bajo coeficiente de arrastre en regímenes laminares. Los parámetros finales del diseño se detallan en la Tabla 1, mientras que el diseño CAD del rotor tipo Gorlov, desarrollado en SolidWorks, se presenta en la Figura. 2.

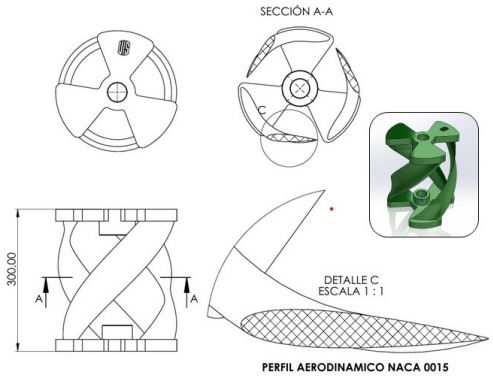

Fig. 2. *Diseño CAD del rotor tipo Gorlov (NACA 0015) con inclinación helicoidal.*
Fuente: elaboración propia

Tabla 1. Características geométricas del rotor

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro	0.25	m
Altura	0.30	m
Ángulo de ataque	14.5	°
Ángulo de inclinación helicoidal	48.9	°
Cuerda	0.105	m
Número de álabes	3	
Material	PETG (impresión 3D)	

Fuente: elaboración propia

Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re), calculado utilizando los valores que se muestran a continuación, permitió determinar que el régimen de flujo predominante es un turbulento bajo, lo cual es característico de los flujos naturales en ríos de baja profundidad.

ρ=997 (kg)/(m^(3)),U=0.38 (m)/(s),L_c=0.105 *m*,μ=1.002 x 10^(3) Pa−s

$$Re = \frac{\rho U L_c}{\mu} \rightarrow Re \approx 39900 \quad (4)$$

Relación de velocidad en la punta (TSR)

La Relación de velocidad en la punta (Tip Speed Ratio) (λ) se determinó según:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (5)$$

dondeωes la velocidad angular (rad/s), R = 0.125 m yv=0.38 (m)/(s).

En condiciones de prueba se registraron 130 RPM (flujo canalizado), equivalentes aω=13.61 (rad)/(s). Sustituyendo:

$$\lambda = \frac{13.61\ x\ 0.25}{0.38} \rightarrow \lambda = 4.47$$

Este valor se encuentra dentro del rango óptimo (3 ≤ λ ≤ 5) para rotores tipo Gorlov, garantizando estabilidad y buena respuesta dinámica.

Solidez del rotor

La solidez (σ) expresa la relación entre el área total de las palas y el área barrida por el rotor. A partir de los valores*n*=3,C=0.105 myD=0.25 m, se obtuvo un valor deσ=0.4. Este nivel de solidez se considera moderado, ya que proporciona un equilibrio adecuado entre el par de arranque y la eficiencia aerodinámica del rotor tipo Gorlov.

$$\sigma = \frac{n\,C}{\pi D} \rightarrow \sigma = \frac{3\ x\ 0.105}{\pi x\ 0.25} \rightarrow \sigma = 0.40 \quad (6)$$

Fabricación y ensamblaje

El prototipo fue manufacturado mediante impresión 3D FDM en filamento PETG de alta resistencia, con densidad 1.27 g/cm³, temperatura de extrusión 240 °C y altura de capa de 0.2 mm. Posteriormente, las piezas fueron tratadas con masilla epóxica y pintura impermeable para mejorar la resistencia superficial.

El diseño modular permitió un fácil transporte y montaje en campo, así como sustitución rápida de componentes en caso de fallo. El ensamblaje final (ver Fig. 3) integró:

- Rotor helicoidal de 0.25 m de diámetro.
- Caja de engranajes 1:12 fabricada en PETG.
- Generador AC de 12 V y 6 W, tipo dinamo.
- Estructura soporte en acero inoxidable AISI 304, con refuerzos de 4.5 mm de espesor.
- Eje principal de acero AISI 304 Ø10 mm, con rodamientos sellados para agua.



Fig. 3. *Modulo fabricado, Rotor impreso en 3D y pruebas con flujo libre (sin canalización)*
Fuente: elaboración propia

Implementación experimental

Las pruebas se realizaron en el cauce natural bajo dos configuraciones:

- Flujo libre o sea sin canalización (ver Fig. 3).
- Flujo canalizado mediante una tubería de PVC de 2.5 m de longitud y 15 pulgadas de diámetro, que concentró el flujo reduciendo pérdidas laterales (ver Fig. 4).



Fig. 4. *Ensayos con canalización mediante tubería de PVC para la estabilización del flujo.*
Fuente: elaboración propia

Los datos experimentales, promediados a partir de 30 mediciones consecutivas para minimizar la dispersión estadística, incluyeron el registro de la velocidad del flujo tanto aguas arriba como aguas abajo, las RPM del rotor medidas con un tacómetro óptico, el voltaje y la corriente de salida del generador (con medición digital), y las condiciones de temperatura y ambientales. Al comparar los resultados, se encontró que el promedio de RPM con canalización fue de 129.8, superando las 114 RPM obtenidas sin canalización, lo que significa un aumento del 13.9% en la velocidad angular.

Procesamiento y análisis de eficiencia

La eficiencia global del sistema(η_{total})se determinó comparando la potencia eléctrica obtenida con la potencia hidráulica disponible.

$$\eta_{total} = \frac{P_{electrica}}{P_h} x\ 100 \qquad (7)$$

Donde$P_{electrica}$=3.3 WyP_h=37.33 W.

Por tanto:

$$\eta_{total} = 8.84\%$$

Este valor concuerda con el coeficiente de potencia experimentalC_p=0.088, dentro del rango reportado para microturbinas experimentales de baja velocidad.

Para reforzar la confiabilidad de los resultados, se realizó un análisis cualitativo de la incertidumbre de medición. El molinete SEBA F1 presenta una precisión de ±2 % en velocidad, mientras que el multímetro digital registra voltaje y corriente con exactitud de ±0.5 % y ±1 %, respectivamente. Se consideró además la variación de temperatura del agua (±1.5 °C), que afecta levemente la densidad y viscosidad del fluido. El efecto combinado de estas fuentes de error se estima inferior al 5 % del valor medido, por lo que no modifica de forma significativa la eficiencia ni la comparación entre flujo libre y canalizado.

Validación de laboratorio

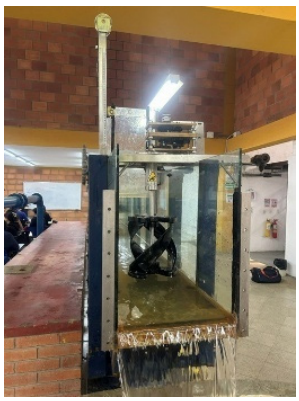

Fig. 5. *Ensayos de laboratorio en canal hidráulico.*
Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, el sistema se probó en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Industrial de Santander, utilizando un canal de ensayos (ver Fig. 5). No obstante, el flujo disponible en dicho canal presentó una profundidad y velocidad insuficientes para cubrir completamente el rotor, lo que limitó la posibilidad de realizar una validación integral en condiciones controladas. Aun así, las pruebas resultaron valiosas para verificar la rigidez estructural, el balance dinámico del rotor y el acoplamiento mecánico del sistema, confirmando la estabilidad del conjunto durante la rotación libre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación experimental del prototipo permitió caracterizar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación y contrastar los resultados obtenidos con los valores teóricos estimados y con estudios previos sobre turbinas hidrocinéticas de pequeña escala. El análisis se estructuró en tres niveles complementarios: primero, se examinó el desempeño hidráulico y rotacional del rotor; luego, se determinó la eficiencia energética y la potencia generada; y finalmente, se realizó una comparación teórica para identificar los factores limitantes del rendimiento global.

Desempeño hidráulico y rotacional

Las pruebas experimentales se realizaron en dos escenarios diferenciados: en flujo libre, sin canalización, y en flujo canalizado mediante una tubería de PVC de 2.5 m de longitud y 15 pulgadas de diámetro. En ambos casos se registraron las revoluciones por minuto (RPM) del rotor, observándose un incremento notable en la estabilidad y en la velocidad de rotación cuando el flujo fue canalizado, debido a la reducción de turbulencias y pérdidas laterales. La Tabla 2 presenta los valores promedio obtenidos a partir de las 30 repeticiones efectuadas en campo, los cuales reflejan el comportamiento dinámico del rotor bajo ambas condiciones de ensayo.

Se observó que la tubería no solo incrementó la velocidad angular, sino que redujo significativamente la fluctuación de RPM entre mediciones consecutivas. Este comportamiento se atribuye a una disminución del gradiente transversal de velocidad y al desarrollo de un flujo más uniforme en la sección de entrada, tal como lo proponen estudios de canalización de flujo en turbinas hidrocinéticas[14]. Además, el efecto Venturi parcial inducido por la reducción de sección generó una aceleración del fluido aguas abajo, lo que incrementó el número local de Reynolds y favoreció el régimen turbulento deseado para la operación estable del rotor.

Potencia eléctrica generada

Tabla 2. Resultados experimentales de velocidad angular

Condición de flujo	RPM promedio	ω (rad/s)	Variación (%)
Flujo libre	114.2	11.94	—
Flujo canalizado	129.8	13.61	+13.9

Fuente: elaboración propia

El voltaje de salida del generador de corriente alterna (AC) se registró en intervalos de 10 segundos mediante un multímetro digital. En condiciones de flujo canalizado, los valores promedio obtenidos fueron de V=2.9 V eI=1.14 A, lo que corresponde a una potencia eléctrica efectiva de 3.3 W. Este resultado es significativo si se consideran las dimensiones reducidas del rotor (0.25 m de diámetro) y la baja velocidad del flujo (0.38 m/s). En contraste, bajo flujo libre, la potencia media alcanzada fue de 2.1 W., evidenciando un incremento del 57 % al canalizar el flujo, asociado a una mejor concentración de energía cinética y a la disminución de turbulencias locales.

Eficiencia hidráulica global

La eficiencia global del sistema se calculó mediante la relación entre la potencia eléctrica obtenida y la potencia hidráulica disponible (Ecuación 7). Los resultados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Eficiencia del sistema bajo diferentes configuraciones

Condición	Potencia hidráulica (W)	Potencia eléctrica (W)	Eficiencia total (%)
Flujo libre	37.33	2.1	5.6
Flujo canalizado	37.33	3.3	8.8

Fuente: elaboración propia

El coeficiente de potencia experimental (C_p) obtenido para el prototipo alcanzó un valor máximo de 0.088 bajo condiciones de flujo canalizado, lo que equivale a una eficiencia global del 8.8 %. El valor obtenido se encuentra dentro de los rangos esperados para microturbinas hidrocinéticas de pequeña escala, lo que respalda la validez del diseño y la consistencia de las mediciones experimentales. Aunque la eficiencia es modesta en comparación con el límite teórico de Betz ($C_{p,Betz}$=0.593), esta diferencia se explica por las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema, el bajo número de Reynolds (≈ 39 900) y la limitada velocidad del flujo (0.38 m/s), factores que restringen la transferencia de momento y la generación de sustentación en los álabes. En flujos de mayor velocidad (> 0.6 m/s) se esperaría un incremento proporcional de C_py de la potencia generada, lo que sugiere un margen de mejora relevante para futuras optimizaciones geométricas y operativas del rotor.

Relación $Cp-\lambda$

El comportamiento aerodinámico del rotor se analizó a partir de la relación entre el coeficiente de potencia (C_p) y la relación de velocidad en la punta (λ), parámetro fundamental para evaluar la eficiencia de conversión energética en turbinas hidrocinéticas.

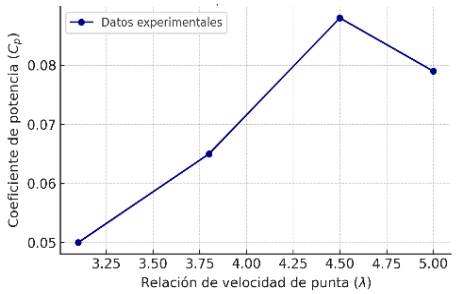

Fig. 6. *Curva experimental de la relación C_p-λ para el rotor tipo Gorlov.*
Fuente: elaboración propia

Los valores experimentales obtenidos (Tabla 5) evidencian un incremento progresivo de C_p hasta alcanzar un máximo de C_p=0.088 para λopt =4.5 (ver Fig. 6), en concordancia con la tendencia típica de las turbinas de sustentación. Este comportamiento coincide con las predicciones numéricas obtenidas mediante simulaciones en QBlade, lo que valida el diseño geométrico del rotor y la selección del perfil NACA 0015.

La Tabla 5 presenta los valores experimentales obtenidos para diferentes relaciones de velocidad de punta. En ella se observa el punto de máximo rendimiento aerodinámico seguido de un descenso progresivo asociado al incremento del arrastre y a las pérdidas por flujo separado, comportamiento característico en rotores de sustentación de eje vertical.

Tabla 5. Relación experimental $Cp-\lambda$

λ	C_p
3.1	0.050
3.8	0.065
4.5	0.088
5.0	0.079

Fuente: elaboración propia

Influencia de la canalización y pérdidas del sistema

La canalización mediante tubería tuvo un efecto directo en la estabilidad del flujo, reduciendo el nivel de turbulencia transversal y mejorando la uniformidad del campo de velocidades. Esto se reflejó en un aumento de las RPM y delC_p, pero también introdujo nuevas pérdidas de carga por fricción en la pared del tubo, que se estimaron mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{v^2}{2g} \qquad (8)$$

donde f = 0.03, L = 2.5 m, D = 0.381 m, v = 0.38 m/s, y g=9.81$\frac{m}{s^2}$.

El resultado fueh_f=0.0114 m, una pérdida insignificante frente al beneficio hidráulico obtenido.

Por otro lado, el acoplamiento mecánico entre el eje y el generador presentó pérdidas de potencia cercanas al 15%, principalmente por fricción en rodamientos y juego angular en engranajes impresos en 3D. Estas pérdidas podrían disminuirse mediante mecanizado CNC de precisión, lubricación sellada y alineación óptica del sistema de transmisión.

Comparación con otros estudios

Los resultados obtenidos se contrastaron con investigaciones recientes sobre microturbinas hidrocinéticas de baja velocidad, publicadas entre 2019 y 2025. En general, estos estudios coinciden en que la eficiencia de conversión (C_p) depende principalmente de la velocidad incidente del flujo, el grado de confinamiento hidráulico y la geometría del rotor.

Yosry et al. analizaron experimentalmente una turbina de eje vertical de pequeña escala mediante simulaciones VOF-3D considerando la variación de la superficie libre del canal, demostrando que el bloqueo hidráulico puede aumentar el $C_p$hasta en un 20 % respecto al flujo libre[15]. De forma complementaria, Espina-Valdés et al. compararon las configuraciones Gorlov y Darrieus en un túnel hidrodinámico, encontrando mayor estabilidad y par en el rotor helicoidal, aunque advirtieron una sobreestimación del $C_p$en canales confinados[8].

En una línea metodológica diferente, Abed et al. desarrollaron un modelo hidrodinámico eficiente para predecir el desempeño de turbinas de flujo cruzado, validado experimentalmente en velocidades entre 0.43 y 0.73 m/s, mostrando una alta concordancia con los resultados numéricos[16]. Por su parte, Tunio et al. evaluaron el efecto de toberas de refuerzo sobre turbinas Darrieus, verificando que estas pueden duplicar la potencia generada, aunque con el costo de mayores esfuerzos estructurales[17].

Más recientemente, Pineda et al. optimizaron en el laboratorio una turbina Gorlov impresa en 3D para aplicaciones fluviales mediante la metodología de superficie de respuesta, alcanzando un $C_p$de 0.10 en condiciones de baja velocidad (0.45 m/s) [18]. Asimismo, Chica et al. evaluaron a escala real una turbina hidrocinética de eje horizontal para aplicaciones rurales en Colombia, logrando un$C_p$de 0,09 y subrayando la viabilidad de soluciones de generación distribuida en países en desarrollo[19].

Comparativamente, el prototipo desarrollado en este estudio presentó un C_p=0.088bajo flujo canalizado, valor coherente con los rangos reportados (0.05–0.12) para sistemas experimentales de baja velocidad y sin confinamiento. Este resultado respalda la validez del enfoque adoptado, demostrando la pertinencia técnica y social de soluciones hidrocinéticas de bajo costo, bajo impacto ambiental y alta reproducibilidad para entornos rurales.

Implicaciones sociales y pedagógicas

El prototipo demostró su potencial como herramienta educativa al facilitar la comprensión práctica de la conversión de energía hidráulica en eléctrica en escuelas rurales. Su bajo costo, fabricación local y operación sin impacto ambiental lo convierten en una tecnología apropiada para comunidades rurales. Gracias a su modularidad y fácil mantenimiento, puede integrarse en programas de energía descentralizada y formación técnica comunitaria. Este tipo de dispositivos puede incorporarse a esquemas de microrredes experimentales y laboratorios didácticos, como los propuestos por Santos-Montes et al.[20], fomentando la enseñanza práctica de la conversión y gestión de energía.

Iniciativas tecnológicas de bajo costo orientadas a la educación ambiental y energética, como la automatización de digestores anaerobios para producción de biogás desarrolladas en el país[21], refuerzan el papel de la innovación local como herramienta pedagógica para la sostenibilidad rural.

Limitaciones del estudio

El principal límite del presente estudio radica en la baja velocidad del flujo (≈ 0.38 m/s), que restringió la potencia generable y, en consecuencia, la eficiencia global del sistema. Se recomienda realizar futuras evaluaciones en escenarios con velocidades comprendidas entre 0.6 y 0.8 m/s, donde el coeficiente de potencia$C_p$podría incrementarse significativamente.

Por otro lado, la precisión geométrica de las palas fabricadas mediante impresión 3D por deposición fundida (FDM) presentó pequeñas desviaciones en el perfil aerodinámico y en el ángulo de torsión, afectando levemente la distribución de sustentación y el balance dinámico del rotor. Estas imperfecciones pueden mitigarse mediante el uso de impresoras de mayor resolución, control térmico estable, calibración fina del extrusor y postprocesos de alisado superficial que mejoren la calidad del acabado y reduzcan las irregularidades de borde.

Finalmente, el generador AC empleado no fue diseñado para bajas revoluciones, lo que limitó la conversión electromecánica total. Se propone en futuras iteraciones incorporar alternadores multipolares o generadores de imanes permanentes (PMSG) de baja velocidad, más adecuados para aplicaciones hidrocinéticas.

CONCLUSIONES

El desarrollo y evaluación experimental de la microturbina hidráulica de rotor tipo Gorlov demostraron la viabilidad técnica y operativa de aprovechar la energía cinética de corrientes fluviales de bajo caudal en entornos rurales colombianos. El sistema, diseñado con criterios aerodinámicos y fabricado mediante manufactura aditiva, evidenció un desempeño estable, reproducible y coherente con los valores de eficiencia reportados en la literatura reciente.

Asimismo, la experiencia en la vereda La Judía validó el principio de que la energía fluvial puede transformarse en electricidad útil mediante dispositivos simples, sostenibles y de bajo costo, sin requerir grandes infraestructuras. Este enfoque consolida un modelo de ingeniería aplicada y educación tecnológica, donde la innovación surge de la contextualización local, la creatividad y el conocimiento práctico.

A futuro, se prevé escalar el diseño del rotor y evaluar su integración en microrredes rurales híbridas, donde pueda complementarse con fuentes solares o eólicas para mejorar la confiabilidad del suministro energético en comunidades no interconectadas. En consecuencia, las microturbinas hidrocinéticas de pequeña escala se perfilan como una herramienta estratégica para la transición energética justa y descentralizada en Colombia y América Latina. Tal como señalan Palma et al.[22], la adopción de soluciones renovables y medidas de eficiencia energética en instituciones públicas representa una estrategia clave para avanzar hacia la sostenibilidad energética nacional, coherente con los resultados obtenidos en este estudio.

REFERENCIAS

[1] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), Documento de Soporte Resolución 093 de 2011 – Zonas No Interconectadas, Bogotá D.C., Colombia, 2011.

[2] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Atlas Hidrológico de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2020.

[3] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Plan Energético Nacional 2020–2050, Bogotá D.C., Colombia, 2021.

[4] F. A. Lara Vargas, M. Á. Ortiz Padilla y C. A. Vargas Salgado, "Análisis experimental comparativo de la producción anual de energía de una planta solar fotovoltaica de 72 kW_n instalada sobre techo para autoconsumo en la ciudad de Montería utilizando PVsyst, PVGIS y SAM," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 43, pp. 51–56, 2024.

[5] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Manual para la Medición de Caudales en Corrientes Superficiales, Bogotá D.C., Colombia, 2018.

[6] I. Gorlov, "Helical Turbine and Fish Friendly Hydropower Generation Method," U.S. Patent 5,451,137, 1995.

[7] A. Betz, Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1926.

[8] R. Espina-Valdés, R. Ferraiuolo, A. Fernández-Jiménez, G. Del Giudice, E. Álvarez-Álvarez y M. Giugni, "Experimental comparison between hydrokinetic turbines: Assessment of Gorlov and Darrieus configurations in low-velocity flows," *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4726, 2022. doi: 10.3390/en15134726.

[9] R. Ferraiuolo, A. Gharib-Yosry, A. Fernández-Jiménez, R. Espina-Valdés, E. Álvarez-Álvarez, G. Del Giudice y M. Giugni, "Design and experimental performance characterization of a three-blade horizontal-axis hydrokinetic water turbine in a low-velocity channel," *Environmental Sciences Proceedings*, vol. 21, no. 1, art. 62, 2022. doi: 10.3390/environsciproc2022021062.

[10] J. C. Pineda-Ortiz, "Métodos numéricos para el desarrollo de una turbina hidrocinética de eje vertical tipo Darrieus/Helicoidal," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 1, pp. 78–94, 2020. [En línea]. Disponible en: https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/10731

[11] M. Rouway, M. Nachtane, M. Tarfaoui y S. Jamoudi Sbai, "3D printing of a tidal turbine blade using two methods of SLS and FFF of a reinforced PA12 composite: A comparative study," *Sustainable Marine Structures*, vol. 6, no. 1, pp. 1–19, Mar. 2024. doi: 10.36956/sms.v6i1.1002.

[12] J. Rengifo, L. Velásquez, E. Chica y A. Rubio-Clemente, "Optimization of the Archimedean spiral hydrokinetic turbine design using response surface methodology," *Sci*, vol. 7, no. 3, art. 100, 2025. doi: 10.3390/sci7030100.

[13] J. Armañanzas, M. Alcalá, J. P. Fuertes, J. León, A. Torres y M. Gil, "Design and optimization of LCA blade turbine for electrical energy generation in closed pipes," *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, vol. 19, pp. 64–71, 2024. doi: 10.37394/232013.2024.19.7.

[14] V. T. Chow, Open Channel Hydraulics, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1959.

[15] A. G. Yosry, E. Á. Álvarez, R. Espina-Valdés, A. Pandal y E. B. Marigorta, "Experimental and multiphase modeling of small vertical-axis hydrokinetic turbine with free-surface variations," *Renewable Energy*, vol. 203, pp. 788–801, 2023. doi: 10.1016/j.renene.2022.12.114.

[16] B. Abed et al., "An efficient hydrodynamic method for cross-flow turbines performance evaluation and comparison with the experiment," *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 993–1003, 2021. doi: 10.1016/j.renene.2021.09.004.

[17] I. A. Tunio et al., "Investigation of duct-augmented system effect on the overall performance of straight-blade Darrieus hydrokinetic turbine," *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 143–154, 2020. doi: 10.1016/j.renene.2020.02.012.

[18] J. C. Pineda, A. Rubio-Clemente y E. Chica, "Optimization of a Gorlov helical turbine for hydrokinetic application using the response surface methodology and experimental tests," *Energies*, vol. 17, no. 22, p. 5747, 2024. doi: 10.3390/en17225747.

[19] E. Chica, L. Velásquez y A. Rubio-Clemente, "Full-scale experimental assessment of a horizontal-axis hydrokinetic turbine for river applications: A challenge for developing countries," *Energies*, vol. 18, no. 7, p. 1657, 2025. doi: 10.3390/en18071657.

[20] A. J. Santos-Montes, D. F. Duarte, C. J. Gómez y J. C. Pérez, "Laboratory prototype for testing electrical devices and emulating real microgrids," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 45, pp. 216–224, 2025. doi: 10.24054/rcta.v1i45.3477.

[21] C. A. V. Herrera, J. A. Sánchez, J. A. Cely y D. A. Arévalo, "Automatización de un digestor anaerobio con sistema embebido para la producción de biogás a partir de residuo del aceite de palma," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 2, no. 44, pp. 25–34, 2024.

[22] H. H. Palma, D. J. Novoa y D. Mendoza Cásseres, "Energías renovables y medidas de eficiencia energética aplicables a las instituciones prestadoras de salud en Colombia," *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 41, pp. 123–131, 2023.

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Jorge Enrique Meneses Flórez, Kevin Alexander Ramírez Rodríguez, Henry David Méndez Chávez.

Redacción - revisión y edición: Jorge Enrique Meneses Flórez, Kevin Alexander Ramírez Rodríguez, Henry David Méndez Chávez.