

Universidad del Valle

**Desarrollo de un dispositivo experimental tipo turbina
hidrocinética para bajos caudales**

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Santiago de Cali, Colombia
2025

Desarrollo de un dispositivo experimental tipo turbina hidrocínética para bajos caudales

John Harvy Delgado Parra

Documento presentado como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

Director:

Ing. Efraín Baldemar del Risco Moreno, PhD

Codirector:

Ing. Camilo Penagos Realpe, B Eng

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Santiago de Cali, Colombia

2025

DEDICATORIA

*A mi querida madre
Maria Cristina Parra*

*Y a mi incondicional compañera de vida
Lina Fernanda Echeverry*

AGRADECIMIENTOS

LA realización de esta tesis ha sido un camino que, aunque desafiante, no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas importantes. A todos ellos, quiero expresar mi sincero agradecimiento.

Primero a mi director de tesis, el PhD. Efraín del Risco por su guía constante, su paciencia y su invaluable conocimiento. Su dirección fue clave en cada paso de este proyecto. También agradezco a mi codirector, el ingeniero Camilo Penagos Realpe, por sus aportes y su visión crítica que ayudaron a mejorar este trabajo de manera significativa.

A mis compañeros tesisistas con quienes compartí este proceso, gracias por las conversaciones, las ideas y el apoyo. Fue un gusto aprender y debatir con ustedes, y su compañía hizo que todo fuera mucho más llevadero.

Quiero agradecer al ingeniero Paulo Trujillo por toda su ayuda técnica y asesoría, que fueron muy importantes. Y a Hebert Hernández, el técnico de laboratorio, por su dedicación y colaboración diaria.

Finalmente, y de una forma muy especial a mi familia y a mi pareja. Su apoyo incondicional y su ayuda económica fueron esenciales para que pudiera dedicarme por completo a este proyecto. Sin ellos, llegar hasta aquí habría sido imposible. Este logro también es suyo.

RESUMEN.

Las fuentes de Energía Renovable (FER) han experimentado un notable incremento a nivel global en la producción de electricidad. En Colombia, la implementación de sistemas de energía hidrocinética ha sido un tema de gran interés, considerándose una opción prometedora para la electrificación rural en zonas que carecen de conexión a la red eléctrica pero que tienen acceso a recursos hídricos. Por esta razón, se desarrolló y evaluó experimentalmente un dispositivo tipo turbina hidrocinética para bajos caudales.

El diseño de este dispositivo innovador se basó en los principios físicos y operativos de las turbinas de Gorlov y los hidrogeneradores de vórtice verticales. Para el rodete, se empleó una modificación de la turbina de Gorlov. A diferencia de los rodetes Gorlov tradicionales, que mantienen un diámetro constante en sus extremos superior e inferior, este diseño presenta un diámetro máximo de 11,20 cm y un mínimo de 3,965 cm, resultante de un ángulo de conicidad de 15 grados. Como perfil aerodinámico para las palas se utilizó el NACA 0018. Esta conicidad influye directamente en su rendimiento hidrodinámico.

La manufactura aditiva, específicamente la fabricación por filamento fundido (FFF), fue fundamental en la materialización de este proyecto. Esta técnica permitió la elaboración precisa de la turbina hidrocinética y su rodete mediante la impresora Creality Ender 3v3-Plus, utilizando ácido poliláctico (PLA) como material base debido a sus propiedades y facilidad de procesamiento.

El dispositivo fue diseñado y construido específicamente para ajustarse a las dimensiones del canal abierto del laboratorio de fluidos e hidráulica de la escuela EIDENAR, en la Universidad del Valle. Fue en este mismo canal donde se llevó a cabo la verificación y caracterización experimental de este.

La evaluación experimental del dispositivo se llevó a cabo mediante la toma de ocho puntos, el proceso incluyó la medición del torque mecánico para la estimación de la potencia, el aforo volumétrico del flujo de descarga del dispositivo y la velocidad angular del rodete. Se alcanzó una potencia global máxima de $0,4234 \pm 0,00782$ W y una eficiencia máxima global del $35,7\% \pm 0,0422\%$ a $18,4045 \pm 0,0210$ rad/s. Además, se registró un C_p máximo local de $0,3737 \pm 0,0097$ y un C_t máximo local de 0,1131 a un λ (coeficiente de velocidad de punta) de $1,9977 \pm 0,0066$, con un torque máximo local de $0,0123 \pm 0,0003$ N·m a $17,6872 \pm 0,0105$ rad/s. Estos hallazgos demuestran la viabilidad del dispositivo como una solución potencial para la generación de energía hidrocinética en bajos caudales, estableciendo una base sólida para futuras investigaciones y mejoras.

Palabras clave: Mecánica de Fluidos, Energías Renovables, Diseño Asistido por Computadora (CAD), Turbina hidrocinética, hidrogeneradores de vórtices verticales

ÍNDICE GENERAL

Resumen.	IV
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Identificación y planteamiento del problema	2
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivos Generales	4
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Estado del arte	5
2. Marco de referencia	7
2.1. Energía hidrocínética	7
2.2. Turbinas hidrocínéticas	8
2.3. Principales parámetros dimensionales de turbinas	9
2.4. Turbina de Gorlov	10
2.5. Perfil NACA	11
2.5.1. Serie de Cuatro Dígitos	11
2.5.2. Serie de Cinco Dígitos	11
2.5.3. Serie de Cuatro y Cinco Dígitos Modificada	11
2.5.4. Serie 1 o Serie 16	12
2.5.5. Serie 6	12
2.5.6. Serie 7	12
2.5.7. Serie 8	12
2.6. Flujo Giratorio	12
2.6.1. Vórtice	15
2.6.2. Aplicaciones	15
2.7. Hidrogenerador de vórtice vertical	16
2.7.1. Componentes de un hidrogenerador de vórtices vertical	17
2.8. Análisis dimensional	19
3. Marco Metodológico	20
3.1. Desarrollo del dispositivo	21
3.1.1. Diseño Conceptual y detallado	21
3.1.2. Diseño de la carcasa	21

3.1.3. Diseño del Rodete	25
3.2. Construcción del dispositivo	28
3.2.1. Manufactura adictiva	28
3.2.2. Postprocesado y ensamble del dispositivo	34
3.3. Análisis dimensional	37
3.3.1. Análisis de los grupos a dimensionales	39
3.4. Montaje experimental.	41
3.4.1. Canal de pruebas.	41
3.4.2. Adquisición de datos	43
3.4.3. Aforo volumétrico	44
3.4.4. Medición de torque	45
3.4.5. Medición de RPM.	48
3.4.6. Estimación experimental del rendimiento del dispositivo.	49
4. Resultados y discusiones.	54
4.1. Discusión	62
5. Conclusiones	64
6. Recomendaciones	66
A. Datos experimentales	67
A.1. Resultados experimentales	67
A.2. Grupos Pi	71
B. Planos	75
Bibliografía	81

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Dispositivo sumergible	3
1.2. Árbol del problema	4
1.3. Árbol de objetivos	4
2.1. Tipos de turbinas hidrocínéticas.	8
2.2. Turbinas hidrocínéticas de flujo cruzado.	9
2.3. Turbina de Gorlov con doble pala.	10
2.4. Ejemplo de geometrías generadoras de flujo giratorio.	13
2.5. Ejemplo de fenómenos natural de flujo giratorio.	14
2.6. Esquema típico de un sistema GWVG con cámara cilíndrica.	17
2.7. Cámaras de hidrogenadores comunes	18
2.8. Geometrías de tanques de una GWVG.	18
3.1. Metodología propuesta	20
3.2. Geometría del dispositivo.	22
3.3. Pez caja.	23
3.4. Vista isométrica del dispositivo	24
3.5. Esquema de la geometría de la carcasa	25
3.6. Rodete propuesto	27
3.7. Impresora 3D Creality Ender 3V3 Plus	29
3.8. División en 3 partes del dispositivo.	30
3.9. Cortes para el sólido 3	31
3.10. Cortes del sólido 2.	32
3.11. Primera unión de los sólidos	35
3.12. Montaje del rodete	36
3.13. Dispositivo ensamblado	36
3.14. Esquema del canal y sus componentes	42
3.15. Caudalímetro Doppler DFM 5.0.	43
3.16. Vista general del sistema de sujeción del dispositivo en el canal.	44
3.17. Vista general del sistema de aforo volumétrico.	45
3.18. Sistema de conversión de giro	46
3.19. Freno prony de referencia	47
3.20. Sistema de medición de torque	47
3.21. Montaje de medición de RPM	48
3.22. Sistema de fijación y conversión del giro del dispositivo.	49

3.23. Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) del brazo de palanca mostrando torque aplicado en el pivote, reacciones y ángulos definidos respecto al eje vertical.	51
4.1. Variación del torque promedio con respecto a la velocidad de aproximación del agua.	55
4.2. Variación del torque promedio con respecto a la velocidad angular promedio del rodete.	56
4.3. Variación de la potencia con respecto a la velocidad de aproximación del agua.	57
4.4. Variación de la potencia total generada con respecto a la velocidad angular promedio del rodete.	58
4.5. Variación de la eficiencia mecánica con respecto a la velocidad de aproximación del agua.	59
4.6. Variación de la eficiencia mecánica con respecto a la velocidad angular del rodete.	60
4.7. Variación del coeficiente de potencia promedio con respecto al coeficiente de velocidad de punta promedio.	61
4.8. Variación del coeficiente de torque con respecto al coeficiente de velocidad de punta.	62
A.1. Variación de la potencia con respecto a la velocidad angular del rodete.	68
A.2. Variación del torque con respecto a la velocidad angular del rodete.	69
A.3. Variación del coeficiente de potencia con respecto al coeficiente de velocidad de punta.	70
A.4. Variación del coeficiente de torque con respecto al coeficiente de velocidad de punta.	71
A.5.	72
A.6.	73
A.7.	74
B.1. Plano del Sólido 1.	75
B.2. Plano del Sólido 2.	76
B.3. Plano del Sólido 3 inferior.	77
B.4. Plano del Sólido 3 superior.	78
B.5. Plano de Ensamblaje del Dispositivo.	79
B.6. Plano del Rodete.	80

ÍNDICE DE CUADROS

3.1. Parámetros característicos de la parte interna del dispositivo.	23
3.2. Dimensiones característicos del dispositivo	25
3.3. Valores mínimo y máximo de la muerda del rodete	26
3.4. Parámetros detallados de la hélice/espiral del rodete	27
3.5. Dimensiones características del rodete	28
3.6. Parámetros característicos de la impresora 3D Creality Ender-3 V3 Plus . . .	29
3.7. Parámetros de impresión utilizados.	33
3.8. Detalle de impresión del dispositivo	34
3.9. Relación de componentes y conectividad de la primera fase de ensamblado.	35
3.10. Variables identificadas del sistema	38
3.11. Especificaciones del canal y sus componentes	42
3.12. Parámetros de diseño de los engranajes cónicos rectos	46
A.2. Datos experimentales del rodete derecho	68
A.1. Datos experimentales del rodete izquierdo	68
A.3. Grupos Pi Geométricos	71
A.4. Relación de la altura columna de agua con respecto al diámetro máximo del rodete	72

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

Las fuentes de energía renovable (FER) han experimentado un notable incremento a nivel global en la producción de electricidad. Hacia finales de 2018, su contribución a la generación eléctrica mundial excedía el 26%, con un aumento de aproximadamente 181 gigavatios (GW) en comparación con el año anterior. En cuanto a las nuevas instalaciones, la energía solar se posicionó a la cabeza con un 55%, seguida por la energía eólica con un 28%, y la energía hidroeléctrica con un 11%. Por cuarto año consecutivo, la capacidad adicional de FER superó la de los combustibles fósiles y nucleares combinados, un logro atribuible, en parte, a la disminución de los costos y los avances tecnológicos. La energía hidroeléctrica constituye el 48% de la capacidad renovable acumulada en operación y genera el 60% de la energía total proveniente de FER, está sigue siendo la fuente renovable predominante a nivel mundial. En 2018, la generación total de energía hidroeléctrica se calculó en 4210 teravatio-hora (TWh) [Pérez Martínez et al., 2021].

En Colombia, la implementación de sistemas de energía hidrocínética ha sido un tema de gran interés, considerándose una opción prometedora para la electrificación rural en zonas carentes de conexión a la red eléctrica pero con acceso a recursos hídricos. A pesar de enfrentar obstáculos significativos, como la falta de conocimiento, datos e información, así como las limitaciones de infraestructura y de los propios recursos hídricos, el entusiasmo por esta tecnología ha ido en aumento. Un estudio en Colombia abordó el potencial energético hidrocínético del país, al tiempo que examinó los requisitos y los impactos asociados a la aplicación de esta tecnología en diversas naciones, prestando especial atención al progreso actual de la energía hidrocínética dentro del contexto colombiano [Gómez-Giraldo et al., 2023].

La velocidad del agua en un río representa una fuente de energía limpia y constante. Para aprovechar este recurso sin la necesidad de construir grandes infraestructuras civiles, como las requeridas por las centrales hidroeléctricas tradicionales, se han desarrollado diversas turbinas para operar sumergidas en las corrientes de agua, conocidas como turbinas hidrocínéticas (THCs). Este tipo de turbina no dependen de grandes alturas o caídas de agua, lo que las convierte en una tecnología de bajo costo y rápido tiempo de implementación. Además, presentan un impacto ambiental mínimo.[Chica et al., 2015].

El concepto de aprovechar el movimiento del agua para generar energía no es nuevo. Desde las ruedas hidráulicas utilizadas en la antigüedad hasta las turbinas hidroeléctricas, la humanidad ha buscado formas eficientes de convertir la energía cinética del agua en

electricidad [Jones, 2018]. Sin embargo, los hidrogeneradores de vórtice vertical representan una evolución significativa, ya que están diseñados para operar en condiciones de flujo variable y con un impacto ambiental reducido [Garcia and Lopez, 2019]

1.2. Antecedentes

Colombia se destaca en América Latina por su considerable potencial hidroeléctrico, posicionándose como un pionero regional en la generación de energía limpia gracias a su privilegiada geografía montañosa y la abundancia de recursos hídricos. La capacidad instalada de generación hidroeléctrica del país ronda los 12 GW, lo que representa aproximadamente el 70% de la matriz energética nacional [de Minas y Energía de Colombia, 2023], asegurando una alta confiabilidad y contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental.

Las principales cuencas hidrográficas de Colombia, como la del río Magdalena, el río Cauca y la Amazonía, son fundamentales para la generación de energía hidroeléctrica. Estas cuencas no solo proporcionan un flujo constante de agua, sino que también ofrecen oportunidades para proyectos de gran y pequeña escala [IDEAM, 2018].

El aprovechamiento de la energía hidráulica en Colombia ha evolucionado significativamente desde mediados del siglo XX. La construcción de grandes centrales hidroeléctricas, como Hidroituango, el Quimbo, ha sido fundamental para satisfacer la demanda energética del país. Estas centrales han permitido aumentar la capacidad instalada y reducir la dependencia de combustibles fósiles [UPME, 2019].

Colombia, además de sus grandes proyectos hidroeléctricos, ha puesto un gran empeño en el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH). Estas PCH son cruciales porque utilizan el caudal de ríos más pequeños, lo que las hace ideales para zonas rurales y apartadas. Su importancia radica en que facilitan el desarrollo local y llevan electricidad a comunidades que de otra manera estarían aisladas [IRENA, 2020].

La construcción de represas y centrales hidroeléctricas puede tener impactos ambientales significativos, como la alteración de ecosistemas acuáticos y la afectación de comunidades locales. Es fundamental implementar medidas de mitigación y compensación para minimizar estos efectos [WWF, 2017].

El uso de tecnologías innovadoras, como turbinas de bajo impacto y sistemas de generación distribuida, puede mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos en Colombia [IRENA, 2021].

1.3. Identificación y planteamiento del problema

La primera versión del dispositivo experimental sumergible (hidrogenerador de vórtices verticales inducidos para funcionamiento en la superficie libre de los ríos, ver [Vargas, 2019]) que aprovecha la energía hidrocínética fue desarrollado en el laboratorio de mecánica de fluidos e hidráulica de la Universidad del Valle bajo la supervisión del ingeniero Efraín Baldemar del Risco Moreno y el ingeniero Pablo Cesar Trujillo Idrobo (figura 1.1).

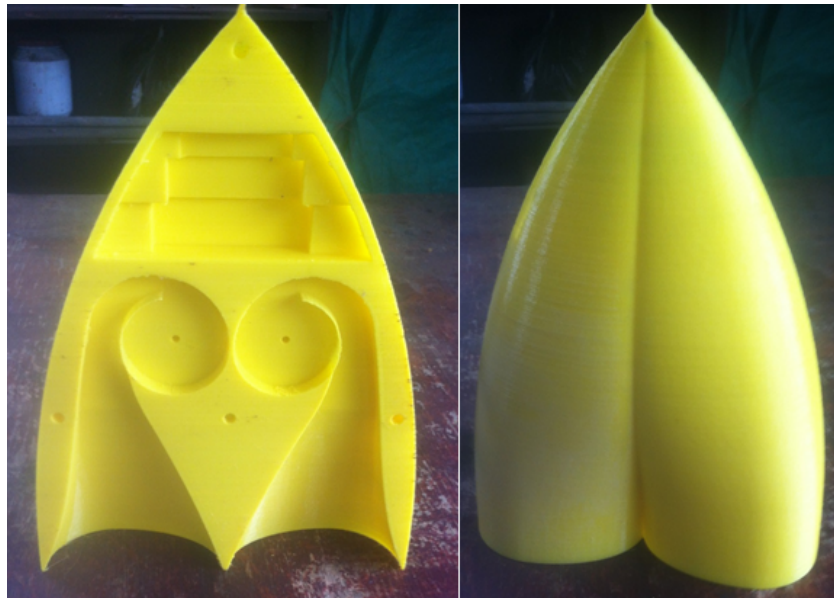


Figura 1.1: Dispositivo sumergible. Tomado de : [Vargas, 2019]

El dispositivo representado en la Figura 1.1 se hizo con dos tipos de rodetes. Este dispositivo representa un punto de partida para la propuesta del dispositivo experimental tipo turbina hidrocínética con doble rodete vertical para la captación de energía renovable. La turbina de Gorlov, por su versatilidad y alto rendimiento, se presenta como una alternativa para reemplazar los rodetes actuales. Al adaptar la turbina de Gorlov a las características específicas del flujo giratorio generado en la cámara, se espera mejorar significativamente la eficiencia del dispositivo y ampliar su rango de aplicación.

En Colombia, a pesar de los avances recientes en electrificación, aún hay zonas rurales sin acceso a energía, lo que limita su desarrollo social y económico. El desarrollo de un prototipo de turbina hidrocínética sumergible puede abordar este problema al proporcionar una fuente de energía renovable y sostenible.

El acceso a la energía y la modernización también son puertas de entrada a la educación, atención médica, empleo y prosperidad. En un periodo corto, el acceso de los hogares colombianos a la electricidad ha mejorado significativamente. Las fuentes de energía renovable en áreas remotas han mejorado la tasa de electrificación nacional hasta en un 97% [de Minas y Energía de Colombia, 2023].

Este proyecto tiene como objetivo abordar la necesidad de diversificar las fuentes de energía renovable de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Se espera que en el futuro, mediante el desarrollo de un prototipo derivado de las investigaciones planteadas en este proyecto, se logre implementar exitosamente, lo que contribuiría al desarrollo económico de las comunidades locales al proporcionar una fuente de energía limpia y renovable. La adopción de tecnologías que aprovechan recursos renovables, como la energía hidrocínética en flujos de bajo caudal, contribuye a abordar desafíos ambientales globales, como el cambio climático y al desarrollo sostenible. Para tener claridad del problema se plantea el árbol del problema el cual se puede observar en la figura 1.2 y el árbol de objetivos en la figura 1.3

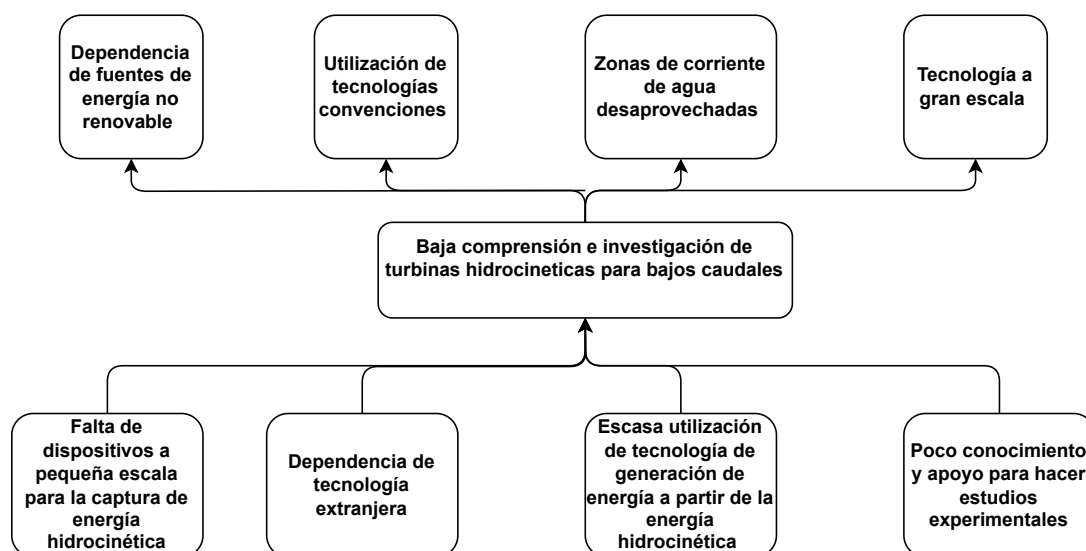


Figura 1.2: Árbol del problema

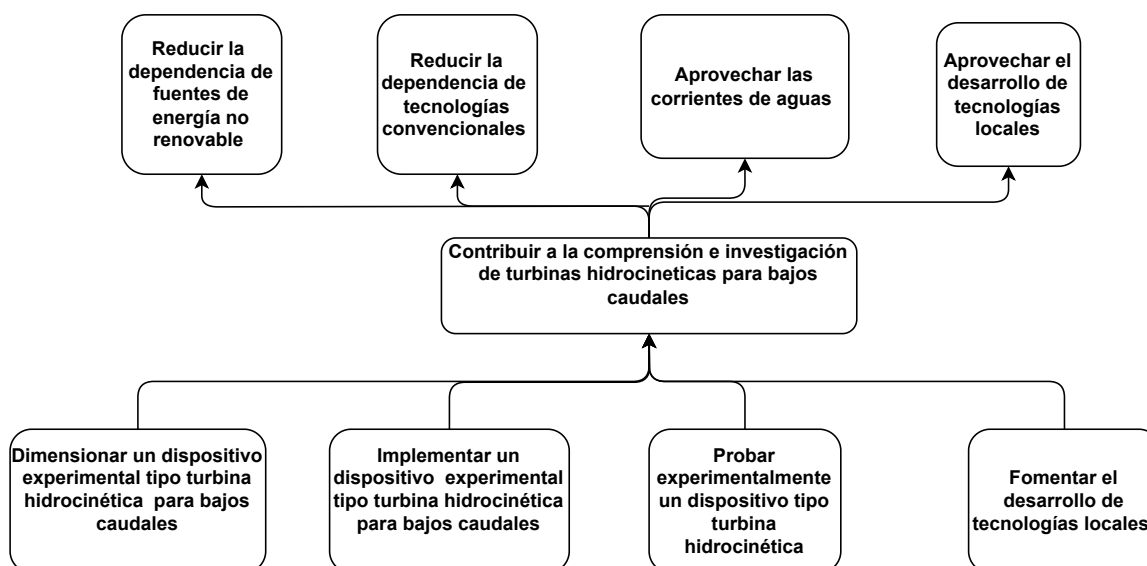


Figura 1.3: Árbol de objetivos

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos Generales

Estudiar un dispositivo experimental de una turbina hidrocinética de doble rodete vertical mediante el diseño, la construcción y pruebas de laboratorio.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar el diseño C.A.D. del dispositivo experimental teniendo en cuenta las dimensiones del canal del laboratorio.
- Construir el dispositivo.

- Verificar experimentalmente el funcionamiento del dispositivo.
- Medir torque y velocidad angular para calcular potencial.
- Realizar curvas de funcionamiento del dispositivo.

1.5. Estado del arte

Las turbinas hidrocínéticas y los sistemas de generación eléctrica por vórtices gravitacionales son tecnologías innovadoras y en desarrollo dentro del sector de las energías renovables [Khan et al., 2009]. En este apartado se ofrece una revisión actualizada sobre el estado actual de estos sistemas.

Los sistemas hidrocíneticos, que convierten la energía cinética del flujo de agua en energía eléctrica, se pueden clasificar principalmente en dos categorías basadas en su esquema de conversión de energía y principio de funcionamiento: sistemas de turbina y sistemas sin turbina [Ibrahim et al., 2021]. Como se muestra a continuación.

- **Turbinas de Eje Horizontal:** Su eje de rotación es paralelo al flujo de agua. Se inicia por cuenta propia en corrientes lentas, pero son susceptibles a obstrucciones por escombros y tienen un costo de fabricación más elevado.
- **Turbinas de Eje Vertical:** Comúnmente usadas en ríos, con el eje del rotor perpendicular a la superficie del agua, operan silenciosamente, presentan menor complejidad mecánica, prescinden de acoplamientos de engranajes y pueden reducir costos al ser instaladas sobre el agua .
- **Turbinas de Flujo Cruzado (Cross-flow):** Su eje es ortogonal al flujo y paralelo a la superficie del agua, son eficientes en espacio, siendo preferibles para parques hidrocíneticos. Operan a baja velocidad, lo que reduce la cavitación, el ruido y las hace más seguras para la fauna marina. Se clasifican por fuerza de sustentación, arrastre o una combinación.
- **Turbinas Venturi y de Vórtice Gravitatorio:**
 - **Venturi:** Aplicables en aguas de baja velocidad y poca profundidad, emplean un diseño en forma de embudo para aumentar la velocidad del agua y reducir la presión.
 - **Vórtice Gravitatorio:** Generan energía con baja carga y caudal, utilizando vórtices gravitatorios. Su diseño requiere un tanque y su respectivo desagüe.

El límite de Betz establece que una turbina sin canal de aumento solo puede extraer un máximo del 59% de la energía del flujo. Sin embargo, las turbinas con toberas pueden superar este límite al incrementar la velocidad del agua. El C_p de estas turbinas depende del gradiente de presión, el volumen de flujo, la forma y la relación de área del ducto. Se ha demostrado que los difusores pueden aumentar significativamente el C_p , con mejoras observadas de hasta el 45% en microturbinas de eje horizontal y entre el 48% y 79% en turbinas de hélice mejoradas con difusor [Ibrahim et al., 2021].

El estudio de los vórtices de superficie libre en las tomas de centrales hidroeléctricas ha sido un tema de continuo interés para ingenieros y académicos, dada su relevancia en la sostenibilidad de la generación hidroeléctrica y su impacto potencial en la operación de las plantas [Domfeh et al., 2020]. Si bien estos vórtices han sido históricamente asociados

con problemas operativos, su estudio ha evolucionado para explorar también su aprovechamiento energético. En este contexto, las turbinas de vórtice de agua gravitatorio (GWVT) representan una tecnología emergente que utiliza precisamente estos vórtices de forma controlada para la generación de energía, ofreciendo una alternativa prometedora, especialmente en micro-centrales hidroeléctricas.

Las Plantas de Energía de Vórtice de Agua Gravitatorio (GWVPP) son especialmente adecuadas para ríos y arroyos pequeños con caudales y caídas reducidas. Son llamativos por su bajo costo inicial, su diseño sencillo y su fácil mantenimiento, además de su capacidad para operar con bajas alturas de agua. Se las considera seguras para el medio ambiente y la vida acuática, y una ventaja clave es que no requieren la construcción de un embalse.

A pesar del creciente interés en las GWVPP, existe una escasez de investigación detallada sobre esta tecnología, tal como señala Faraji . Una de las áreas más exploradas ha sido la influencia del perfil (forma) del rotor en el rendimiento de estas turbinas. Tanto estudios numéricos como experimentales previos sugieren que los rotores curvados podrían ofrecer una mayor eficiencia en comparación con los planos o rectos. Las simulaciones numéricas indicaron que el perfil de álabe curvado incrementó la eficiencia general del rotor en un 3.65%, superando a las configuraciones no optimizadas. Por otro lado, el perfil plano mostró un aumento del 1.69% [Faraji et al., 2022]. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que apuntan a una mayor eficiencia en perfiles curvados.

En el diseño de GWVPP, prevalecen dos configuraciones de tanques o cámaras: la cilíndrica y la cónica. Un estudio reciente, que combinó simulaciones numéricas y experimentos, concluyó que la cámara cónica ofrece un rendimiento superior. Este mejor desempeño se atribuye a que la cámara cónica produce una mayor velocidad de vórtice (registrando 0.6 m/s en comparación con 0.525 m/s en la cilíndrica), lo que se traduce en una mayor potencia de salida y eficiencia. Adicionalmente, la cámara cónica favorece una mejor formación del vórtice con menos turbulencia y resulta más económica, especialmente en la producción a gran escala [Dhakal et al., 2015].

CAPÍTULO 2

MARCO DE REFERENCIA

2.1. Energía hidrocínética

La energía hidrocínética se deriva del movimiento del agua, ya sea en ríos, océanos o mares, y se considera una fuente de energía limpia y poderosa. Se destacan dos tipos principales de proyectos hidrocínicos. Aquellos que aprovechan el flujo horizontal del agua, como las turbinas de eje horizontal y vertical, y aquellos que aprovechan la energía de las olas y las mareas en el océano. Los proyectos de energía hidrocínética que aprovechan el flujo del agua, utilizan turbinas para convertir la energía cinética del agua en electricidad; estos proyectos pueden estar ubicados en ríos, canales de irrigación u otras vías fluviales. En cuanto a la energía marina, se distinguen entre la energía de las olas y la energía de las mareas. Los dispositivos de energía de las olas extraen energía directamente del movimiento de las olas, mientras que la energía de las mareas se obtiene de las corrientes de marea y del calor solar en el océano [de Pesca y Vida Silvestre de EE. UU., 2023].

La extracción de energía hidrocínética sigue el mismo principio que los sistemas de energía eólica e hidroeléctrica. La potencia generada por un fluido en movimiento depende del caudal másico. Este caudal másico es el factor activo del sistema y se relaciona mediante una ecuación 2.1 [Khare et al., 2019]:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AV \quad (2.1)$$

La energía potencial eléctrica podría extraerse con una eficiencia del 100%, lo cual sirve como una medida funcional para determinar la capacidad. Sin embargo, en la práctica, una turbina hidrocínética solo podrá extraer una fracción de esta energía disponible. La ecuación modificada para la potencia real que se puede extraer se expresa de la siguiente manera [Khare et al., 2019]:

$$P_{TotalSalida} = \frac{1}{2} \rho C_p A V_t^3 \quad (2.2)$$

Donde: C_p es la eficiencia hidrodinámica de la turbina. Representa la relación entre la potencia real efectiva extraída por el rotor y la energía cinética total incidente sobre el área transversal del rotor y está definido de la siguiente manera [Khare et al., 2019] :

$$C_p = \frac{P_{efe}}{\frac{1}{2} \rho A V_{rotor}^3} \quad (2.3)$$

La ley de Betz establece que solo se puede aprovechar el 59% de la energía total del viento para producir trabajo mecánico. De manera similar ocurre para el flujo de agua, cuando la velocidad del flujo que deja la turbina es un tercio de la velocidad que ingresa a la misma, se produce una situación análoga. [Pérez Martínez et al., 2021].

Además, la eficiencia de conversión de procesos hidrodinámicos, mecánicos y eléctricos reduce aún más la producción total. Por lo tanto, la mayoría de las turbinas reales tienen eficiencias inferiores al límite de Betz, típicamente en el rango de 0.4-0.5 [Khare et al., 2019].

2.2. Turbinas hidrocinéticas

La tecnología de turbina hidrocinética (THCs) han experimentado un avance significativo. Estas turbinas, que convierten la energía cinética del agua en potencia mecánica, ofrecen una alternativa renovable y sostenible a las fuentes de energía tradicionales. Las THCs se pueden clasificar según la orientación de su eje y el tipo de rotor. En términos de orientación del eje rotacional con respecto a la dirección del flujo, se distinguen las turbinas de flujo axial y las turbinas de flujo cruzado o transversal. Las turbinas de flujo axial tienen su eje de rotación paralelo a la dirección de la corriente y utilizan rodets tipo hélice. En la Figura 2.1, se muestran diversas disposiciones de este tipo de turbinas. La turbina de eje inclinado (Figura 2.1a) se emplea con mayor frecuencia en ríos pequeños, mientras que otras disposiciones (Figuras 2.1b, 2.1c y 2.1d) se implementan principalmente para la extracción de energía en océanos [Cardona-Mancilla et al., 2018].

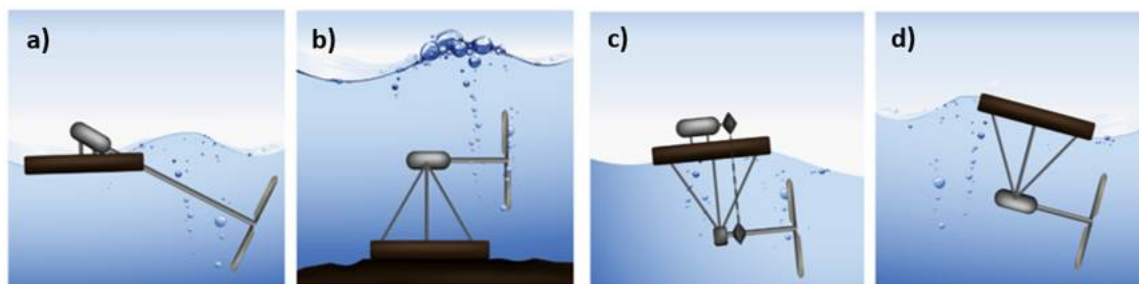


Figura 2.1: Tipos de turbinas hidrocinéticas.
Tomado de: [Cardona-Mancilla et al., 2018]

Por otra parte, las turbinas hidrocinéticas de flujo cruzado o transversal (THCFC o THCFT) tienen su eje de rotación perpendicular a la dirección del flujo de agua y pueden operar sin importar la dirección del mismo, estas se clasifican en dos tipos. El primer tipo son las turbinas de eje horizontal en disposición transversal (figura 2.2a), las cuales operan por fuerza de arrastre y presentan un rendimiento inferior a las de eje vertical. El segundo tipo, constituido por las turbinas de eje vertical (figura 2.2b, figura 2.2c, figura 2.2d, figura 2.2e y figura 2.2f), operan por fuerza de sustentación, siendo muy utilizadas en aplicaciones hidroeléctricas, gracias a las ventajas ofrecidas con respecto a las turbinas de eje horizontal en disposición transversal [Cardona-Mancilla et al., 2018].

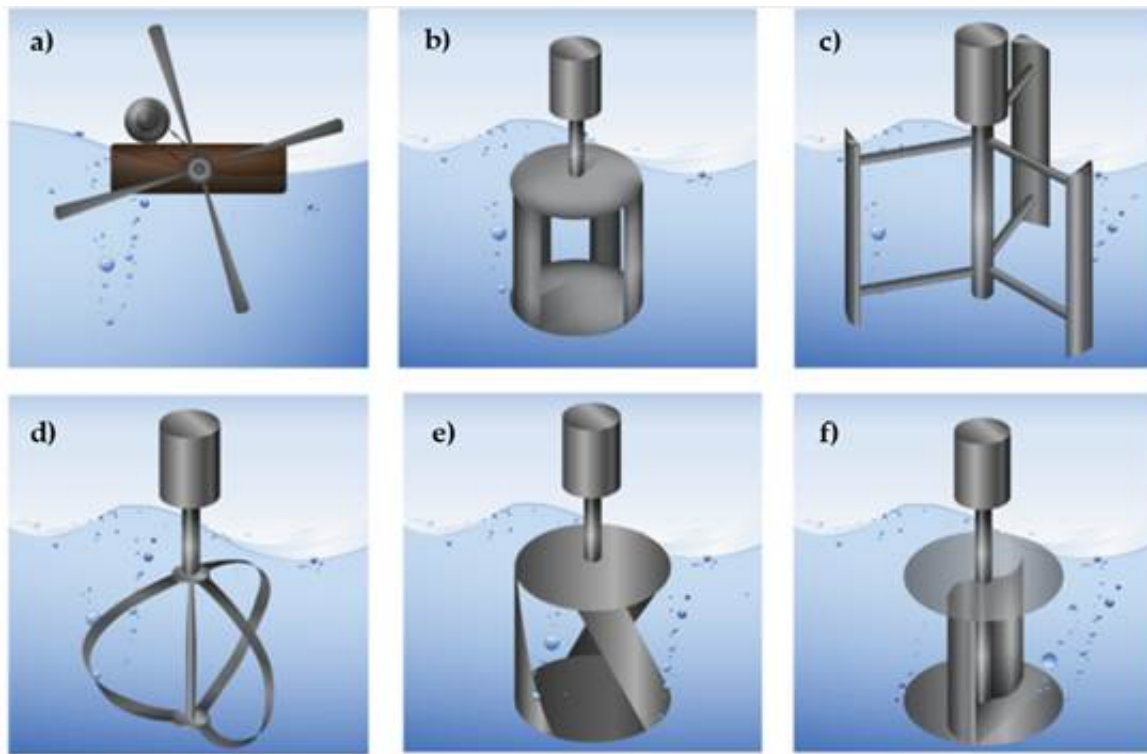


Figura 2.2: Turbinas hidrocínéticas de flujo cruzado. Tomado de: [Cardona-Mancilla et al., 2018]

En la actualidad, hay una escasez de estudios sobre THCs, ya que esta tecnología está en una etapa inicial y requiere una investigación más profunda. En la literatura se evidencia una falta de correlaciones que caractericen este tipo de turbomáquinas. Por esta razón, la mayoría de los estudios sobre THCs se han llevado a cabo de manera empírica, especialmente en la etapa de diseño. En muchos de estos proyectos, los perfiles de sustentación utilizados se adaptan de los resultados obtenidos en pruebas realizadas sobre turbinas eólicas.[Cardona-Mancilla et al., 2018].

2.3. Principales parámetros adimensionales de turbinas

En la literatura sobre las turbinas hidrocínéticas, hay varios parámetros adimensionales que se utilizan para comparar rendimiento y dimensiones. En este documento se presentan los parámetros adimensionales que se considera más relevantes para turbinas hidrocínicas de eje vertical basadas en sustentación, son tomados de [Reddy et al., 2022].

La relación de velocidades λ es el cociente entre la velocidad de rotación del rotor y la velocidad de aproximación del flujo, como se muestra en la siguiente expresión.

$$\lambda = \frac{\omega R}{u_{\infty}} \quad (2.4)$$

Donde R es el radio del rodete, ω es la velocidad angular y u_{∞} es la velocidad del flujo. Otro parámetro adimensional relevante en este proyecto es el coeficiente de potencia (C_p), es la relación entre la potencia mecánica extraída por la turbina y la potencia teórica máxima disponible en la corriente de agua. El coeficiente de potencia se define mediante la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2}\rho A u_{\infty}^3} \quad (2.5)$$

Donde P_{out} es la potencia extraída, ρ es la densidad del fluido, A es el área que viene dada por el producto de altura (H) de la cámara del dispositivo por el diámetro. Similar al C_p está el coeficiente de torque (C_T) que relaciona el torque generado (τ) por la turbina con la energía disponible en el flujo de agua. El coeficiente de torque se define mediante la siguiente expresión:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{4}\rho D^2 H u_{\infty}^2} \quad (2.6)$$

Donde D es el diámetro del rodete y H la altura del rodete.

2.4. Turbina de Gorlov

Las turbinas de eje horizontal son más adecuadas para aprovechar la energía de las corrientes oceánicas, mientras que las de eje vertical son más eficientes para capturar la energía cinética de ríos y canales. La turbina de Gorlov, inventada entre 1996-1998 por Gorlov, es una turbina hidráulica de reacción helicoidal ideal para generar electricidad a partir de corrientes oceánicas, corrientes de ríos, viento e incluso energía de las olas [Gorlov, 1998], la figura 2.3 muestra un modelo de 3D de una turbina de Gorlov.

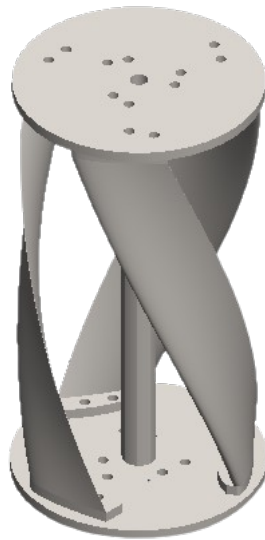


Figura 2.3: Turbina de Gorlov.

Las palas de la turbina Gorlov son diseñadas con un perfil aerodinámico y dispuestas en espiral, otorgan una ventaja significativa sobre la turbina Darrieus; un arranque mucho más rápido y eficiente. Gracias a esta configuración, la turbina de Gorlov puede operar, incluso en corrientes de agua con velocidades relativamente bajas. Estudios comparativos han demostrado que la turbina Gorlov es notablemente superior a la Darrieus, alcanzando un 33% más de eficiencia y una velocidad de rotación un 27% mayor. En condiciones de bajo caudal, estas diferencias se acentúan aún más, con la Gorlov logrando un incremento del 95% en eficiencia y un 49% en velocidad de rotación [Etemadeasl et al., 2024].

2.5. Perfil NACA

NACA son las siglas de, National Advisory Committee for Aeronautics, una agencia estadounidense que desarrolló una serie de perfiles aerodinámicos estandarizados. Estos perfiles, caracterizados por su forma y curvatura, son utilizados como base para diseñar las alas de aviones, hélices de barcos y otras superficies que interactúan con el flujo de aire. Cada perfil NACA tiene una forma específica definida por una serie de números que indican su curvatura, espesor máximo y ubicación de la curvatura máxima. Los primeros perfiles NACA, como los de 4 y 5 dígitos, se diseñaron utilizando fórmulas matemáticas que describían su forma. Estas fórmulas establecían la curvatura y el espesor del perfil. Sin embargo, los perfiles de series posteriores, como la serie 6, fueron creados mediante métodos teóricos más avanzados, lo que permitió obtener formas más complejas y eficientes [Cantwell, 2016]. A continuación se da una pequeña descripción de los diferentes tipos de perfiles NACA.

2.5.1. Serie de Cuatro Dígitos

El primer dígito especifica la curvatura máxima en porcentaje de la cuerda (longitud del perfil aerodinámico), el segundo indica la posición de la curvatura máxima en décimas de cuerda y los dos últimos números proporcionan el espesor máximo del perfil aerodinámico en porcentaje de cuerda [Cantwell, 2016].

2.5.2. Serie de Cinco Dígitos

Utiliza las mismas formas de espesor que la serie de cuatro dígitos, pero la línea de curvatura media se define de manera diferente y la convención de nomenclatura es un poco más compleja. El primer dígito, cuando se multiplica por $3/2$, produce el coeficiente de sustentación de diseño en décimas. Los dos dígitos siguientes, cuando se dividen por 2, dan la posición de la curvatura máxima en décimas de cuerda. Los dos dígitos finales indican nuevamente el espesor máximo en porcentaje de cuerda [Cantwell, 2016].

2.5.3. Serie de Cuatro y Cinco Dígitos Modificada

Las secciones de perfil aerodinámico modificadas son miembros de la serie de cuatro dígitos, pero los nombres son ligeramente diferentes ya que estas formas se han modificado. Por ejemplo, la sección raíz NACA 0003.46-64.069. La forma básica es el 0003, un perfil aerodinámico de 3 % de espesor con 0 % de curvatura. Esta forma es un perfil aerodinámico simétrico que es idéntico por encima y por debajo de la línea de curvatura media. La primera modificación es el 0003-64. El primer dígito después del guion se refiere a la redondez de la punta curvada del perfil. Un valor de 6 indica que el radio de la punta es el mismo que el del perfil aerodinámico original, mientras que un valor de 0 indica un borde de ataque afilado. El segundo dígito determina la ubicación del espesor máximo en décimas de cuerda. La ubicación predeterminada para todos los perfiles aerodinámicos de cuatro y cinco dígitos es el 30 % hacia atrás desde el borde de ataque. En este ejemplo, la ubicación del espesor máximo se ha movido hacia atrás al 40 % de la cuerda. Finalmente, el 0003.46-64.069 presenta dos conjuntos de dígitos precedidos por decimales. Estos simplemente indican ligeros ajustes al espesor máximo y la ubicación del mismo. En lugar de tener un espesor del 3 %, este perfil aerodinámico tiene un espesor del 3,46 %. En lugar de que el espesor máximo se ubique al 40 % de la cuerda, la posición en este perfil aerodinámico está al 40,69 % de la cuerda [Cantwell, 2016].

2.5.4. Serie 1 o Serie 16

La Serie 1 se desarrolló basándose en la teoría del perfil aerodinámico en lugar de las relaciones geométricas. Cuando se diseñaron estos perfiles aerodinámicos a fines de la década de 1930, se habían logrado muchos avances en los métodos de diseño inverso. El concepto básico detrás de este enfoque de diseño es especificar la distribución de presión deseada sobre el perfil aerodinámico (esta distribución dicta las características de sustentación de la forma) y luego derivar la forma geométrica que produce esta distribución de presión. Como resultado, estos perfiles aerodinámicos no se generaron utilizando un conjunto de expresiones analíticas como la serie de cuatro o cinco dígitos [Cantwell, 2016].

2.5.5. Serie 6

La Serie 6 se derivó utilizando un método teórico mejorado que, como la Serie 1, se basó en especificar la distribución de presión deseada y empleó matemáticas avanzadas para derivar la forma geométrica requerida. El objetivo de este enfoque era diseñar perfiles aerodinámicos que maximizaran la región sobre la cual el flujo de aire permanece laminar. Al hacerlo, la resistencia sobre un pequeño rango de coeficientes de sustentación se puede reducir sustancialmente [Cantwell, 2016].

2.5.6. Serie 7

La Serie 7 fue un intento más por maximizar las regiones de flujo laminar sobre un perfil aerodinámico diferenciando las ubicaciones de la presión mínima en las superficies superior e inferior [Cantwell, 2016].

2.5.7. Serie 8

Una variación final de la metodología de la Serie 6 y la Serie 7 fue la Serie NACA 8, diseñada para vuelos a velocidades supercríticas. Al igual que los perfiles aerodinámicos anteriores, el objetivo era maximizar la extensión del flujo laminar en las superficies superior e inferior de forma independiente [Cantwell, 2016].

2.6. Flujo Giratorio

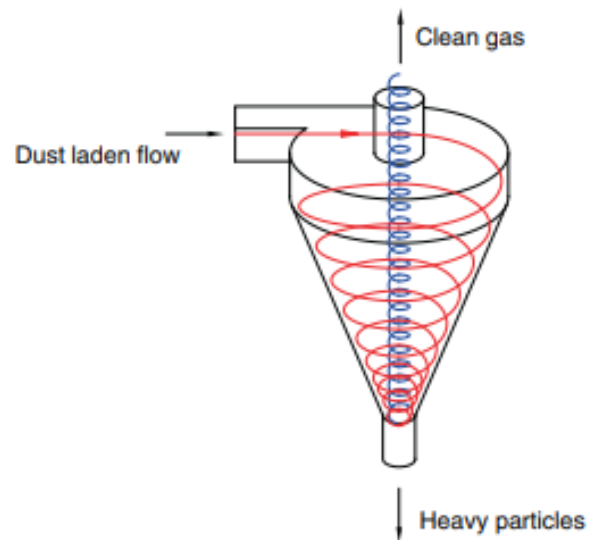
El flujo giratorio, ya sea en forma de vórtices, remolinos o espirales, ha sido fascinante a lo largo de la historia. Este tiene relevancia tanto en investigaciones como en aplicaciones de ingeniería. El flujo giratorio es un fenómeno caracterizado por el movimiento circular o helicoidal de las partículas de un fluido alrededor de un eje central. Esta rotación local, conocida como vorticidad, induce la formación de estructuras como vórtices y remolinos. La intensidad y distribución de la vorticidad determinan las características del flujo.

El flujo giratorio es generado por fenómenos naturales pero también se puede generar con geometrías específicas. Existen muchas interacciones sutiles entre los fluidos, las estructuras y límites asociados que producen vorticidad y corrientes secundarias. La vorticidad implica la rotación de un elemento de flujo, que representa un grupo de partículas de fluido, a medida que se mueve a través de un campo de flujo y puede visualizarse mediante un corcho físico o virtual en el mismo. Si el corcho gira, entonces el flujo tiene vorticidad, mientras que si el corcho simplemente se desplaza a través del campo, entonces el flujo

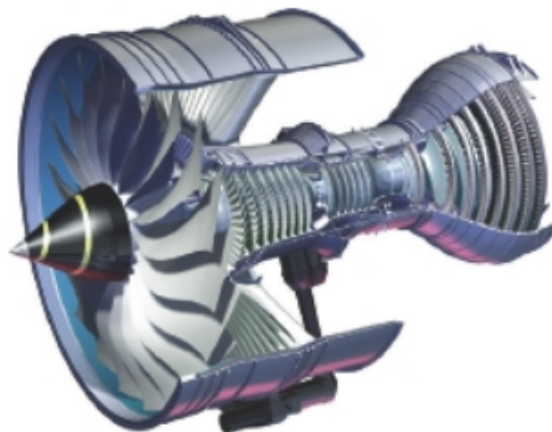
no tiene vorticidad. Una Corriente secundario es un patrón de flujo superpuesto en la trayectoria de flujo primario, en la figura 2.4 se evidencia algunos ejemplos de geometrías que genera flujo giratorio [Childs, 2010].



(a) Rotor de un compresor centrífugo de un motor de una turbo hélice



(b) Separador ciclónico



(c) Esquema del motor Rolls-Royce Trent 1000 para el Boeing 787 Dreamliner, que ilustra los discos de palas del compresor y la turbina.

Figura 2.4: Ejemplo de geometrías generadoras de flujo giratorio
Tomado de: [Childs, 2010]

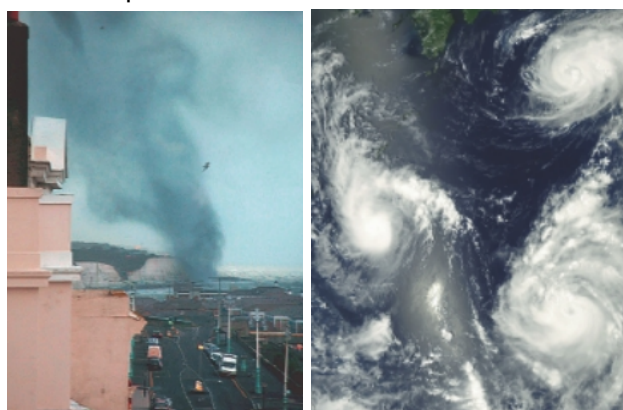
Las teorías para modelar el flujo giratorio se desarrollaron a partir de los intentos de comprender los fenómenos de flujo en la superficie de la Tierra y sus océanos. Los movimientos de los fluidos en la atmósfera terrestre están impulsados por una combinación de convección térmica, fuerzas de Coriolis y vorticidad producida en regiones de fuertes vientos. La fuente de energía para este movimiento es la radiación térmica del Sol, que es absorbida por la Tierra y emitida al espacio. Las enormes cantidades de energía involucradas, combinadas con los diferenciales de energía entre los polos y el ecuador, la influencia de la rotación de la Tierra y la inestabilidad del flujo, dan como resultado circulaciones atmosféricas importantes y, en ciertas condiciones, vórtices atmosféricos intensos [Childs, 2010].

Las vistas de la Tierra desde el espacio sobre los océanos, las tensiones de cizallamiento causadas por los vientos que soplan sobre la superficie del océano pueden provocar corrientes de agua de hasta 100 m de profundidad o más. Estas corrientes pueden tener

miles de kilómetros de ancho y moverse a velocidades de varios kilómetros por día. Los patrones giratorios conocidos como giros son causados por la combinación de tensiones de cizallamiento inducidas por el viento y las fuerzas de Coriolis debido a la rotación de la Tierra en cada uno de los cinco océanos principales. El efecto neto es que en el hemisferio norte la dirección general de rotación de los giros es en el sentido contrario a las agujas del reloj, y en el hemisferio sur es en el sentido de las agujas del reloj. Ejemplos de vórtices atmosféricos intensos incluyen ciclones tropicales y tornados. Los ciclones tropicales se llaman huracanes sobre el Océano Atlántico y tifones sobre el Océano Pacífico. Pueden tener varios cientos de kilómetros de diámetro. Los ciclones tropicales son causados por la convección a gran escala sobre una región de agua cálida. La convección se ve aumentada por la liberación de calor latente durante la condensación de la lluvia. El momento angular del ciclón se deriva de la rotación de la Tierra durante la convergencia del aire hacia el centro de baja presión del ciclón. Debido a que el momento angular se deriva de la rotación de la Tierra, la dirección de rotación de un ciclón tropical es la misma que la de la Tierra, que es en sentido contrario a las agujas del reloj cuando se observa desde un observador sobre el hemisferio norte y en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio sur, en la figura 2.5 se muestran algunos ejemplos [Childs, 2010].



(a) Huracán Gordon tomado a las 18:15:36, hora media de Greenwich, el 17 de Septiembre de 2006 por uno de los miembros de la tripulación a bordo del transbordador espacial Atlantis



(b) Tornado frente a la costa de Brighton, Inglaterra, 2 de octubre de 2006. (c) Tres tifones sobre el Océano Pacífico occidental el 7 de agosto de 2006.

Figura 2.5: Ejemplo de fenómenos natural de flujo giratorio
Tomado de: [Childs, 2010]

2.6.1. Vórtice

El término vórtice se emplea para describir una región de flujo con rotación concentrada, como la que se observa en remolinos y torbellinos. Estos pueden formarse de manera natural o artificial. Ejemplos de vórtices naturales incluyen huracanes, tornados, trombas marinas y remolinos de polvo. Los vórtices también se generan en la estela de objetos en movimiento, como al arrastrar un remo en el agua o al mezclar la azúcar una taza de café. La vorticidad y la rotación están casi siempre presentes en un fluido en movimiento, aunque un vórtice no sea evidente. Uno de los mecanismos más importantes en la generación de vorticidad es la condición de no deslizamiento [Childs, 2010].

Un vórtice es una región dentro de un fluido en la que el flujo gira alrededor de un eje, ya sea recto o curvo. Matemáticamente, se describe mediante el campo de vorticidad, que es el rotacional ($\omega = \nabla \times v$) del campo de velocidad del fluido, los vórtices pueden ser generados por diferencias de presión, fuerzas de Coriolis, o gradientes de velocidad en el fluido [Kundu et al., 2016].

Los vórtices se clasifican según su estructura y origen. Algunos de los tipos más comunes son.

- **Vórtices libres:** Estos vórtices no tienen una fuente externa de energía que los mantenga y su intensidad disminuye con la distancia desde el centro. Un ejemplo clásico es el vórtice potencial, donde la velocidad tangencial es inversamente proporcional al radio [Batchelor, 2000].
- **Vórtices Forzados:** En estos vórtices, la velocidad tangencial aumenta con el radio, y el fluido gira como un cuerpo sólido. Son mantenidos por una fuente externa de energía, como en el caso de un cilindro giratorio [Saffman, 1992].
- **Vórtices Anulares:** Estos vórtices, también conocidos como anillos de vórtice, tienen una estructura toroidal y son comunes en fenómenos naturales como los anillos de humo o en aplicaciones de ingeniería como la propulsión a chorro [Lugt, 1996].
- **Vórtices Coherentes:** Son estructuras vorticiales que mantienen su identidad durante un tiempo significativo en un flujo turbulento. Estos vórtices son importantes en la comprensión de la turbulencia y la mezcla en fluidos [Hussain, 1986].

2.6.2. Aplicaciones

Los vórtices tienen aplicaciones en una amplia gama de campos, desde la ingeniería, meteorología y la biología. Algunas aplicaciones recientes incluyen.

- **Energía Eólica:** Los vórtices juegan un papel crucial en la aerodinámica de las turbinas eólicas. Estudios recientes han explorado la interacción de los vórtices con las palas de las turbinas para optimizar su diseño y mejorar la eficiencia energética [Porté-Agel et al., 2020].
- **Ingeniería Aeroespacial:** En el diseño de aeronaves, los vórtices generados en las puntas de las alas (vórtices de estela) son un área de investigación activa. Estos vórtices pueden afectar la estabilidad y el control de las aeronaves, y se están desarrollando técnicas para mitigar sus efectos [Spalart, 2021].
- **Medicina:** En el campo de la hemodinámica, los vórtices en el flujo sanguíneo son estudiados para comprender mejor las enfermedades cardiovasculares. Por ejemplo, la formación de vórtices en las arterias puede estar relacionada con la aterosclerosis [Gharib et al., 2019].

- **Oceanografía:** Los vórtices oceánicos, también conocidos como remolinos, son importantes en la dinámica de los océanos. Estos vórtices pueden transportar calor, sal y nutrientes, influyendo en el clima y los ecosistemas marinos [[Chelton et al., 2021](#)].
- **Robótica Submarina:** Los vórtices son utilizados en el diseño de robots submarinos para mejorar su maniobrabilidad y eficiencia. Investigaciones recientes han explorado el uso de vórtices controlados para la propulsión y navegación de estos dispositivos [[Triantafyllou et al., 2020](#)].

2.7. Hidrogenerador de vórtice vertical

Los hidrogeneradores de vórtice vertical (GWVG) son pequeñas centrales hidroeléctricas que generan electricidad aprovechando la energía rotacional de un vórtice de agua para impulsar una turbina. Un vórtice de agua es como un remolino, similar a los que se forman en el mar o al desagüe del lavaplatos. Un GWVG típico incluye seis componentes clave: un canal de entrada, una base o cámara, rotor o rodete, tanque del rotor o rodete y un canal de salida. El canal de entrada regula y dirige el agua hacia la cámara, guiándola tangencialmente hacia el borde para crear el vórtice. La cámara, generalmente circular con un tanque cilíndrico o cónico, tiene un desagüe. El rodete, ubicado en el centro de la cámara y el tanque, está conectada a un generador eléctrico. El agua, tras pasar por el sistema, sale del tanque y continúa su curso por el canal de salida. Debido a su tamaño reducido, los GWVG pueden instalarse junto a los ríos, lo que reduce el impacto ambiental negativo que ocasionan las grandes represas de las centrales hidroeléctricas convencionales. Además, representan una alternativa de energía limpia y renovable frente a la generación de electricidad con combustibles fósiles. No obstante, una limitación de los GWVG es su menor eficiencia en comparación con otras tecnologías de producción de energía, alcanzando un promedio del 53%. [[Roadifer and Running, 2024](#)].

El sistema aprovecha el flujo natural de los ríos, arroyos o montañas para generar un vórtice superficial libre, producto de la fuerza de Coriolis. La vorticidad se intensifica a medida que el agua se acerca al orificio de salida en el fondo de la cámara, lo que a su vez incrementa la circulación del agua y provoca una disminución de la presión por debajo de la atmosférica, creando así un núcleo de aire cuyo radio se reduce a medida que se acerca al orificio. La energía del vórtice se transforma en energía mecánica por el rodete, y posteriormente en energía eléctrica por el generador [[Maika et al., 2023](#)], la figura 2.6 es una GWVG típico de cámara cilíndrica donde se visualiza los componente representativos mencionados anteriormente.

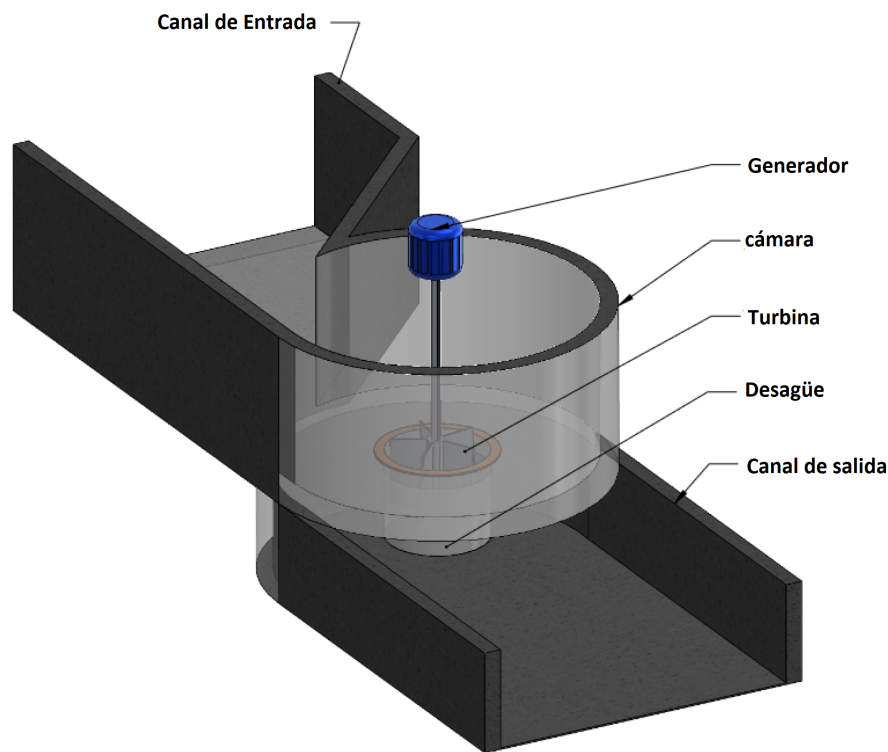


Figura 2.6: Esquema típico de un sistema GWVG con cámara cilíndrica.
Tomado y adaptado de: [Maika et al., 2023]

2.7.1. Componentes de un hidrogenerador de vórtices vertical

De acuerdo con la literatura consultada, los hidrogeneradores de vórtices se caracterizan principalmente por sus cámaras y tanques, los cuales albergan un rodete o rotor y una zona de descarga. Las cámaras adoptan comúnmente geometrías cilíndricas o espirales, como se ilustra en la figura.2.7.

Un estudio comparativo, basado en simulaciones, analizó la formación de vórtices en GWVG con diseños de cámaras cilíndricos y espirales. Los resultados indican que, para sistemas de generación de gran escala, los tanques espirales superan a los cilíndricos. La razón principal es que los tanques espirales logran aprovechar de manera más eficiente la energía potencial y cinética del agua durante el proceso de direccionamiento o generación del vórtice [Huwaie et al., 2020].

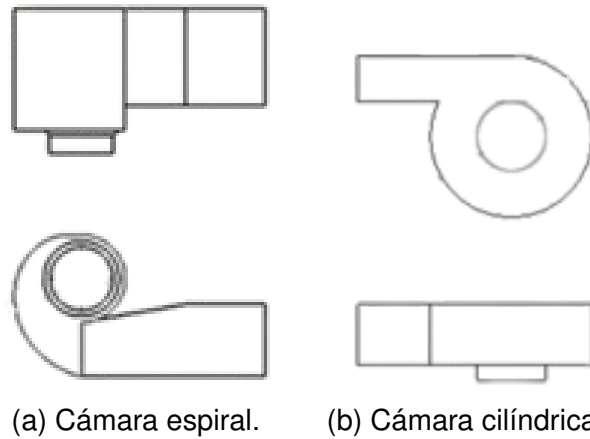


Figura 2.7: Cámaras de hidrogenadores comunes.
Tomado de: [Huwae et al., 2020]

Es común encontrar tanques cilíndricos y cónicos en los sistemas GWVG. No obstante, investigaciones recientes, como la presentada en [Roadifer and Running, 2024], exploran geometrías alternativas, incluyendo configuraciones como la convexa y cóncava (ver figura 2.8).

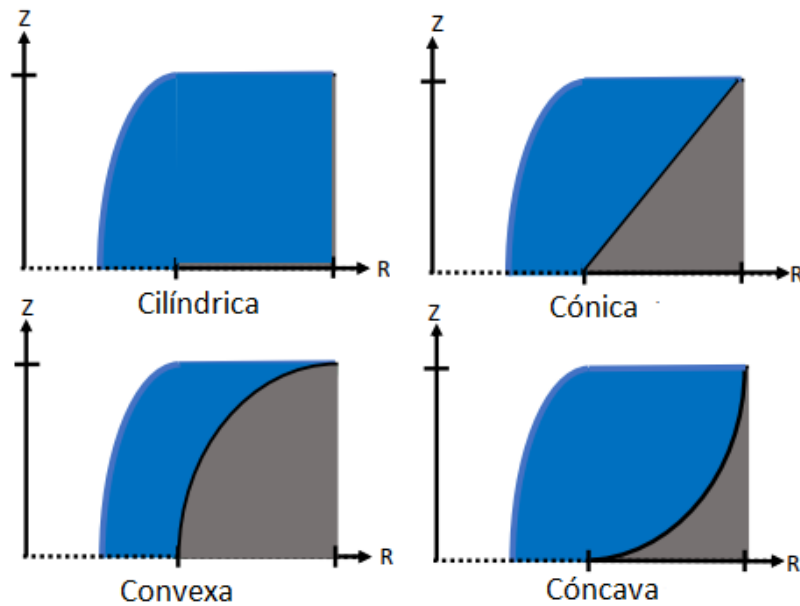


Figura 2.8: Geometrías de tanques de una GWVG.
Tomada y adaptada de: [Roadifer and Running, 2024]

La 2.8 representa una vista lateral en dos dimensiones de las cuatro configuraciones de tanques propuestas por [Roadifer and Running, 2024]. En ella, el eje z es el eje de rotación central alrededor del cual se desplaza el agua, mientras que el eje r indica la base del tanque. El agua se visualiza por medio del área sombreada en azul, las paredes del tanque se representan con un área sombreada en gris, y el núcleo de aire, producto del vórtice generado por el movimiento rotacional del agua al salir por el orificio de descarga, se muestra como un área blanca entre el eje z y el agua.

Un estudio realizado por [Huwae et al., 2020], basado en dinámica fluidos computacional (CFD), comparo el desempeño de hidrogenadores de vórtices con tanques de geometría cilíndrica y cónica. El análisis se centró en la velocidad tangencial promedio como factor

comparativo. Los datos arrojaron que el tanque de geometría cónica demostró ser superior, al registrar una velocidad tangencial media más alta en comparación con la cilíndrica.

2.8. Análisis dimensional

El análisis dimensional es una herramienta muy utilizada para estudiar y describir fenómenos físicos y científicos. En el análisis dimensional, las variables físicas relevantes se expresan en términos de unidades básicas, como la longitud, masa, tiempo y temperatura. A partir de estas unidades básicas, se pueden construir diferentes combinaciones de variables que son dimensionales. Estas combinaciones dimensionales se conocen como números a dimensionales o parámetros a dimensionales. Estos números se pueden utilizar para establecer similitudes entre diferentes sistemas físicos, para predecir la relación entre variables y para diseñar experimentos y pruebas. La obtención de los números o parámetros adimensional puede obtenerse realizando un análisis dimensional de las ecuaciones de gobierno y constitutivas que representan el fenómeno físico ó también se pueden obtener por medio del teorema de Pi de Buckingham [Fox et al., 1995]. A continuación se enumeran los pasos a realizar para encontrar estos números.

1. Identificar las variables relevantes:

- Enumerar todas las variables físicas que influyen en el fenómeno estudiado.

2. Determinar las dimensiones de las variables:

- Expresar cada variable en términos de las dimensiones fundamentales: masa (M), longitud (L) y tiempo (T).

3. Calcular el número de números a dimensionales (Pi):

- Usar la fórmula: $k = n - m$, donde n es el número de variables y m es el número de dimensiones fundamentales.

4. Elegir variables repetitivas:

- Seleccionar m variables repetitivas que incluyan todas las dimensiones fundamentales.

5. Formar los números a dimensionales (Pi):

- Combinar las variables repetitivas con cada variable restante para crear números a dimensionales.
- Verificar si los números Pi son a dimensionales

CAPÍTULO 3

MARCO METODOLÓGICO

Para alcanzar los objetivos establecidos para el desarrollo del dispositivo tipo turbina hidrocínética de eje vertical con cámaras generadoras de vórtice, se siguió un proceso de desarrollo sistemático. Inicialmente, se llevó a cabo una conceptualización preliminar para determinar las dimensiones primarias y esenciales del dispositivo. Estas dimensiones se seleccionaron de acuerdo a la investigación bibliográfica realizada, los recursos disponibles y el cronograma del proyecto. El desarrollo de este dispositivo experimental, se abordó integrando principios físicos característicos de las turbinas hidrocínéticas y los generadores de vórtices, el análisis dimensional y la validación experimental. La metodología se organizó en etapas secuenciales, tal como se presenta en la figura 3.1.



Figura 3.1: Metodología propuesta

3.1. Desarrollo del dispositivo

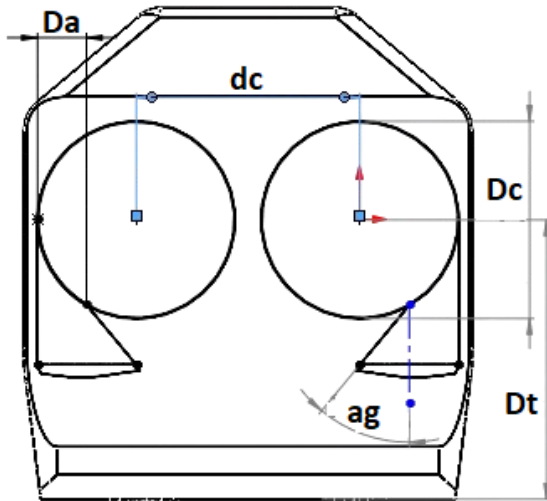
3.1.1. Diseño Conceptual y detallado

En esta etapa, el objetivo es desarrollar un diseño preliminar del dispositivo utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD). Este diseño se adaptó a las limitaciones de espacio presentes en el canal de prueba. Para desarrollar el diseño conceptual se dividió en dos etapas, la primera etapa es la elección del tipo de rodete a utilizar y la otra etapa es dimensionar la geometría de la carcasa, en este proyecto el termino carcasa abarca tanto la parte externa como la parte interna. La parte interna consta de dos hidrogenadores de vórtice vertical con sus respectiva entrada y salida del flujo.

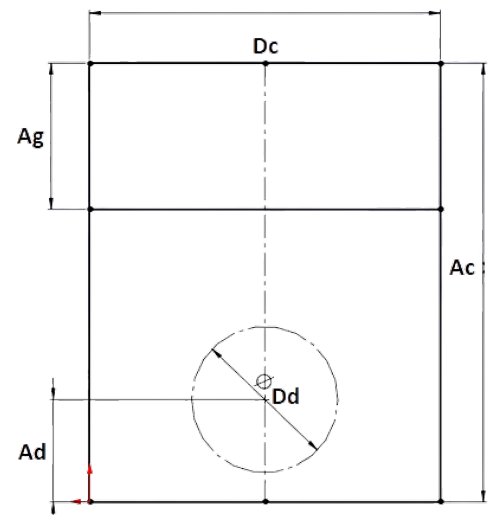
3.1.2. Diseño de la carcasa

Parte interna de la carcasa

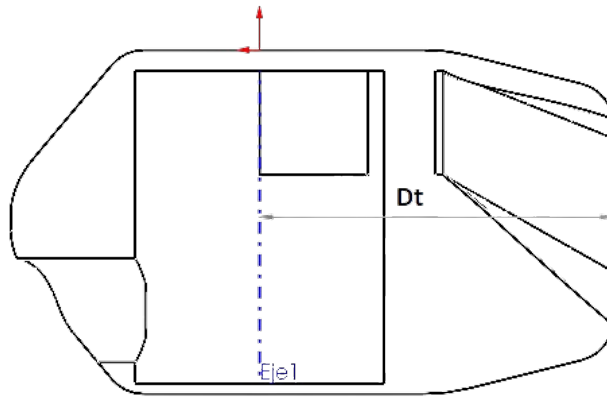
Se escogió un doble generador de vórtice vertical, siguiendo la idea de [Vargas, 2019]. El sistema propuesto de la parte interna, el hidrogenador se compone fundamentalmente de dos elementos cilíndricos interconectados; estos elementos cilíndricos son una cámara de generación de vórtices y un tanque cilíndrico donde está el rotor. La elección de una configuración cilíndrica para ambos componentes responde a consideraciones específicas relacionadas con las características del flujo (bajo caudal), espacio y la viabilidad de la fabricación aditiva (impresión 3D). La figura 3.2a presenta una vista en sección superior del dispositivo, resaltando las principales características de la cámara generadora de vórtice. Por otro lado, la figura 3.2b ofrece un esquema en el cual se ilustra la longitud y la ubicación del desagüe de la cámara, el cual se dispone tangencialmente al tanque, para ilustrar totalmente las dimensiones geométricas de la parte interna del dispositivo se presenta una vista en sección lateral (3.2c).



(a) Vista en sección del dispositivo, corte superior.



(b) Esquema de la cámara generadora y tanque.



(c) Vista en sección del dispositivo, corte lateral.

Figura 3.2: Geometría del dispositivo.

El sistema de alimentación de agua del dispositivo consiste en una tobera con una entrada de perfil elíptico que converge hacia una sección rectangular denominada garganta. La configuración de la entrada de agua del dispositivo se fundamentó en las investigaciones de [Narváez, 2016] y [Vargas, 2019], las cuales concluyeron que una entrada de perfil elíptico reduce la resistencia al flujo interno en un 69.8% en comparación con una de sección rectangular, bajo la consideración de un dispositivo macizo. El cuadro 3.1 muestra las dimensiones características de la parte interna de la carcasa.

Cuadro 3.1: Parámetros característicos de la parte interna del dispositivo.

	Longitud
Distancia centros de cámara (dc) [cm]	13,6
Diámetro de la cámara (Dc) [cm]	12
Distancia horizontal de apertura entrada agua a la cámara de vórtices (Da) [cm]	3
Angulo de conexión entre la tobera y la entrada de la cámara (ag)	40°
Altura del tanque (at) [cm]	10
Altura total (Ac) [cm]	15
Diámetro de descarga (Dd) [cm]	5
Distancia del diámetro de descarga con respecto el borde inferior del tanque (Ad) [cm]	3,5
Eje menor de la tobera (b) [cm]	5
Eje mayor de la tobera (a) [cm]	6,1
Distancia centro de la cámara hasta la entrada de agua (Dt) [cm]	17
Altura de la garganta (Ag) [cm]	5
Ancho de la garganta (At) [cm]	6

Parte externa de la carcasa

La adopción de principios de la biomimética, el estudio de las soluciones de diseño basados en la naturaleza [Vincent, 2001], es una alternativa ingeniosa para el desarrollo del dispositivo. El pez caja amarillo (*Ostracion cubicus*) se presenta como un modelo biológico interesante debido a su sorprendente eficiencia hidrodinámica, a pesar de su forma poco convencional en peces.

La morfología del pez caja amarillo, con su cuerpo robusto y sección transversal relativamente corta, minimiza la resistencia al flujo de agua, lo que le permite moverse fluidamente a velocidades bajas y moderadas [Fish and Lauder, 2006, Lauder, 2011]. La forma exterior de la carcasa del dispositivo propuesto se inspiró en la morfología del este pez con el objetivo de minimizar la resistencia hidrodinámica. Una menor resistencia se traduce en una mayor eficiencia en la conversión de la energía cinética del agua en energía mecánica [Aranake et al., 2014].



Figura 3.3: Pez caja. Tomado de : [Giaino,]

La estabilidad del flujo juega un papel importante en el rendimiento y la durabilidad de las turbinas hidrocínicas. Aunque su forma cúbica podría sugerir inestabilidad, el pez caja amarillo genera vórtices controlados en su parte posterior que contribuyen a su estabilidad [Lauder, 2011].

Las revisiones sobre diseños biomiméticos en turbinas hidrocínicas resaltan cómo la adaptación de formas y mecanismos biológicos puede conducir a mejoras significativas en

el rendimiento. Al inspirarse en la sección transversal del cuerpo del pez caja amarillo para el dispositivo, se espera que el dispositivo sea capaz de operar eficientemente en un rango más amplio de velocidades de flujo, incluyendo corrientes más lentas.

La figura 3.4 es una vista isométrica del dispositivo propuesto. Los parámetros más destacados del dispositivo son, la longitud total del dispositivo en x, y & z (coordenadas longitudinales), el área de la garganta (A_{ag}), el área de salida (A_s) y el área de entrada (A_e).

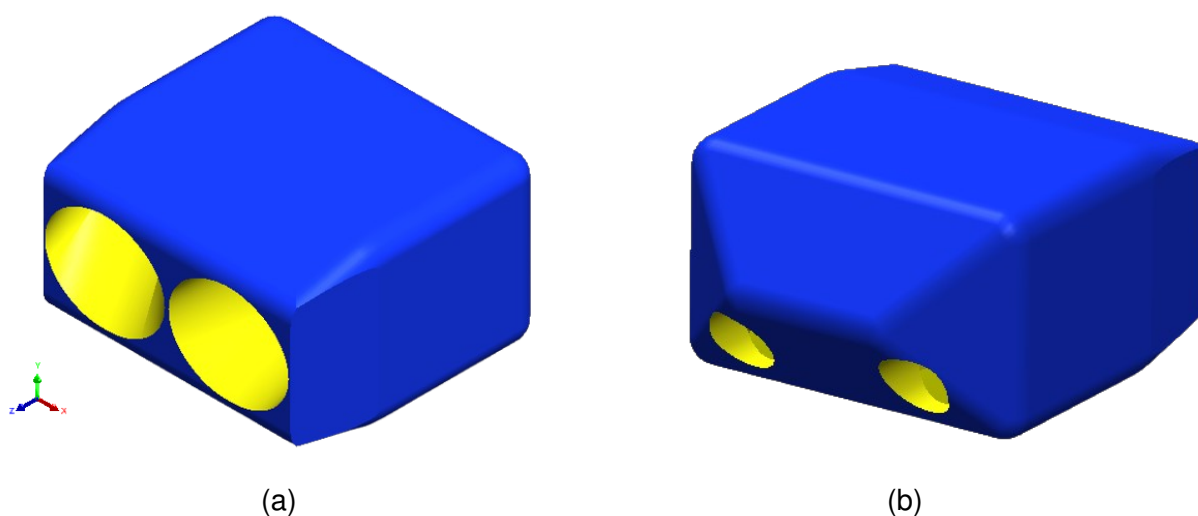


Figura 3.4: Vista isométrica del dispositivo

La Figura 3.5 ilustra el esquema general del dispositivo, destacando sus áreas funcionales más relevantes. En este esquema, el área de entrada, designada como A_e , representa la sección transversal a través de la cual el flujo de agua es ingresado al sistema. Seguidamente, se identifica el área de la garganta, A_{ag} , una sección de importancia crucial dentro de la tobera, inmediatamente anterior a las cámaras de vórtice. Finalmente, el área de descarga A_s , corresponde a la sección por la cual el flujo, ya procesado por el sistema, es expulsado al entorno circundante. Es importante señalar que el modelo incorpora una simetría espejo. Esta característica implica que las áreas correspondientes a la izquierda y a la derecha del dispositivo son geoméricamente idénticas; así, el área de entrada izquierda es igual al área de entrada derecha, igual que las demás áreas funcionales del mismo. Las dimensiones de estas áreas, así como otras medidas distintivas del dispositivo, se detallan en el Cuadro 3.2.

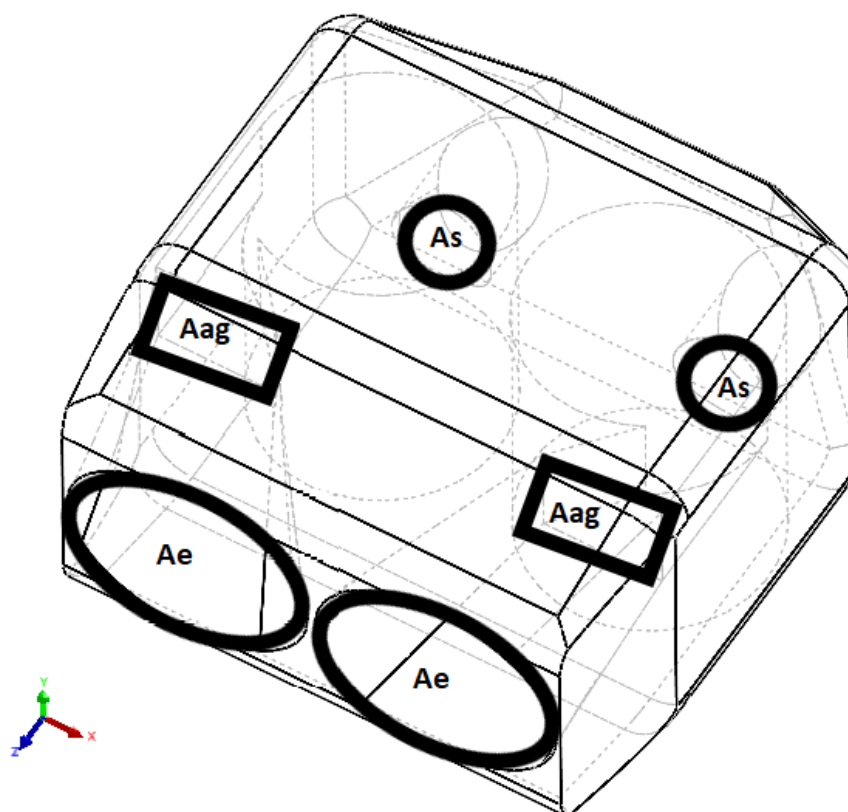


Figura 3.5: Esquema de la geometría de la carcasa

Cuadro 3.2: Dimensiones característicos del dispositivo

	Longitud
Longitud x max [cm]	27,2
Longitud y max [cm]	16,5
Longitud z max [cm]	29,81
$Ae [cm^2]$	95,82
$Aag[cm^2]$	30
$As [cm^2]$	19,63

3.1.3. Diseño del Rodete

La elección de una turbina Gorlov de tres hélices como inspiración del rodete para esta tesis se basa en la investigación y las pruebas descritas en las fuentes. Los resultados muestran que las turbinas Gorlov son muy eficientes para convertir la energía cinética de las corrientes de agua de baja velocidad en energía utilizable.

Las pruebas en el Canal de Cape Cod en la Universidad de Michigan demostraron que la turbina Gorlov puede lograr una eficiencia del 35% en condiciones de flujo libre, lo cual es significativo considerando las bajas velocidades del agua. Esta eficiencia se puede atribuir al diseño helicoidal de la turbina, que permite una interacción fluida con el agua. Además, la turbina Gorlov de tres hélices demostró ser más eficiente y estable que la turbina Darrieus. La turbina Gorlov experimentó menos resistencia al flujo de agua y no presentó vibraciones notables. Los resultados demuestran que este diseño es efectivo para aprovechar la energía de las corrientes de agua de baja velocidad [Gorlov, 1998].

La selección del perfil alar NACA 0018 para el rodete tipo Gorlov, se basa en los resultados obtenidos en el estudio de [Moghimi and Motawej, 2020]. Donde se estudió, mediante

la utilización de un modelo de doble tubo de corriente múltiple (DMST) y simulaciones numéricas. Se evaluó el desempeño de diversas configuraciones de perfiles alares en turbinas Gorlov. Los resultados indicaron que el perfil NACA 0018 presentó un coeficiente de potencia máximo de 0.479 para una relación de velocidad de punta de 3.5, superando a otros perfiles evaluados. Además, el estudio demostró que este perfil optimiza la relación entre la sustentación y la resistencia, lo que se traduce en una mayor eficiencia energética y menores pérdidas por fricción.

Para el desarrollo del rodete, pensado para operar en condiciones de bajos caudales y velocidades, se optó por incorporar un diseño de rodete tipo Gorlov. Sin embargo, este diseño estándar fue objeto de una modificación para aprovechar a cabalidad el concepto de la cámara generadora de vórtices. Tradicionalmente, un rodete Gorlov mantiene el mismo radio desde su inicio hasta su final. La modificación que se implementó, consiste en que el rodete culmina en un radio menor, lo que se logra mediante la aplicación de un ángulo de conicidad de 15° . Esta decisión se fundamenta en la literatura existente para hidrogenadores de vórtices verticales con tanque cónico, donde se ha explorado el impacto de ángulos de conicidad en cámaras de vórtices. Por ejemplo, en el trabajo de [Betancour et al., 2023], se menciona el uso de cámaras de vórtices cónicas con un ángulo de conicidad de 20° de tanque, dado que es el valor mas eficiente. Inicialmente, se consideró replicar este ángulo de 20° en el dispositivo; no obstante, esta medida resultaba en un tamaño de rodete considerablemente reducido, lo que, según el análisis del proceso de fabricación, complicaría la impresión del componente. Los 15° elegidos representaron un equilibrio entre las consideraciones teóricas y la viabilidad práctica de la manufactura.

De acuerdo al estudio realizado por [Li et al., 2017b], la relación cuerda/radio (c/R) es un parámetro importante para el diseño de turbinas de eje vertical. Los autores recomiendan una relación c/R en el rango de 0,1 a 0,16 para maximizar la eficiencia aerodinámica y la estabilidad estructural. Con respecto a esto el tamaño de la cuerda debe estar en los valores mostrados en el cuadro 3.3 pero por cuestiones de dimensionamiento y limitación de equipos, en este caso la impresora, para obtener una relación entre calidad superficial y factibilidad de realizar la impresión con éxito se escogió un valor semilla cuerda de 12 mm; se realizó la impresión para este tamaño de cuerda pero no se pudo realizar satisfactoriamente, luego de varias impresiones fallidas se llegó a la conclusión de que una cuerda de 25 mm era valor mínimo con el que se obtenía una buena impresión.

Cuadro 3.3: Valores mínimo y máximo de la muerda del rodete

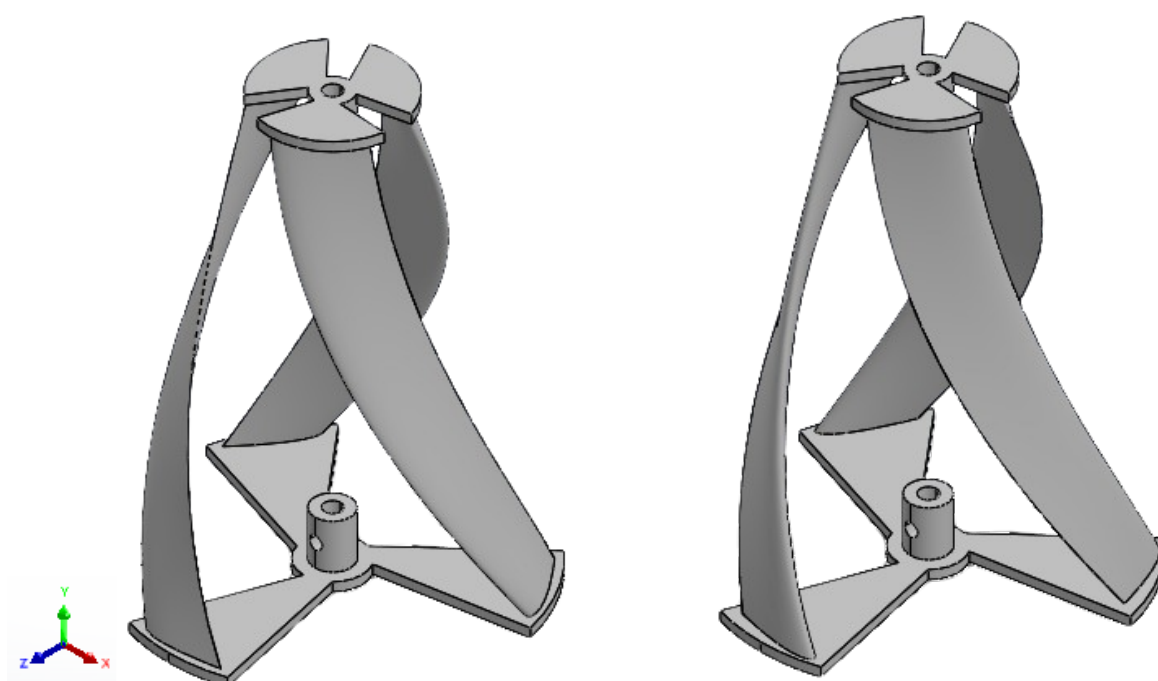
Parámetro	Valor [mm]
Cuerda mínima	11.2
Cuerda máxima	17.92

Para la configuración geométrica de la hélice, elemento central y distintivo del rodete tipo Gorlov, se priorizó la definición mediante la altura, número de revoluciones y anguló de conicidad. Estos parámetros fueron registrados en el software CAD. La altura de la hélice se estableció de acuerdo a las dimensiones internas del dispositivo (cámara y tanque), garantizando un ajuste adecuado y la compatibilidad con el espacio.

Par el número de revoluciones, su selección se basó en el paradigma de diseños para las turbinas Gorlov. Se tomó en consideración lo informado por [Jayaram and Bavanish, 2022], donde se destacan la influencia de este parámetro en el rendimiento de turbinas similares. Esta investigación sugirió que el valor de 0,25 para el número de revoluciones ofrece los resultados más favorables en términos de eficiencia.

Cuadro 3.4: Parámetros detallados de la hélice/espiral del rodete

Parámetro	Valor/Configuración
Configuración General de la Hélice:	
Definido por:	Altura y N° de revoluciones
Paso constante	Seleccionado
Alto Total	135.00 mm
Revoluciones Totales	0.25
Ángulo inicial	0.00°
Sentido de las agujas del reloj	Seleccionado
Hélice en ángulo (Cónico)	
Ángulo de conicidad	15.00°
Punto Inicial de la Hélice:	
Altura (A:)	0.00 mm
Revoluciones (Rev:)	0
Paso (P:)	540.00 mm
Diámetro (Máx)	112.00 mm
Punto Final de la Hélice:	
Altura (A:)	135.00 mm
Revoluciones (Rev:)	0.25
Paso (P:)	540.00 mm
Diámetro (Mín)	39.65 mm



(a) Rodete propuesto con dirección de giro antihoraria (b) Rodete propuesto dirección de giro horaria

Figura 3.6: Rodete propuesto

Cuadro 3.5: Dimensiones características del rodete

	Longitud [cm]
Altura del rodete	14,1
Diámetro máx	11,20
Diámetro mín	3,965

3.2. Construcción del dispositivo

3.2.1. Manufactura adictiva

La fabricación aditiva, conocida como impresión 3D, constituye una tecnología de producción transformadora que permite la materialización de objetos tridimensionales directamente desde un diseño digital [Gibson et al., 2010]. A diferencia de las metodologías sustractivas, que implican la eliminación de material de un bloque inicial, la impresión 3D construye la pieza mediante la adición sucesiva de capas, depositando material con precisión donde es requerido [Wohlers and Gornet, 2022].

Este enfoque no solo minimiza el desperdicio de insumos, sino que también facilita la creación de geometrías complejas, algunas veces pueden ser inalcanzables con procesos convencionales [Thompson and Smalley, 2016]. La versatilidad de esta tecnología, junto con su capacidad para generar prototipos funcionales hasta componentes finales, ha consolidado su relevancia en un amplio espectro de disciplinas, abarcando desde la ingeniería, medicina y la investigación [Li et al., 2017a].

Para la materialización de los componentes de este proyecto, se empleó una impresora 3D Creality Ender 3 V3 Plus. Como material de impresión, se seleccionó el Ácido Poliláctico (PLA) de la marca 4DLAB, debido a su alta disponibilidad, calidad y propiedades de impresión. El proceso de preparación del modelo 3D para la impresión, conocido como laminado o *slicing*, se llevó a cabo utilizando dos softwares. El primero fue Creality Print, el software por defecto de la impresora, y el segundo fue Orca Slicer, reconocido por sus avanzadas opciones de configuración y optimización. Ambos programas fueron fundamentales para transformar los diseños tridimensionales en formato estándar, es decir a los códigos G (G-code), que son las instrucciones las cuales la impresora 3D interpreta para depositar el material capa por capa, asegurando una impresión precisa y eficiente de cada componente.



Figura 3.7: Impresora 3D Creality Ender 3V3 Plus

Cuadro 3.6: Parámetros característicos de la impresora 3D Creality Ender-3 V3 Plus

Parámetro	Especificación
Volumen de impresión (XYZ)	$300 \times 300 \times 330 \text{ mm}^3$
Altura de capa	0,1 – 0,35 mm
Precisión de impresión	$\pm 0,1 \text{ mm}$
Velocidad máxima de impresión	Hasta 600 mm/s
Aceleración máxima	Hasta 20000 mm/s ²
Temperatura máxima de la boquilla	Hasta 300 °C
Temperatura máxima de la cama	Hasta 100 °C
Materiales compatibles	PLA, TPU, PETG, ABS, CR-Carbono
Pantalla	Pantalla táctil a color de 4.3 pulgadas
Conectividad	USB, WLAN, Creality Cloud
Dimensiones de la impresora (LWH)	410 × 445 × 577 mm
Peso neto	11.5 kg
Tecnología de movimiento	CoreXZ
Nivelación de cama	Automática
Extrusor	Direct Drive (All-metal)
Diámetro de filamento	1.75 mm
Slicing Software compatible	Creality Print, Cura, PrusaSlicer, OrcaSlicer

Impresión de la carcasa

Para la propuesta inicial de manufactura aditiva de la carcasa del dispositivo se consideró su impresión en tres partes, como se observa en la figura 3.8. No obstante, al ejecutar los cortes en el entorno CAD y proceder con el laminado en el slicer, se observó que los tiempos de impresión excedían las 10 horas. Esta extensión horaria implicaba un mayor requerimiento de monitoreo y una exposición elevada a imprevistos, tales como interrupciones en el suministro eléctrico u otras contingencias. Ante esta situación, se redefinió la estrategia de fabricación, dividiendo el dispositivo en siete partes. Esta metodología permitió limitar los tiempos de impresión individuales a un máximo de seis horas, garantizando

una mayor fiabilidad del proceso y minimizando la incidencia de factores externos.

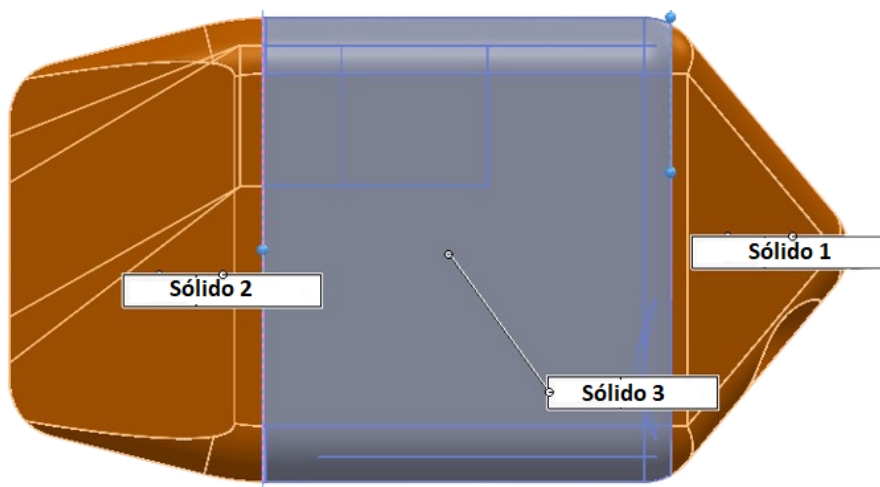
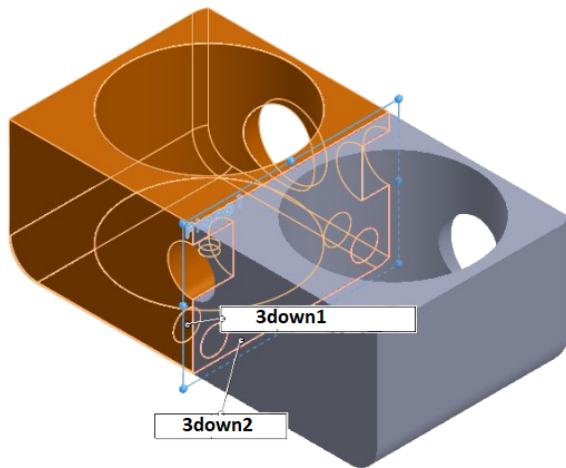
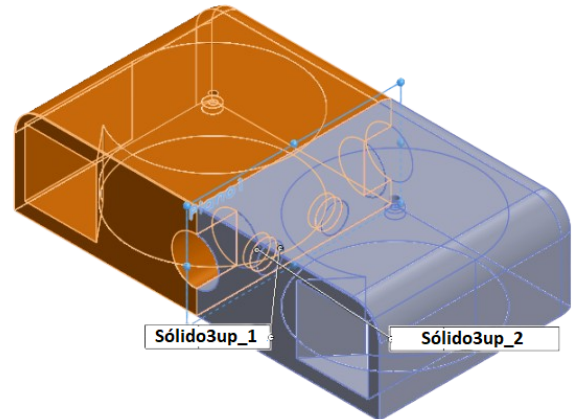


Figura 3.8: División en 3 partes del dispositivo.

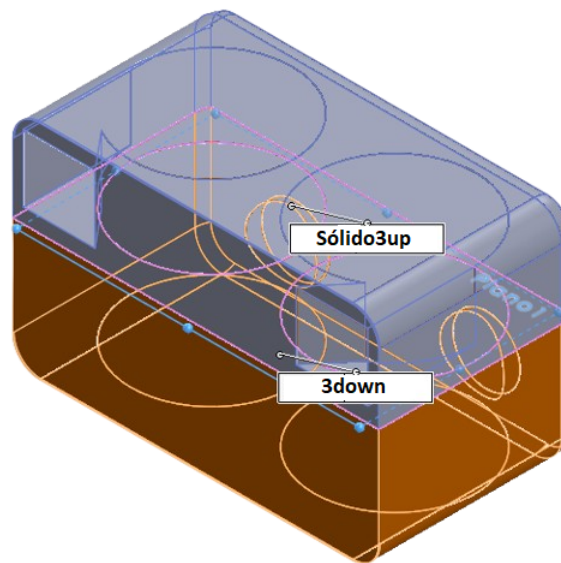
Al analizar los tiempos de impresión proyectados, se determinó que la manufactura del Sólido 2 y 3 excedería las 10 horas, lo cual se consideró un tiempo prolongado que incrementaba la dificultad anteriormente mencionadas. Ante esta situación, se implementó una estrategia de segmentación más pequeña. Para disminuir los tiempos de impresión y mitigar los riesgos asociados, el Sólido 3 fue subdividido en cuatro componentes más pequeños. Esta partición se realizó en dos etapas: primero, un corte horizontal dividió el sólido en dos piezas; posteriormente, cada una de estas piezas resultantes fue cortada por la mitad mediante un plano vertical.



(a) Corte de la parte inferior del sólido 3.



(b) Corte de la parte superior del sólido 3.



(c) Primer corte del sólido 3.

Figura 3.9: Cortes para el sólido 3

Adicionalmente, y siguiendo el mismo criterio del proceso, el Sólido 2 también fue sometido a subdivisión. Este componente se dividió en dos partes mediante la aplicación de un plano vertical. Estas consideraciones en la segmentación del diseño permitieron reducir significativamente los tiempos de impresión individuales de cada componente a un máximo de seis horas por pieza, garantizando una mayor fiabilidad del proceso y minimizando la incidencia de factores externos.

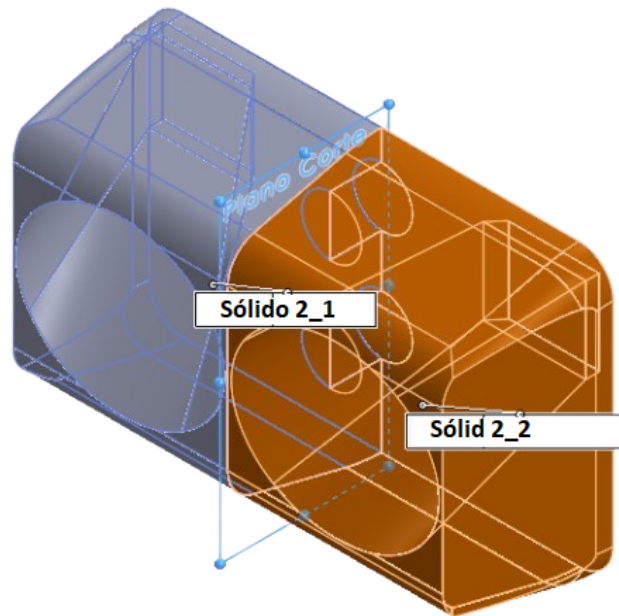


Figura 3.10: Cortes del sólido 2.

Para la impresión 3D de la carcasa, se usaron casi todos los parámetros predeterminados del perfil de Orca Slicer para la impresora, tal como se muestran en el cuadro 3.7. Sin embargo, para asegurar que las piezas no tuvieran fugas de agua, se hizo un cambio al número de perímetros (también llamados bucles o contornos) se aumentó de dos a cinco. Esta modificación buscó crear paredes más gruesas y sólidas, para evitar cualquier filtración del dispositivo.

Cuadro 3.7: Parámetros de impresión utilizados.

Parámetro	Valor/Configuración
Calidad (Quality)	
Altura de capa (Layer Height)	0.2 mm
Altura de primera capa (First Layer Height)	0.24 mm
Ancho de línea (Line Width)	0.45 mm
Paredes (Walls)	
Número de perímetros (Perimeters)	5
Ancho de perímetro externo (Outer Wall Line Width)	0.42 mm
Ancho de perímetro interno (Inner Wall Line Width)	0.45 mm
Relleno (Infill)	
Densidad de relleno (Infill Density)	15%
Patrón de relleno (Infill Pattern)	Gyroid
Material	
Temperatura de extrusor (Extruder Temp)	215 °C
Temperatura de cama (Bed Temp)	60 °C
Flujo (Flow Ratio)	0.98
Velocidad (Speed)	
Velocidad de impresión (Print Speed)	300 mm/s
Velocidad de pared exterior (Outer Wall Speed)	150 mm/s
Velocidad de relleno (Infill Speed)	300 mm/s
Velocidad de primera capa (First Layer Speed)	50 mm/s
Soporte (Support)	
Generar soporte (Generate Support)	Árbol orgánico (Tree)
Patrón de interfaz de soporte (Support Interface Pattern)	Rectilíneo
Enfriamiento (Cooling)	
Habilitar enfriamiento (Enable Cooling)	Sí
Velocidad del ventilador (Fan Speed)	100 % (después de la primera capa)
Adhesión de cama (Bed Adhesion)	
Tipo de adhesión (Type)	Borde (Brim)
Ancho de borde (Brim Width)	5 mm
Otros	
Retracción (Retraction Length)	0.5
Velocidad de retracción (Retraction Speed)	4 60 mm/s
Calibración de presión (Pressure Advance)	0.03

Impresión del rodete

Para la impresión del rodete, se implementaron ajustes específicos en la secuencia de impresión de paredes. Se optó por la configuración de orden de impresión de perímetros: Interior/Exterior. Esta opción ofrece una mayor precisión dimensional y un buen acabado superficial. Al imprimir primero los perímetros internos, se asegura que cualquier pequeña imperfección o deformación debido a la extrusión de las primeras capas se confíne al interior de la pieza. De este modo, el perímetro exterior, que es el visible y el que interactúa directamente con el fluido, se deposita sobre una base homogénea por las capas internas, logrando una superficie más lisa y mayor precisión dimensional. Además, esta secuencia

favorece la impresión de voladizos, ya que proporcionar un soporte interno previo.

Adicionalmente, la velocidad de impresión general establecida en el cuadro de parámetros (cuadro 3.7) se redujo al 50% de su valor. Esta disminución se implementó con el fin de optimizar el tiempo de solidificación del material entre capas. Al conceder suficiente tiempo para el enfriamiento del filamento recién depositado, se previenen problemas como la acumulación o el arrastre de material por parte de la boquilla, que son comunes cuando se opera a velocidades elevadas.

El Cuadro 3.8 presenta los parámetros de impresión para los componentes del dispositivo. Este cuadro muestra los recursos y el tiempo requeridos en la fabricación de cada pieza. Al final de cada columna se expone una visión global de los recursos necesarios para la producción completa del dispositivo, destacando la eficiencia y el uso de materiales en el proceso de fabricación.

Cuadro 3.8: Detalle de impresión del dispositivo

Piezas	Tiempo[h]	Material [g]
Sólido 1	5.37	322.99
Sólido 2_1	6.33	315.62
Sólido 2_2	4.36	318.00
3down1	4.49	307.00
3down2	4.51	308.00
Sólido3up_1	4.16	243.00
Sólido3up_2	4.16	243.00
Rodete sentido 1	2.52	62.98
Rodete sentido 2	2.51	62.31
Total	38.41	2182.90

3.2.2. Postprocesado y ensamble del dispositivo

El proceso de postprocesamiento de las piezas de impresión 3D se dividió en cuatro fases, comenzando con una fase de acabado superficial. Se realizó un lijado progresivo en seco de todas las superficies, utilizando una secuencia de granos de lija ascendentes: 200, 400, 600 y, finalmente, 1000. Este método se utilizó para asegurar una superficie lisa y uniforme para garantizar la adherencia de recubrimientos posteriores.

La segunda fase, se procedió al ensamblaje estructural como se muestra en el cuadro 3.9. Las secciones impresas del sólido se unieron utilizando un adhesivo epóxico de doble contacto, tal como se ilustra en la figura 3.11. Tras un adecuado tiempo de curado del adhesivo, se abordaron las imperfecciones superficiales externas. Se aplicó masilla plástica (hueso duro) en las áreas que presentaban defectos, y posteriormente se lijó hasta lograr una integración imperceptible con la superficie original.



(a) Sólido 2



(b) Sólido 3 inferior



(c) Sólido 3 superior.

Figura 3.11: Primera unión de los sólidos

Cuadro 3.9: Relación de componentes y conectividad de la primera fase de ensamblado.

Componentes Individuales	Sólido Ensamblado	Notas / Descripción
Sólido 2_1 + Sólido 2_2	Sólido 2	Unión para formar un solo componente.
3down1 + 3down2	Sólido 3down	Ensamblaje de la sección inferior.
Sólido3up_1 + Sólido3up_2	Sólido 3up	Ensamblaje de la sección superior.

La tercera fase del proceso se enfocó en el acabado superficial y la preparación para el ensamblaje funcional. Una vez obtenidas superficies lisas en todos los sólidos, se procedió a la aplicación de un primer en spray. Acto seguido, después del curado; se realizó la aplicación de pintura. Las superficies internas se recubrieron con una pintura impermeable amarilla (pintura epóxica). Las superficies externas, por su parte, recibieron una capa de pintura azul.

Una vez que ambas capas de pintura estuvieron completamente secas y curadas, se procedió a la alineación precisa del rodete. Para garantizar la estabilidad operativa y prevenir cualquier desbalanceo del rodete durante su funcionamiento, se implementó un rodamiento cerámicos de bola 685 de dimensiones $5 \times 11 \times 3 \text{ mm}^3$. Este rodamiento está ubicado en el centro tanto del tanque como de la cámara (parte inferior y superior), asegurando una buena alineación entre la parte inferior y la parte superior del sólido 3, lo cual es fundamental para un correcto funcionamiento.



Figura 3.12: Montaje del rodete

La última fase, el ensamblaje final de todos los componentes del sólido. Antes de pegar todos los sólidos, se realizó una verificación funcional del rodete, asegurando su rotación sin restricciones y que tuviera una operación fluida. Confirmada la funcionalidad, las partes se unieron de manera permanente utilizando resina epóxica de doble contacto.

Después del periodo de curado completo de la resina, se implementó una medida de seguridad adicional; la aplicación de cinta especializada para ductos sobre todas las uniones que fueron pegadas. Esta cinta proporciona un refuerzo estructural y una mayor hermeticidad, disminuyendo el riesgo de filtraciones. Finalmente, se aplicó una capa de pintura de acabado en la superficie externa del dispositivo, con el objetivo de retocar cualquier imperfección y mejorar la estética general.

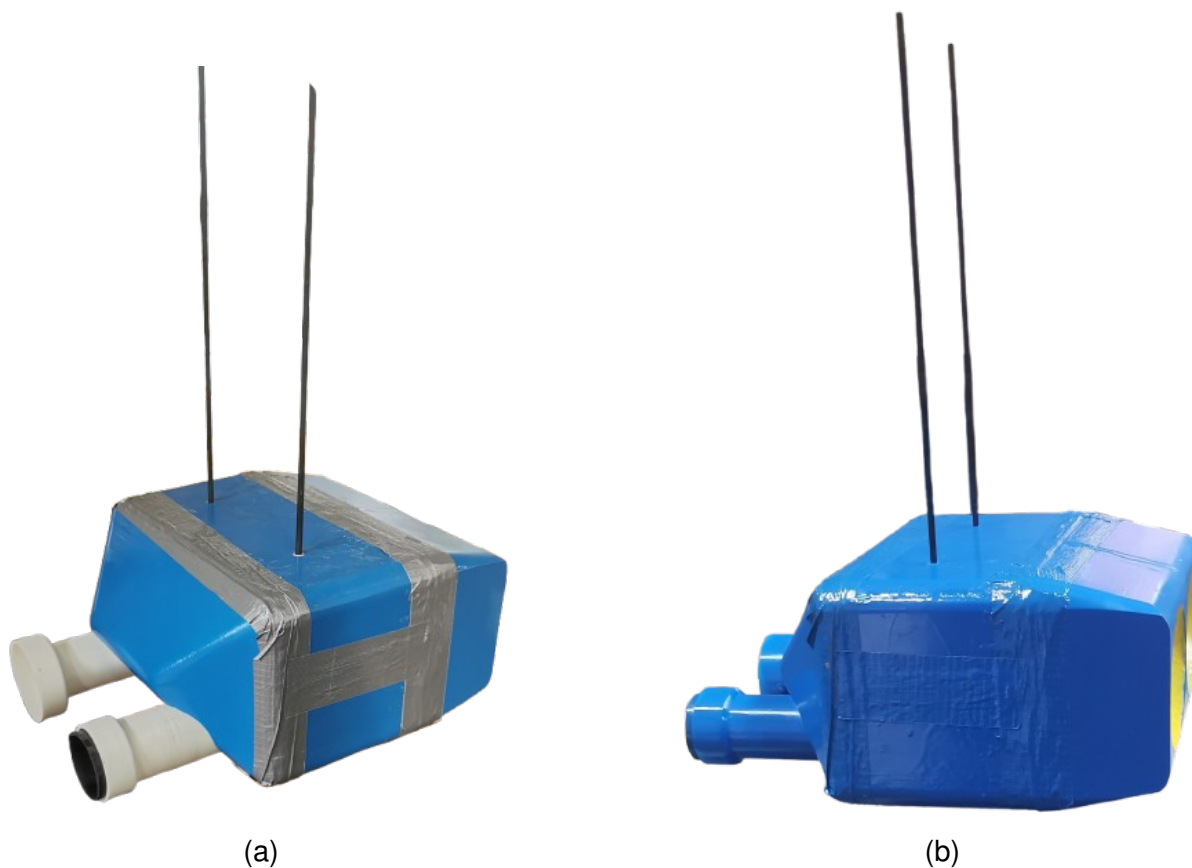


Figura 3.13: Dispositivo ensamblado

3.3. Análisis dimensional

Se parte del supuesto de que la potencia mecánica del dispositivo (P), depende funcionalmente de variables relacionadas con el fluido, la geometría del dispositivo, las condiciones de operación y el régimen de flujo. Esta dependencia se expresa inicialmente como:

$$P = f(\rho, \mu_d, V_\infty, \omega, D_{\max}, D_{\min}, C, A_r, A_c, D_c, D_d, a, b, A_a, A_g, A_e, Q_d, \tau, Z, \gamma) \quad (3.1)$$

donde:

- P : potencia mecánica del dispositivo
- ρ : densidad del agua
- μ_d : viscosidad dinámica del agua
- V_∞ : velocidad de aproximación del flujo
- ω : velocidad angular del rotor
- $D_{\max}$ (Diámetro max del rotor), $D_{\min}$ (Diámetro min del rotor), C (Cuerda), $\dots$, A_e (Área de entrada): parámetros geométricos
- Q_d : caudal descargado
- τ : torque generado
- Z, γ : número de palas y ángulo de conicidad

Selección de variables relevantes

A partir de las características geométricas, hidráulicas y dinámicas del sistema. Se identificaron las siguientes variables involucradas en el funcionamiento del dispositivo:

Cuadro 3.10: Variables identificadas del sistema

Variable	Símbolo	Dimensiones
Número de palas	Z	adimensional
Ángulo del rodete	γ	adimensional
Diámetro máximo del rodete	$D_{\max}$	L
Diámetro mínimo del rodete	$D_{\min}$	L
Cuerda del rodete	C	L
Altura del rodete	A_r	L
Altura total (cámara más tanque)	A_c	L
Diámetro de la cámara	D_c	L
Diámetro de descarga	D_d	L
Velocidad angular del rodete	ω	T^{-1}
Semi-eje mayor entrada elíptica	a	L
Semi-eje menor entrada elíptica	b	L
Altura columna de agua	A_a	L
Altura garganta	A_g	L
Ancho garganta	A_t	L
Velocidad de aproximación	V_{∞}	LT^{-1}
Caudal descargado	Q_d	L^3T^{-1}
Densidad del agua	ρ	ML^{-3}
Viscosidad dinámica del agua	μ_d	$ML^{-1}T^{-1}$
Torque mecánico generado	τ	ML^2T^{-2}
Potencia generada	P	ML^2T^{-3}

Las dimensiones fundamentales involucradas son:

$$[M] : \text{masa}, \quad [L] : \text{longitud}, \quad [T] : \text{tiempo}$$

Se identifican 21 variables, de las cuales 19 son dimensionales. Como existen tres dimensiones fundamentales, el número de grupos π dimensionales es:

$$n - k = 19 - 3 = 16 \text{ grupos } \pi$$

Se eligen tres variables dimensionales que contienen las tres dimensiones fundamentales de forma independiente y que son representativas del fenómeno:

$$\rho [ML^{-3}], \quad V_{\infty} [LT^{-1}], \quad D_{\max} [L]$$

Estas se emplean como variables base para formar los grupos π dimensionales.

Grupos π resultantes

A partir de las combinaciones de variables no repetidas con las repetidas, se construyen los siguientes grupos π :

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho D_{\max}^2 V_{\infty}^3}$$

$$\pi_2 = \frac{\tau}{\rho D_{\max}^3 V_{\infty}^2}$$

$$\pi_3 = \frac{Q_d}{D_{\max}^2 V_{\infty}}$$

$$\pi_4 = \frac{\mu_d}{\rho D_{\max} V_{\infty}}$$

$$\pi_5 = \frac{\omega D_{\max}}{V_{\infty}}$$

$$\pi_6 = \frac{C}{D_{\max}},$$

$$\pi_7 = \frac{D_{\min}}{D_{\max}},$$

$$\pi_8 = \frac{A_r}{D_{\max}},$$

$$\pi_9 = \frac{A_c}{D_{\max}}$$

$$\pi_{10} = \frac{D_c}{D_{\max}},$$

$$\pi_{11} = \frac{D_d}{D_{\max}},$$

$$\pi_{12} = \frac{a}{D_{\max}},$$

$$\pi_{13} = \frac{b}{D_{\max}}$$

$$\pi_{14} = \frac{A_a}{D_{\max}},$$

$$\pi_{15} = \frac{A_g}{D_{\max}},$$

$$\pi_{16} = \frac{A_t}{D_{\max}}$$

$$\pi_{17} = Z,$$

$$\pi_{18} = \gamma$$

Funcional adimensional

Una vez establecidos los grupos a dimensionales, se propone la forma funcional adimensional del sistema:

$$\pi_P = f(\pi_{\tau}, \pi_Q, \text{Re}, \pi_{\omega}, \pi_{\text{geom}}, Z, \gamma) \quad (3.2)$$

Esta expresión resume de forma compacta la influencia de todas las variables relevantes sobre la potencia generada por el sistema.

3.3.1. Análisis de los grupos a dimensionales

La mayoría de grupos a dimensionales resultantes son relaciones geométricas del dispositivo. Los primeros grupos adimensionales son muy parecidos a los que aparecen en la literatura.

Número de potencia (π_1)

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho D_{\max}^2 V_{\infty}^3}$$

Este grupo representa la potencia generada (P) en relación con la energía cinética disponible en el flujo incidente. Es una forma de expresar la eficiencia de la turbina en la conversión de la energía del flujo en potencia útil. Este es un grupo adimensional fundamental

y universal en el estudio de turbinas, ya sean hidráulicas, eólicas o hidrocínéticas. En el campo de las turbinas hidrocínéticas (THCs), se le conoce comúnmente como coeficiente de Potencia (C_P). Se utiliza para evaluar la eficiencia de la turbina y comparar el rendimiento de diferentes diseños. La forma estándar es $C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^3}$, donde A es el área barrida de la turbina. La formulación presentada utiliza $D_{\max}^2$ en lugar de A , lo cual es válido si A es proporcional a $D_{\max}^2$ (e.g., $A = \frac{\pi}{4}D_{\max}^2$), lo que lo hace directamente comparable.

Número de torque (π_2)

$$\pi_2 = \frac{\tau}{\rho D_{\max}^3 V_\infty^2}$$

Este grupo relaciona el torque (τ) generado por la turbina con las fuerzas dinámicas del fluido. Similar al coeficiente de potencia, existe un coeficiente de torque (C_T) estándar para THCs, definido como $C_T = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho AD_{\max}V_\infty^2}$. La formulación presentada es muy similar, utilizando $D_{\max}^3$ en el denominador, lo cual es coherente si se considera que el torque es una fuerza por una distancia ($D_{\max}$).

Número de caudal (π_3)

$$\pi_3 = \frac{Q_d}{D_{\max}^2 V_\infty}$$

Este grupo relaciona el caudal volumétrico (Q_d) que pasa a través de una sección característica con el diámetro y la velocidad del flujo, se puede considerar que indicar la capacidad de la turbina para procesar un volumen de fluido dado. No es tan comúnmente citado de forma independiente como C_P o C_T en la bibliografía general de THCs, el caudal es intrínsecamente parte de los cálculos de potencia y eficiencia.

Número de Reynolds inverso (π_4)

$$\pi_4 = \frac{\mu_d}{\rho D_{\max} V_\infty}$$

Este grupo es el inverso del Número de Reynolds ($Re = \frac{\rho V_\infty D_{\max}}{\mu_d}$). El Número de Reynolds es importante para caracterizar el régimen de flujo (laminar vs. turbulento) y la importancia de las fuerzas inerciales frente a las fuerzas viscosas. Un valor bajo indica un flujo dominado por la viscosidad, mientras que un valor alto indica un flujo dominado por la inercia. El Número es común en el estudio de THCs.

Número de Strouhal (π_5)

$$\pi_5 = \frac{\omega D_{\max}}{V_\infty}$$

Este grupo relaciona una frecuencia característica (ω , velocidad angular) y una longitud característica ($D_{\max}$) con la velocidad del flujo. Para una turbina, $\omega \cdot D_{\max}$ es equivalente a la velocidad de punta de las palas. Por lo tanto, este grupo es proporcional a la relación de Velocidad de Punta (Tip Speed Ratio - TSR, λ). Es fundamental para determinar el coeficiente de potencia máximo de una turbina y su punto de operación óptimo. La forma común es $\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty}$ o $\lambda = \frac{\omega D_{\max}/2}{V_\infty}$, donde R es el radio.

Los primeros cinco grupos a dimensionales identificados son variantes o equivalentes directos de los números a dimensionales fundamentales y más utilizados en el diseño, análisis y optimización de turbinas hidrocínéticas.

- π_1 es el **Coeficiente de Potencia** (C_P).
- π_2 es el **Coeficiente de Torque** (C_T).
- π_3 es un **Coeficiente de Caudal**.
- π_4 es el **inverso del Número de Reynolds** ($1/Re$).
- π_5 es la **Relación de Velocidad de Punta** (TSR, λ).

Relaciones funcionales entre grupos

Las relaciones funcionales entre los grupos π principales se pueden resumir de la siguiente manera:

$$\pi_P = \pi_\tau \cdot \pi_\omega \quad (3.3)$$

Además, se plantean las siguientes dependencias funcionales entre los grupos:

$$\pi_P = f(\pi_\tau, \pi_Q, \pi_\omega, Re, \pi_{\text{geom}}, Z, \gamma) \quad (3.4)$$

$$\pi_Q = f_1(Re, \pi_{\text{geom}}) \quad (3.5)$$

$$\pi_\tau = f_2(\pi_Q, \pi_\omega, \pi_{\text{geom}}) \quad (3.6)$$

Estas relaciones indican que la potencia generada está influenciada no solo por la dinámica del rotor, sino también por la geometría y el régimen de flujo.

3.4. Montaje experimental.

3.4.1. Canal de pruebas.

La verificación y caracterización experimental del dispositivo se realizó en el canal abierto del laboratorio de fluidos e hidráulica de la escuela EIDENAR, en la Universidad del Valle. La instalación corresponde a un ciclo cerrado hidráulico diseñado para la recirculación de un fluido, adecuado para estudio de fenómenos hidráulicos. El sistema integra los siguientes elementos.

- **Tanque de Descarga:** Punto de retorno y succión del fluido.
- **Bomba Centrífuga:** Su función es impulsar el fluido.
- **Tubería de Conducción y Accesorios:** Red de transporte del fluido.
- **Válvula de Compuerta:** Ubicada antes de la impulsión, permite la regulación manual del caudal.
- **Medidor de Flujo:** Un DFM-5.0 de Greyline Instruments Inc., instalado en la tubería de conducción para la medición precisa del caudal.
- **Tanque de Alimentación:** Suministra flujo controlado al canal experimental.
- **Canal Prismático:** De sección constante, donde se realizan los experimentos.

Cuadro 3.11: Especificaciones del canal y sus componentes

Componente	Especificación
Canal Experimental	
Dimensiones	8 m (largo) × 0.35 m (ancho) × 0.5 m (profundidad)
Construcción	Lámina de acrílico reforzado con perfiles de ángulo y lámina de acero, permitiendo la visualización directa del fluido.
Tanque de Alimentación	
Dimensiones	1.8 m (altura) × 0.35 m (ancho) × 1 m (largo)
Descarga	Orificio de 0.03 m de diámetro, controlado por una compuerta deslizante.
Tanque de Descarga	
Material	Lámina de acero calibre 18 (1.6 mm de espesor).
Dimensiones	1.22 m (ancho) × 2.44 m (largo) × 1.22 m (profundidad).
Sistema de Bombeo	
Motobomba	30 HP.
Control	Arrancador con switch on/off y variador de velocidad Altivar 71 de la marca TELE-MECANIQUE SCHNEIDER
Descarga	Circular, 4 pulgadas de diámetro.
Cabeza Máxima	40 m.
Caudal Máximo Suministrado	Aproximadamente 0.035 m ³ /s.
Tubería de Conducción	Equipada con válvulas y accesorios, incluyendo: • una válvula de compuerta para regular el caudal. • un caudalímetro <i>DFM-5</i> de la marca Grevline Instruments INC, instalado en una de las tuberías.

El ciclo operativo inicia con la succión de agua desde el tanque de descarga por parte de la bomba. La regulación precisa del caudal se logró a través del variador de velocidad de la bomba, manteniendo la válvula de compuerta completamente abierta y sin modificar su posición durante la operación. Posteriormente, el agua es impulsada por la tubería de circulación hacia el tanque de alimentación, que a su vez suministra el flujo al canal experimental. Concluido el recorrido por el canal, el agua desborda y retorna al tanque de descarga, reiniciando el proceso. La figura 3.14 ilustra el esquema del canal con sus respectivos componentes.

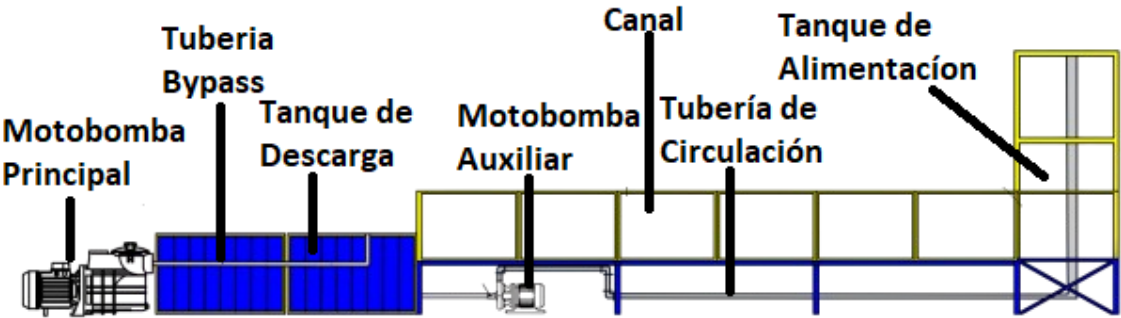


Figura 3.14: Esquema del canal y sus componentes

3.4.2. Adquisición de datos

Con el fin de cumplir los objetivos establecidos, se implementó un proceso de adquisición de datos para caracterizar el dispositivo. La recolección se centró en obtener información sobre tres parámetros fundamentales: el caudal volumétrico (aforo volumétrico), las revoluciones por minuto (RPM) y el torque mecánico.

El caudal del canal se registró utilizando un medidor de flujo DFM 5.0, fabricado por Greyline. Este equipo destaca por su tecnología ultrasónica no intrusiva, que permite la medición del flujo sin contacto directo con el líquido. El sensor ultrasónico, compatible con diámetros internos de tubería a partir de 1/2" (12.5 mm), fue instalado en la sección externa de la tubería de alimentación, encargada de transportar el agua desde la motobomba hacia el tanque. Los datos de flujo se visualizaron en su pantalla LCD.



Figura 3.15: Caudalímetro Doppler DFM 5.0.

Para sostener y posicionar el dispositivo de manera precisa dentro del canal de laboratorio, se diseñó y fabricó una estructura de soporte modular. Esta estructura, construida en lámina de acero inoxidable y acrílico, se superpone directamente en los ángulos superiores que soportan las paredes del sistema de pruebas, esta estructura está asegurada por mordazas en cada extremo que sujetan el acrílico con los soportes del canal.

La parte inferior de la estructura se compone de una platina de 2 mm de espesor, cuya geometría replica la base del dispositivo. Esta platina incorpora pliegues que se ajustan al ancho del dispositivo, asegurando un encaje preciso. Se extiende verticalmente 17 cm, finalizando en pestañas horizontales de 3 cm con orificios pasantes de 8 mm de diámetro para el anclaje.

Para la sujeción de la parte superior del dispositivo, se utilizó una lámina de acrílico de 9 mm (30x13 cm). Esta lámina cuenta con seis perforaciones. Cuatro en los extremos para fijar el dispositivo con pernos, y dos centrales para permitir el paso fluido de los ejes de rotación, evitando cualquier interferencia con su movimiento. Completando la estructura, una segunda lámina de acrílico de 9 mm replica las perforaciones de la placa superior, pero con un perímetro ampliado (50x45 cm) para un soporte adicional.

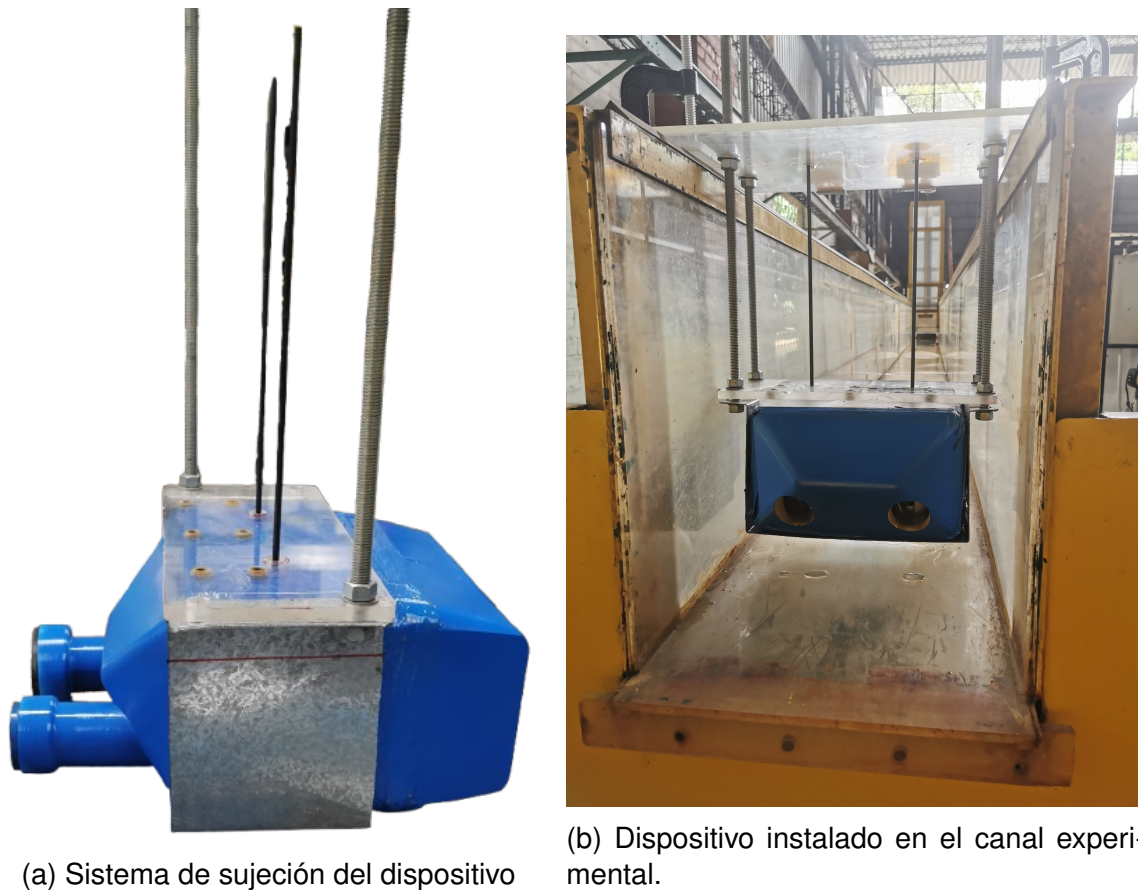


Figura 3.16: Vista general del sistema de sujeción del dispositivo en el canal.

3.4.3. Aforo volumétrico

Para llevar a cabo la medición de caudal captado por el dispositivo, inicialmente se acopla en cada salida un tubo de PVC de 1,5 pulgadas y 60 cm de longitud para facilitar la medición. Es fundamental que la toma de datos se realice cuando el dispositivo alcance su estado estable.

El procedimiento de medición volumétrica requiere una sincronización entre el encargado de manipular la probeta y el que maneja el cronómetro. Durante la fase de recolección, se permite que la probeta se llene hasta un volumen predefinido, lo que permitirá una lectura más precisa y reducirá el impacto de los errores de inicio y fin de la medición.

Una vez que el volumen deseado está próximo a alcanzarse, se alerta a la persona que tiene el cronómetro, indicando que se prepare para el cese de la medición. De manera similar al inicio, se repite una cuenta regresiva (“¡Uno!”, “¡Dos!”, “¡Tres!”), y al decir “¡Tres!”, la probeta es retirada rápidamente del flujo mientras el cronómetro es detenido.



(a) Probeta medición de caudal.



(b) Tubo de PVC acoplados en la descarga.

Figura 3.17: Vista general del sistema de aforo volumétrico.

Inmediatamente después de cada recolección, se registra con cautela el volumen de agua en la probeta, realizando la lectura a la altura del menisco. Del mismo modo, se anota el tiempo transcurrido mostrado por el cronómetro. Este procedimiento se replicó para todos los caudales hasta alcanzar el caudal máximo. Finalmente, los caudales individuales se calculan dividiendo el volumen recolectado entre el tiempo transcurrido, según la siguiente fórmula.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

- Q es el caudal.
- V es el volumen recolectado.
- t es el tiempo transcurrido.

3.4.4. Medición de torque

La metodología para la medición de torque del dispositivo se fundamentó en dos etapas principales. La adaptación de la orientación del eje de transmisión y el diseño e implementación de un freno de Prony. El sistema para la medición de torque es una adaptación de un dinamómetro de balanza o freno de Prony, donde el torque generado por el dispositivo es equilibrado por una masa conocida aplicada a un brazo de palanca. La particularidad en este caso es que el punto de equilibrio se determina midiendo el ángulo que el brazo forma con la vertical.

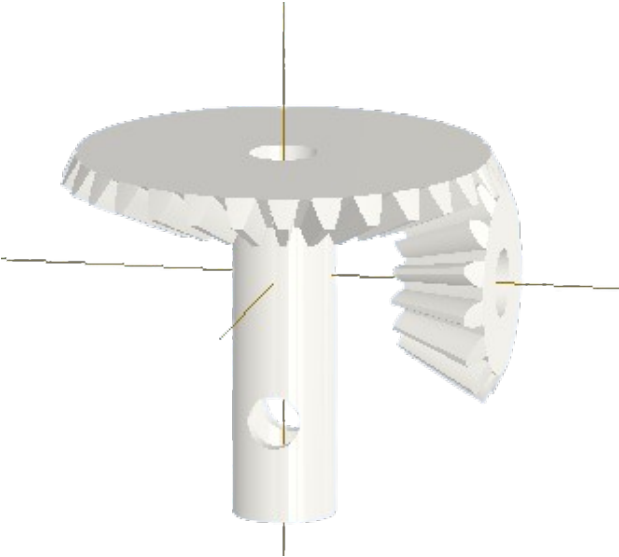
Adaptación de la orientación del eje

Inicialmente, el dispositivo requería una modificación en la orientación del eje de transmisión para facilitar la integración con el sistema de medición de torque. Este cambio se

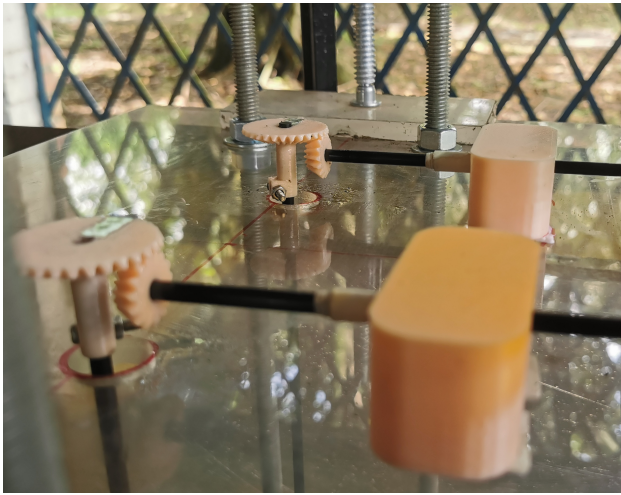
logró mediante la utilización de una transmisión por engranajes. Específicamente, se emplearon dos engranajes cónicos rectos diseñados para desviar el sentido del eje de una configuración vertical a una horizontal. La selección de engranajes cónicos rectos fue para garantizar una transmisión de potencia eficiente y precisa en el cambio de dirección de 90°. Los parámetros de diseño de estos engranajes se establecieron en un software CAD, y se detallan a continuación.

Cuadro 3.12: Parámetros de diseño de los engranajes cónicos rectos

Atributo	Categoría	Valor	Unidad/Notas
Coeficiente de Engranaje	Común	0,5000	
Módulo	Común	1,125	mm
Ancho de Cara	Común	7,500	mm
Ángulo de Eje	Común	90,0000	°
Ángulo de Presión	Común	20,0000	°
Ángulo de Hélice	Común	45,0000	°
Engranaje 1		<i>(Piñón)</i>	
Número de Dientes		30	
Engranaje 2		<i>(Corona)</i>	
Número de Dientes		15	



(a) Engranajes cónicos rectos



(b) Mecanismo de conversión de giro ensamblado

Figura 3.18: Sistema de conversión de giro

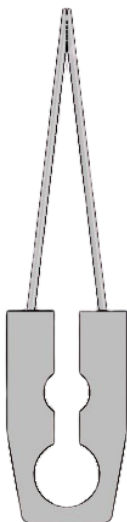
Diseño e implementación del freno de Prony

Una vez que la orientación del eje principal fue horizontal, se procedió al diseño de un freno de Prony, adaptado a las características específicas del sistema. El diseño de este freno se basó en los principios y la estructura del freno Prony de la figura 3.19.

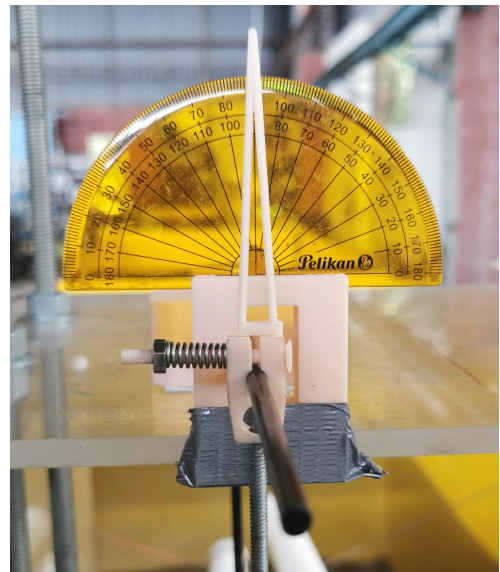


Figura 3.19: Freno prony de referencia. Tomado de :[[StirlingShop](#),]

El freno de Prony fue fabricado mediante impresión 3D utilizando material PLA, debido a su facilidad de impresión y propiedades mecánicas. El funcionamiento de este freno se basa en la fricción controlada. Inicialmente, el freno se monta de manera solidaria al eje de transmisión. Luego se le aplica una carga conocida (masa) en su brazo de palanca. Posteriormente, el sistema y el freno se calibran, dejándolo verticalmente con respecto al cero de un transportador para asegurar la referencia angular. Finalmente, se permite que el sistema alcance un punto de equilibrio donde el eje cesa su movimiento de rotación debido a la fuerza de fricción generada por el freno, momento en el cual se registra el ángulo. En este punto de equilibrio, el torque generado por el dispositivo en el eje es directamente contrarrestado por el torque resistivo del freno de Prony, el cual se calcula a partir de la componente tangencial de la fuerza aplicada y la longitud del brazo de palanca del freno. Este método permite una medición indirecta, pero efectiva del torque de salida del sistema.



(a) Freno prony propuesto.



(b) Freno prony ensamblado

Figura 3.20: Sistema de medición de torque

Con el sistema operando en su estado estacionario, se inició la fase de medición. Se fijó

el freno en la posición inicial de 0° según el transportador, se fijó al eje y se permitió que el sistema se estabilizara. Se verificó que la oscilación de la rotación no superara los 45° . Para registrar el ángulo de desplazamiento con precisión, se capturó una imagen frontal con un teléfono celular, facilitando un análisis posterior detallado. Este procedimiento se aplicó a cada uno de los caudales, desde el menor hasta el máximo. Previo a las pruebas, los pesos fueron calibrados manualmente mediante una medición de referencia que determinó su valor máximo.

3.4.5. Medición de RPM.

La velocidad angular (RPM) de los rodetes se midió con un tacómetro digital SM6236E en modo óptico (Figura 3.21a). Este instrumento, posicionado entre 5 y 10 cm de la zona de medición, ofrece una resolución de 0.1 RPM para velocidades menores a 1000 RPM, según su manual de funcionamiento.

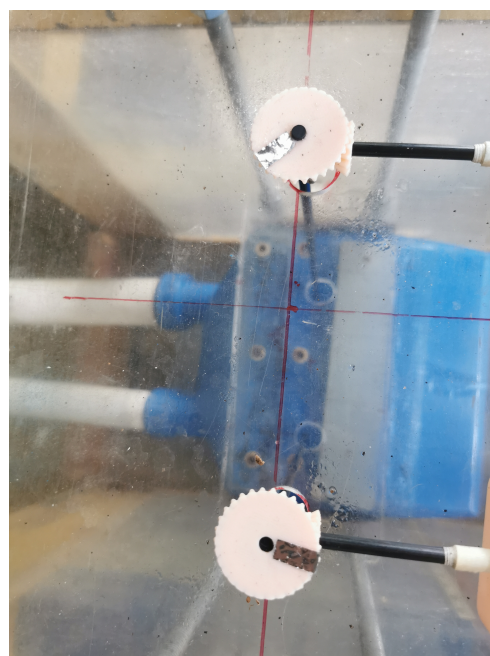
Para la detección, se aprovechó el mecanismo de conversión del eje vertical a horizontal; una tira de papel reflectante se adhirió a la parte no dentada del engranaje en el eje de la turbina (Figura 3.21b), siguiendo las recomendaciones del fabricante.

En estado estacionario, y con una tasa de muestreo de 1 Hz, se registraron datos durante un minuto por rodete. El tacómetro, gracias a su memoria interna con capacidad de hasta 90 datos, almacenó las lecturas. La pantalla LCD del dispositivo mostraba los valores de RPM máximo, mínimo y último registrados durante cada periodo de medición.

Para el postprocesamiento, la RPM de cada medición se calculó como promedio entre el valor máximo y mínimo obtenido directamente del instrumento. Este procedimiento se replicó para todos los caudales hasta alcanzar el caudal máximo.



(a) Tacómetro digital SM6236E.



(b) Tira de papel reflectante en el engranaje del eje de la turbina.

Figura 3.21: Montaje de medición de RPM

La Figura 3.22 ilustra la configuración experimental completa, destacando el montaje del dispositivo y su sistema de fijación utilizado para la recolección de datos.

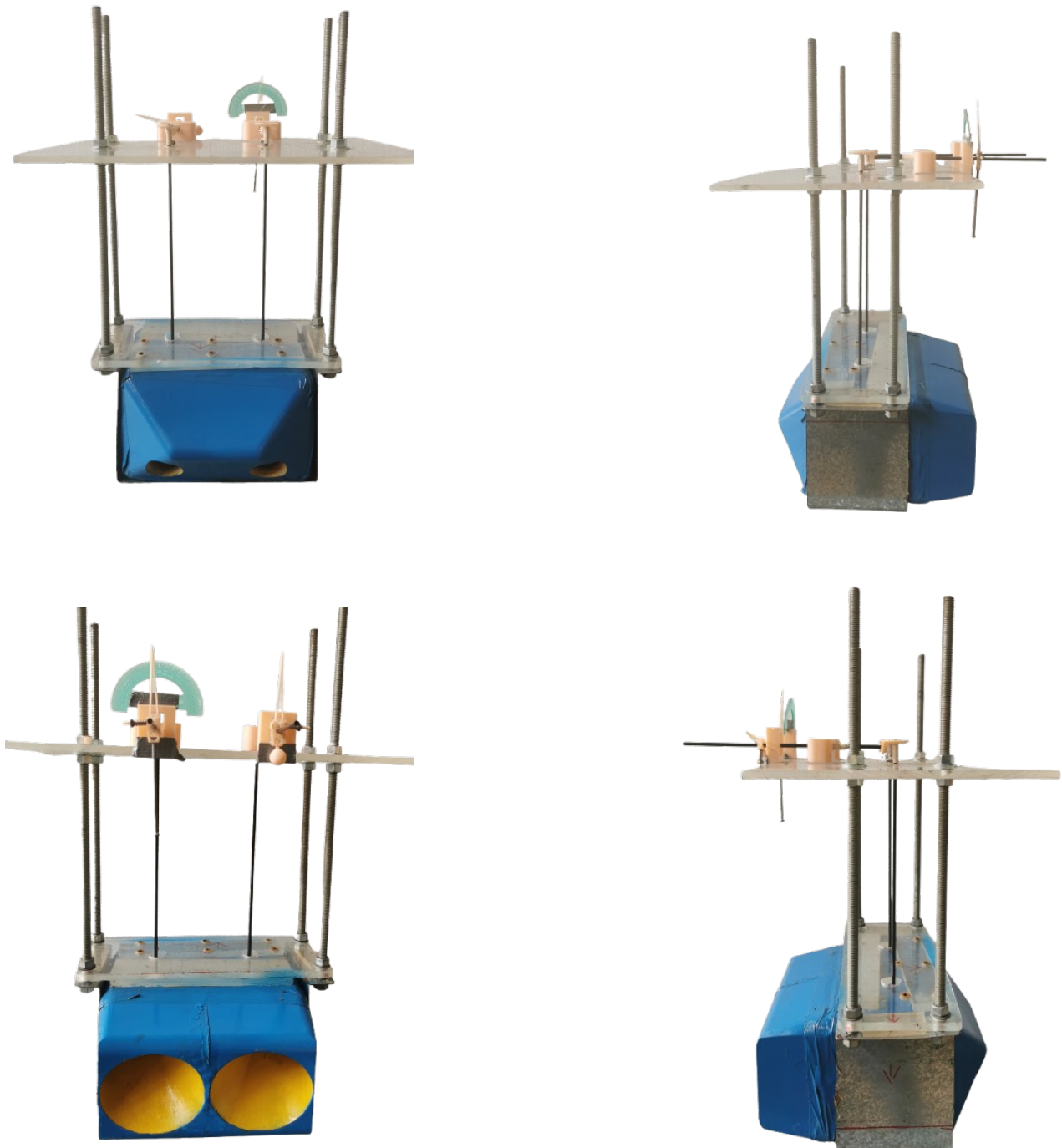


Figura 3.22: Sistema de fijación y conversión del giro del dispositivo.

3.4.6. Estimación experimental del rendimiento del dispositivo.

Se estimó la potencia y eficiencia del dispositivo a partir de datos experimentales, de torque y velocidad angular se siguió los siguientes pasos.

1. Potencia mecánica total de salida ($P_{m,salida_total}$)

Para obtener la potencia mecánica total generada por el dispositivo, se suma la potencia de cada rodete.

$$P_{m,salida_total} = (\tau_I \cdot \omega_I) + (\tau_D \cdot \omega_D)$$

Donde:

- $P_{m,salida_total}$ es la potencia mecánica total (en watts, W).
- τ_I y τ_D son los torques medidos en el eje del rodete izquierdo y derecho, respectivamente (en Newton-metros, N·m).
- ω_I y ω_D son las velocidades angulares medidas en el eje del rodete izquierdo y derecho, respectivamente (en radianes por segundo, rad/s).

El dispositivo en rotación genera un torque $\tau_{dispositivo}$. Este es equilibrado por el momento de fuerza generado por una masa conocida (m) suspendida a una distancia L del pivote (Torque del fricción debido al freno prony). La medición clave es el ángulo θ que el brazo de palanca forma con la vertical en el punto de equilibrios de estos momentos.

La fuerza generada por la masa es la siguiente expresión.

$$F_g = m \cdot g$$

Donde:

- m : masa conocida (en kg)
- g : aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$ aproximadamente)

El torque (τ) se define como el producto de una fuerza por la distancia perpendicular desde el punto de rotación (pivote) hasta la línea de acción de la fuerza ($r_{\perp}$).

Dado que la velocidad angular medida está en revoluciones por minuto (RPM), se transformará a radianes por segundo (rad/s) para su uso en cálculos subsiguientes. Mediante la aplicación de la siguiente expresión:

$$\omega \text{ (rad/s)} = \text{RPM} \cdot \frac{2\pi}{60}$$

Diagrama de cuerpo libre (DCL) del brazo de palanca.

Consideramos el brazo de palanca como un cuerpo rígido sobre el cual actúan varias fuerzas y torques, con los siguientes supuestos.

- El brazo de palanca es ideal (masa despreciable, rígido).
- El pivote en el centro de rotación es ideal (sin fricción).
- La fuerza de la masa (F_g) actúa verticalmente hacia abajo.
- El sistema se encuentra en equilibrio estático.

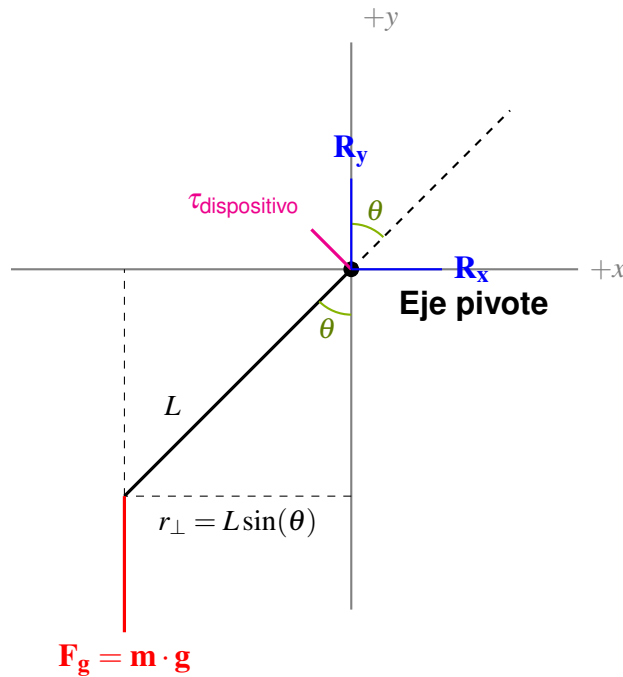


Figura 3.23: Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) del brazo de palanca mostrando torque aplicado en el pivote, reacciones y ángulos definidos respecto al eje vertical.

Fuerzas y torques actuantes.

1. **Fuerza del Peso de la Masa (F_g):** Actúa en el extremo del brazo de palanca, dirigida verticalmente hacia abajo. Genera un torque en sentido horario (o antihorario, según la convención).
2. **Torque del Dispositivo ($\tau_{\text{dispositivo}}$):** Es el torque que se está midiendo o resistiendo, aplicado en el eje del pivote. Actúa en dirección opuesta a τ_{masa} para lograr el equilibrio.
3. **Fuerzas de Reacción del Pivote (R_x, R_y):** Componentes horizontal y vertical de la fuerza que el pivote ejerce sobre el brazo para mantenerlo en su posición, sin traslación. No generan torque alrededor del pivote ideal.

Ecuación de equilibrio (suma de torques).

Para que el brazo de palanca se encuentre en equilibrio estático, la suma de los torques alrededor del pivote debe ser cero:

$$\sum \tau_{\text{pivote}} = 0$$

Considerando el torque generado por el dispositivo ($\tau_{\text{dispositivo}}$) en una dirección y el torque generado por la masa (τ_{masa}) en la dirección opuesta:

$$\tau_{\text{dispositivo}} - \tau_{\text{masa}} = 0$$

$$\tau_{\text{dispositivo}} = \tau_{\text{masa}}$$

La distancia perpendicular ($r_{\perp}$) desde el pivote hasta la línea de acción de la fuerza F_g es:

$$r_{\perp} = L \cdot \sin(\theta)$$

Sustituyendo la expresión para τ_{masa} :

$$\tau_{\text{dispositivo}} = F_g \cdot r_{\perp} = (m \cdot g) \cdot (L \cdot \sin(\theta))$$

Este cálculo permite determinar el torque que el dispositivo está generando o resistiendo en el punto de equilibrio. Donde:

- L : longitud del brazo de palanca desde el pivote hasta el punto de aplicación de la masa (en m)
- θ : ángulo que el brazo de palanca formado con la vertical (en grados)

Por lo tanto, en equilibrio, el torque medido (τ) es igual al torque generado por la masa:

$$\tau = F_g \cdot r_{\perp}$$

Sustituyendo F_g y $r_{\perp}$:

$$\tau = (m \cdot g) \cdot (L \cdot \sin(\theta))$$

$$\tau = m \cdot g \cdot L \cdot \sin(\theta)$$

2. Potencia hidráulica total disponible ($P_{\text{agua_total}}$)

La potencia hidráulica total disponible en la entrada del dispositivo se calcula asumiendo que ambas entradas son iguales y la velocidad de aproximación del flujo agua (v_{∞}^3) es la misma para cada una:

$$P_{\text{agua_total}} = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{\text{ellipse}} \cdot v_{\infty}^3 \right)$$

Se simplifica la potencia hidráulica total disponible como:

$$P_{\text{agua_total}} = \rho \cdot A_{\text{ellipse}} \cdot v_{\infty}^3$$

Donde:

- $P_{\text{agua_total}}$ es la potencia hidráulica total disponible en watts, W.
- ρ es la densidad del agua (aproximadamente 1000 kg/m³ para agua dulce).
- A_{ellipse} es el área de la boca elíptica de una de las cámaras de entrada (en metros cuadrados, m²). Para una elipse, $A_{\text{ellipse}} = \pi \cdot a \cdot b$, donde a es el semieje mayor y b el semieje menor.
- v_{∞} es la velocidad de aproximación del flujo de agua antes de entrar al dispositivo, expresada en metros por segundo (m/s).

La velocidad de aproximación v_{∞} , se halló con:

$$v_{\infty} = \frac{Q_c}{H_d t}$$

donde:

- Q_c es el caudal de circulación en el canal, medido por el caudalímetro Doppler DFM.
- H_d es la altura de columna de agua medida 2 cm antes del dispositivo.
- t es el ancho del canal (35.0 cm).

3. Eficiencia del Dispositivo ($\eta_{dispositivo}$)

La eficiencia del dispositivo es la relación de como se convierte la energía hidráulica disponible en potencia mecánica útil:

$$\eta_{dispositivo} = \frac{P_{m,salida_total}}{P_{agua_total}}$$

Donde:

- $\eta_{dispositivo}$ es la eficiencia mecánica del dispositivo.
- $P_{m,salida_total}$ es la potencia mecánica total generada.
- P_{agua_total} es la potencia hidráulica total disponible calculada.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIONES.

Este capítulo se presenta los resultados obtenidos del dispositivo. Para una visión concisa, se muestran los datos promedio del coeficiente de potencia (C_p), el coeficiente de torque (C_T), y la relación de velocidad de punta (TSR). Adicionalmente, se presenta el torque promedio y la velocidad angular promedio del rodete. Finalmente, se incluye la potencia máxima, que corresponde a la suma de la contribución de potencia de cada rodete.

Se destaca que los resultados se obtuvieron en el laboratorio, el cual no cuenta con la instrumentación, instalaciones y canal apropiado; por esta razón este experimento es básicamente exploratorio a partir de una análisis cualitativo. Aunque estos resultados iniciales son valiosos para futuras mejoras.

Las pruebas experimentales fueron realizadas bajo condiciones de flujo controladas, con un rango de velocidades de aproximación del agua entre 0,4377 m/s y 0,5026 m/s. Este estudio se llevó a cabo utilizando ocho diferentes velocidades de flujo, en las cuales se realizaron las mediciones correspondientes para la caracterización del dispositivo. Los resultados detallados e individuales para cada rodete se encuentran disponibles en los anexos, proporcionando mayor información de los datos experimentales.

La figura 4.1 evidencia cómo el torque promedio generado por el dispositivo cambia a medida que varía la velocidad de aproximación del agua. Se observa que el torque es insignificante para algunas velocidades de flujo (0,4377 a 0,4529 m/s) y aumenta considerablemente a medida que la velocidad del agua se incrementa, alcanzando un valor máximo de $0,0114 \text{ N} \cdot \text{m}$ cerca de los 0,4958 m/s. Posteriormente, el torque tiende a disminuir o fluctuar ligeramente a velocidades más altas.

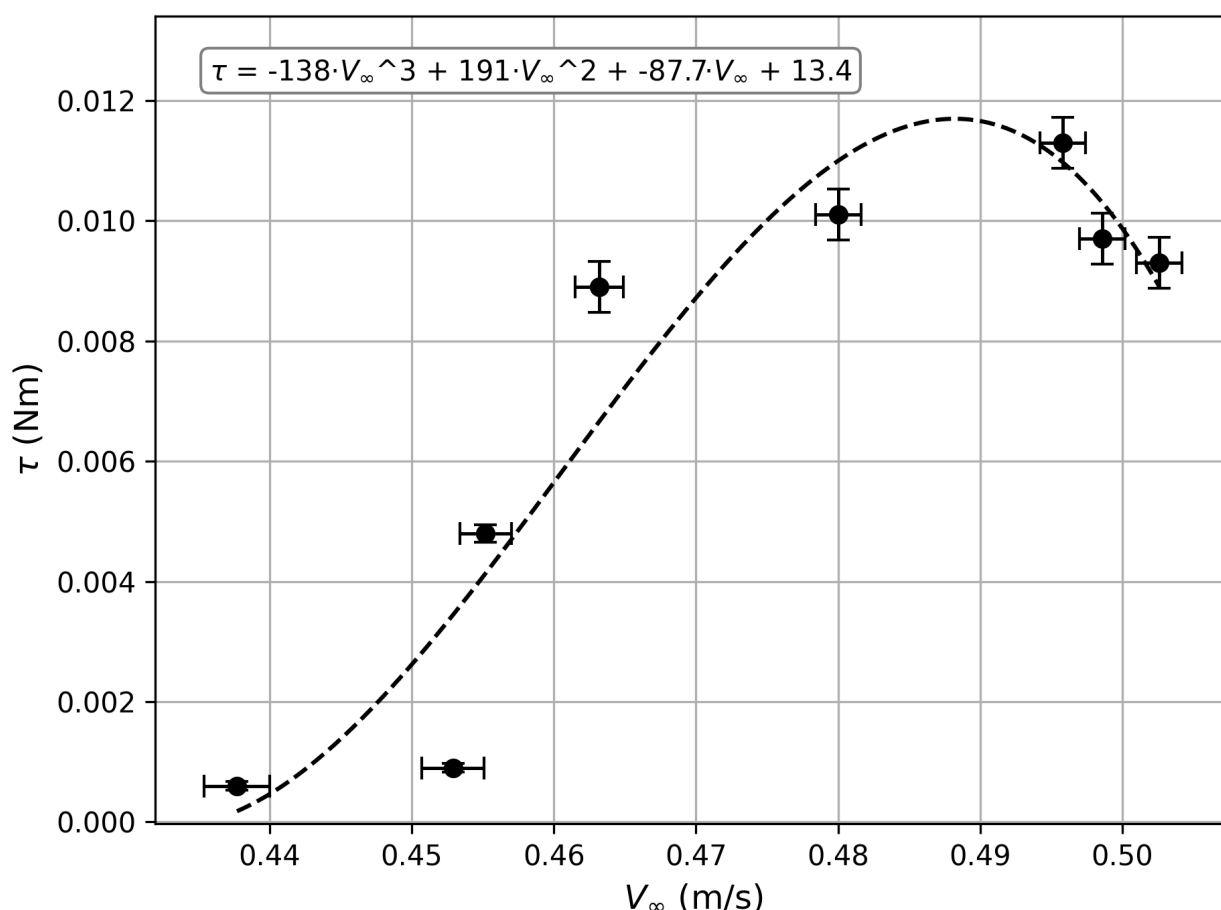


Figura 4.1: Variación del torque promedio con respecto a la velocidad de aproximación del agua.

La figura 4.2 ilustra el comportamiento general del torque promedio con respecto a la velocidad angular promedio del rodete. Se observa una tendencia general creciente del torque con respecto a la velocidad angular. El modelo ajustado describe la evolución del torque en la mayor parte del rango evaluado, aunque en el intervalo de mayores velocidades angulares se aprecia una leve subestimación con respecto a los datos medidos, lo cual podría asociarse a efectos no lineales adicionales. A bajas velocidades, el torque es reducido y presenta mayor dispersión relativa, posiblemente influenciada por pérdidas por fricción, ineficiencias hidráulicas o condiciones transitorias del sistema.

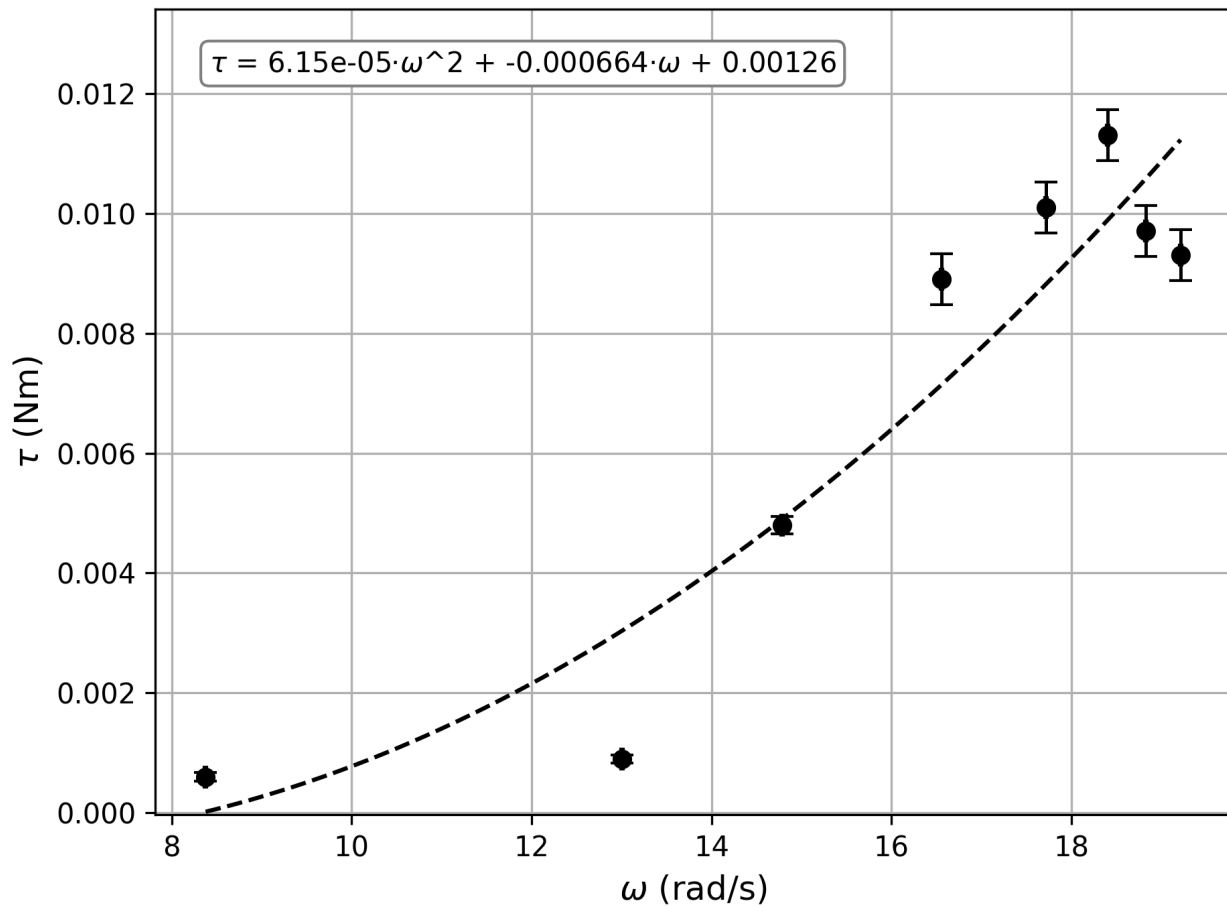


Figura 4.2: Variación del torque promedio con respecto a la velocidad angular promedio del rodete.

La Figura 4.3 exhibe la relación entre la potencia total generada (P_g) en W y la velocidad de aproximación del agua (V_∞) en metros por segundo. La potencia es mínima a bajas velocidades de flujo (0,4377 a 0,4529 m/s), aumenta significativamente hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 0,4234 W a 0,4958 m/s, para luego disminuir a valores inferiores (0,35 - 0,4 W) en velocidades de flujo superiores.

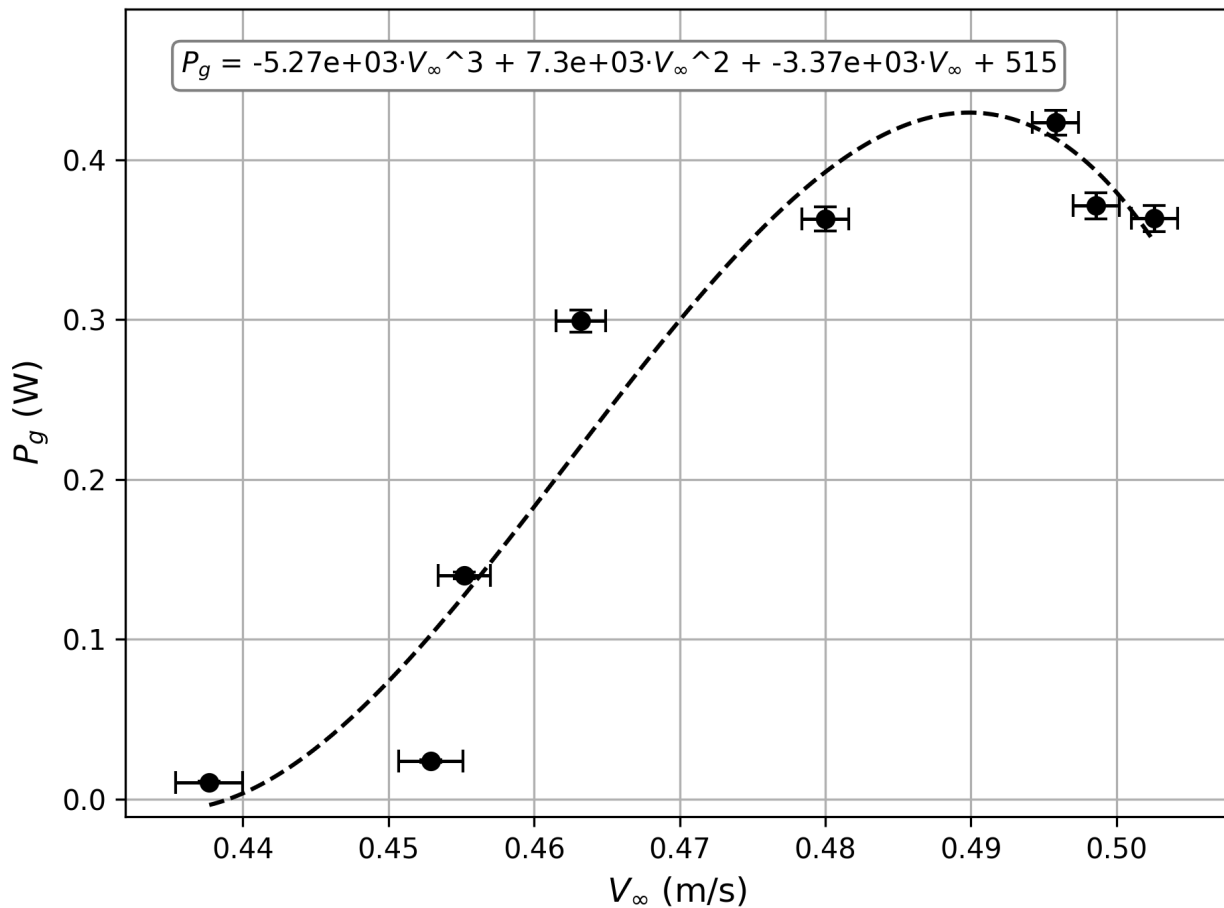


Figura 4.3: Variación de la potencia con respecto a la de aproximación del agua.

La Figura 4.4 indica la relación entre la potencia total generada (P_g) en Watts (W) y la velocidad angular promedio (ω) en radianes por segundo. Se nota una relación no lineal entre P_g y ω . La potencia muestra un crecimiento con el incremento de la velocidad angular, lo cual concuerda con el comportamiento típico de sistemas donde la generación de potencia depende de fenómenos no lineales asociados al flujo y al acoplamiento mecánico. El modelo de ajuste captura parcialmente la tendencia en la mayoría del rango considerado, aunque se evidencia una leve sobreestimación en los mayores valores de ω , lo cual podría atribuirse a saturaciones del sistema, pérdidas internas o limitaciones en la transferencia de potencia. En el rango bajo de velocidades, la potencia generada es mínima y presenta una mayor variabilidad relativa, posiblemente por ineficiencias iniciales, fricción o por operar en un régimen poco eficiente del dispositivo.

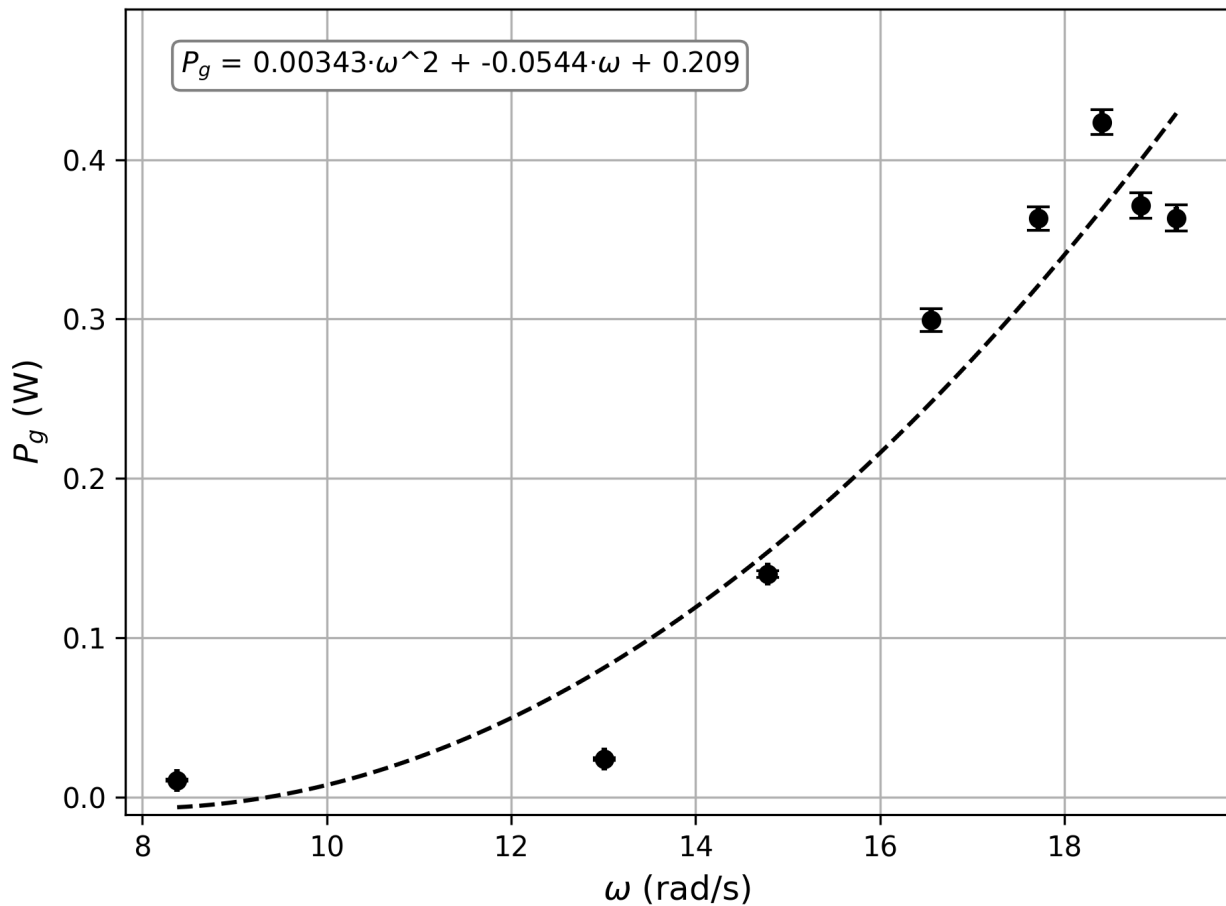


Figura 4.4: Variación de la potencia total generada con respecto a la velocidad angular promedio del rodete.

La Figura 4.5 presenta la eficiencia mecánica (η) en porcentaje en función de la velocidad de aproximación del agua (V_∞) en metros por segundo. Se observa que la eficiencia es muy baja, para las primeras velocidades de flujo (0,4377 a 0,4529 m/s). A medida que la velocidad del flujo aumenta desde 0,4529 m/s, la eficiencia experimenta un incremento significativo y rápido, alcanzando un valor máximo de alrededor de 35.7% a una velocidad de flujo aproximada de 0,4958 m/s. Este punto se observa la máxima eficiencia alcanzada por el dispositivo en el rango estudiado. Posteriormente, al superar los 0,4958 m/s, la eficiencia tiende a disminuir.

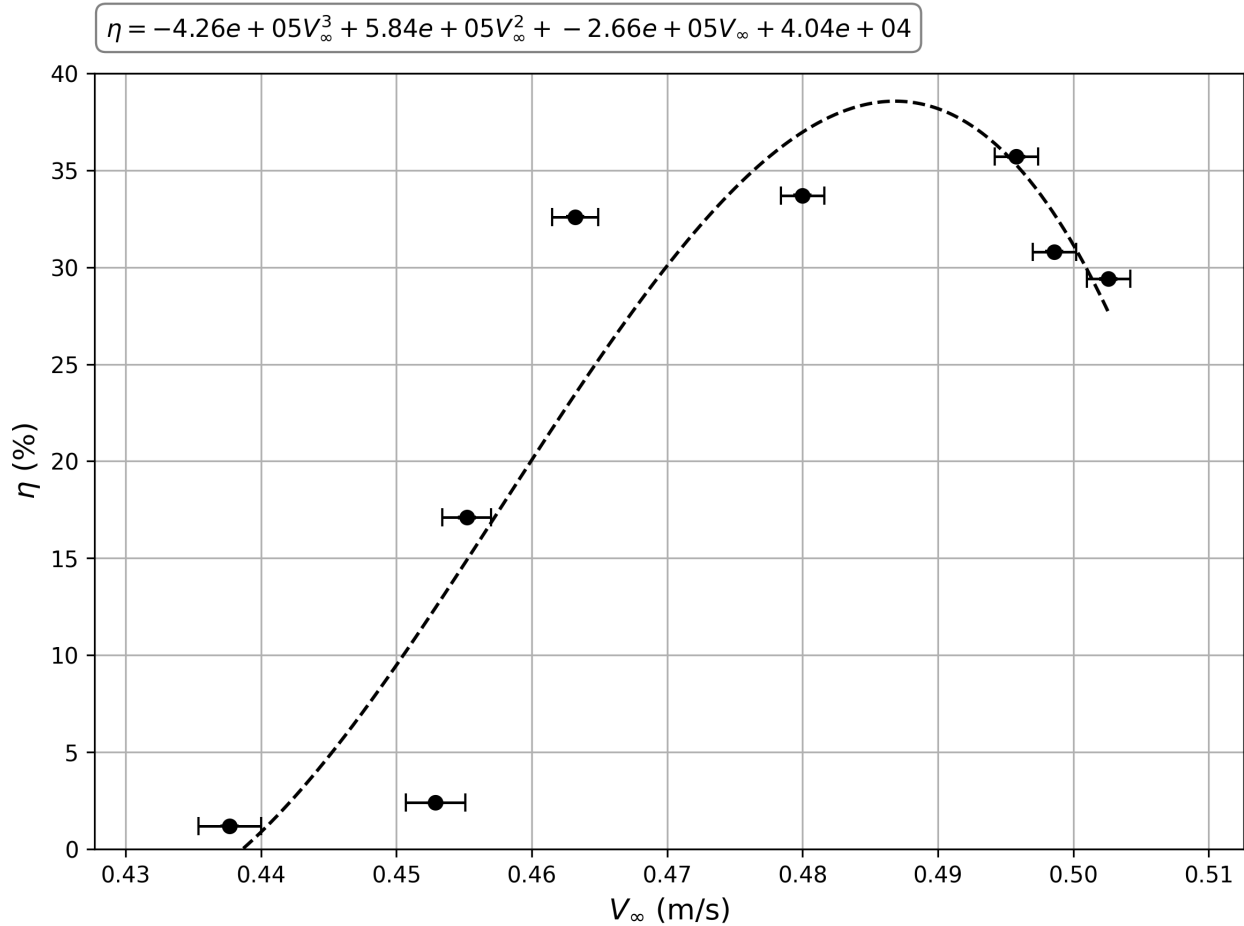


Figura 4.5: Variación de la eficiencia mecánica con respecto a la velocidad de aproximación del agua.

En la Figura 4.6 muestra el comportamiento de la eficiencia η (%) del sistema en función de la velocidad angular ω en radianes por segundo. A medida que aumenta la velocidad angular, la eficiencia incrementa hasta alcanzar un máximo relativo, tras lo cual se evidencia una ligera disminución en los últimos puntos, posiblemente atribuida a un régimen de saturación o a pérdidas dinámicas más significativas a altas velocidades. El ajuste se aproxima adecuadamente al comportamiento en el rango medio, aunque tiende a sobreestimar la eficiencia en los valores más altos de ω . En la zona de bajas velocidades, la eficiencia es reducida, lo cual es común en sistemas donde las pérdidas por fricción, ineficiencias de los componentes mecánicos o bajo acoplamiento hidráulico limitan la conversión efectiva de energía. Si bien el ajuste cuadrático permite identificar de manera general la evolución del rendimiento del sistema, su interpretación debe ser tomada con precaución, ya que no necesariamente representa un modelo físico integral del proceso. No obstante, resulta útil para evidenciar la existencia de un régimen óptimo de operación en términos de eficiencia.

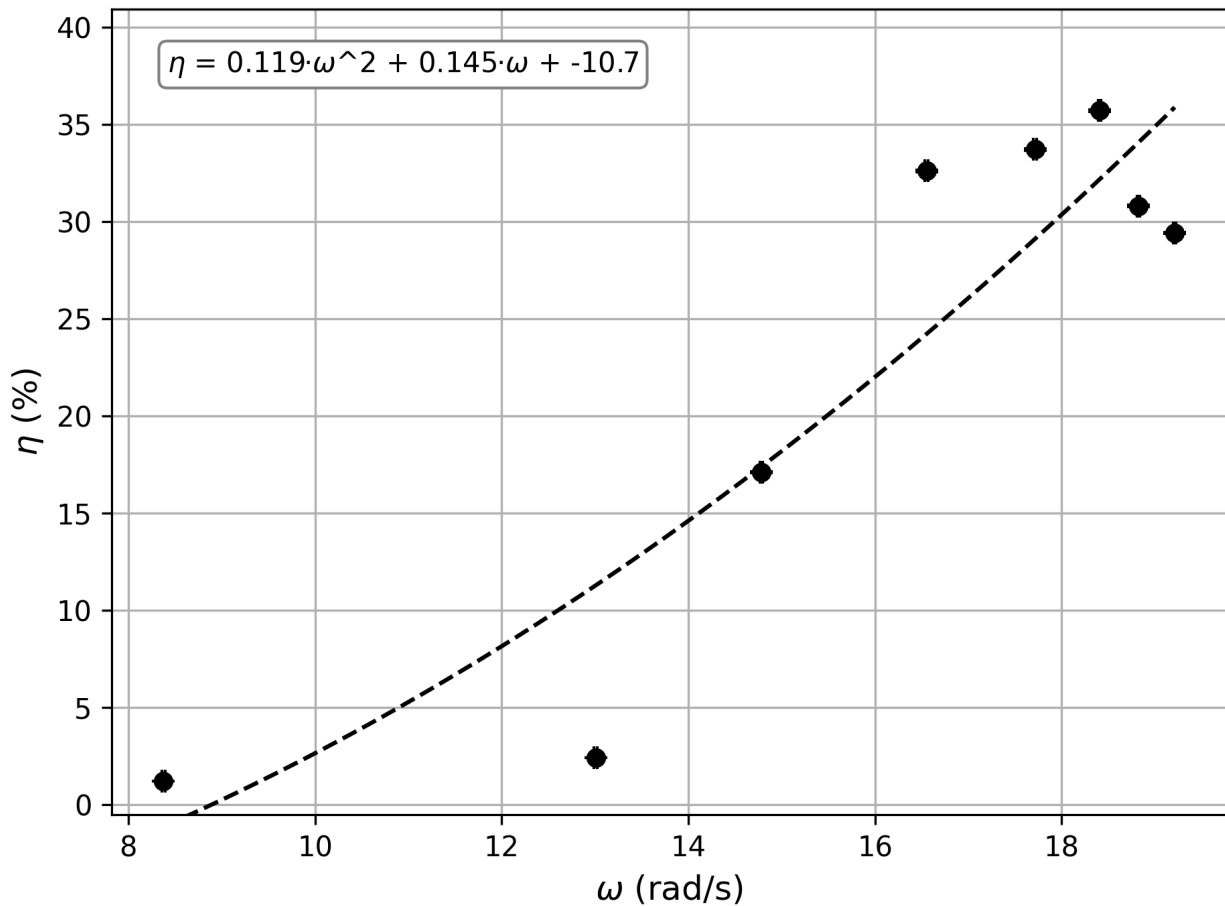


Figura 4.6: Variación de la eficiencia mecánica con respecto a la velocidad angular del rodete.

La Figura 4.7 describe la variación del coeficiente de potencia promedio (C_p) en función del coeficiente de velocidad de punta promedio (λ). Se observa que el C_p es muy bajo para valores de λ en el rango de 1,0 a 1,57, indicando un bajo aprovechamiento energético en ese intervalo. A partir de $\lambda \approx 1,57$, el coeficiente de potencia comienza a incrementarse de forma pronunciada, lo cual sugiere una mejora significativa en la conversión de energía. Este aumento continúa hasta alcanzar un valor máximo de $C_p = 0,3567$ en $\lambda = 2,0787$, lo que representa un régimen óptimo de operación. Posteriormente, se observa una disminución del C_p para valores mayores de $\lambda \approx 2,0787$, lo cual puede atribuirse a pérdidas hidráulicas asociadas a una sobre revolución del rodete o atascamiento. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se reconoce la existencia de un punto óptimo de operación para turbomáquinas, más allá del cual el rendimiento decae. Si bien el ajuste cuadrático describe de manera general el comportamiento observado, tiende a sobreestimar ligeramente los valores en la región de máximos, por lo que su uso debe considerarse como una aproximación descriptiva más que predictiva.

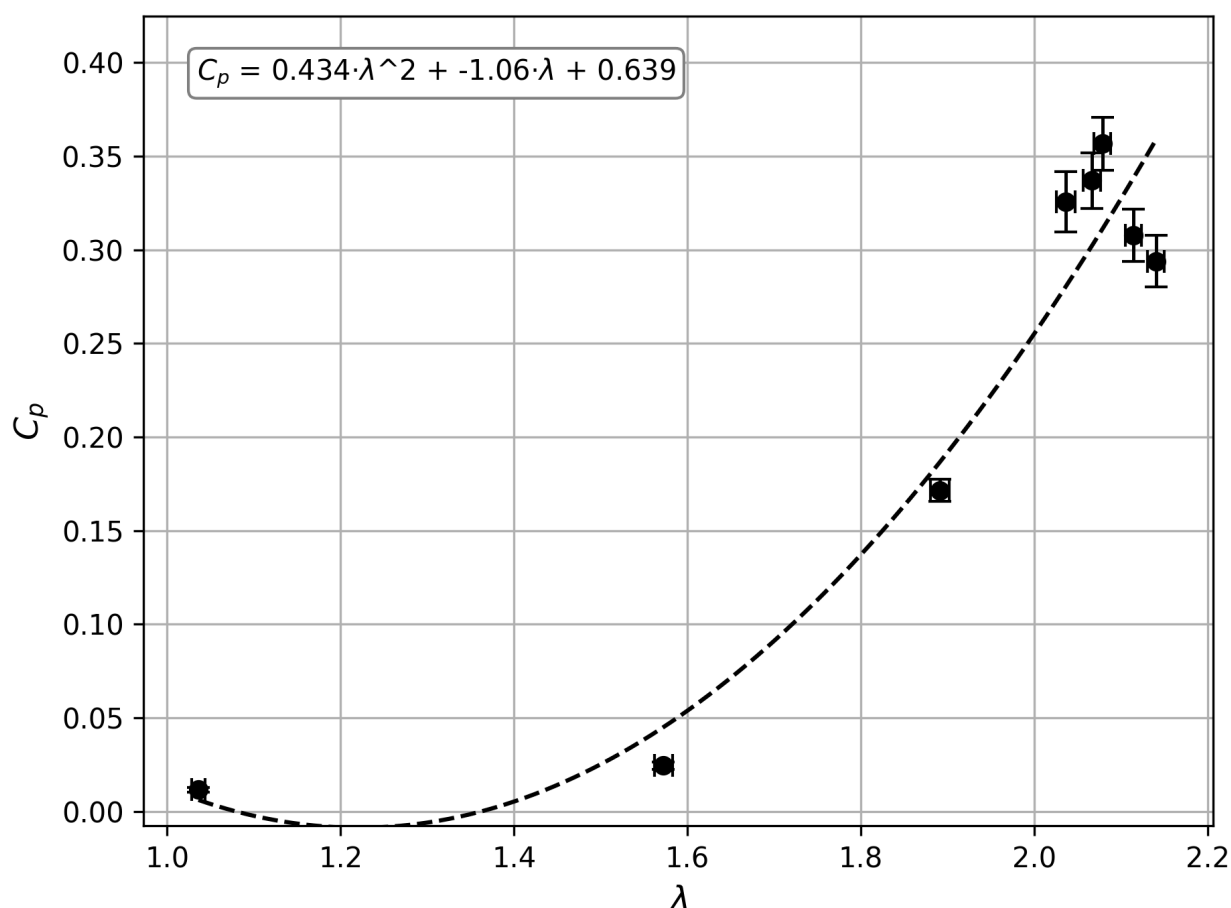


Figura 4.7: Variación del coeficiente de potencia promedio con respecto al coeficiente de velocidad de punta promedio.

La Figura 4.8 presenta la variación del coeficiente de torque promedio (C_T) en función del coeficiente de velocidad de punta promedio (λ). Se observa que para valores bajos de λ , específicamente entre 1,0 y 1,57, los valores de C_T se mantienen reducidos, lo que indica una baja capacidad de generar torque útil en ese rango operativo. A partir de $\lambda \approx 1,57$, el coeficiente de torque comienza a aumentar de manera notable, alcanzando valores cercanos a 0,1 en el intervalo de λ entre 2,0 y 2,15. El ajuste cuadrático propuesto permite modelar adecuadamente la tendencia general, aunque se advierte una ligera sobreestimación para los valores más altos de λ , donde los datos experimentales tienden a estabilizarse o presentar ligera dispersión. La forma de la curva refleja la dependencia del torque con respecto al régimen dinámico del sistema, mostrando que un mayor acoplamiento entre la velocidad del rodete y la del flujo resulta en una mayor capacidad de extracción de energía. Aunque el modelo no tiene un fundamento físico riguroso, ofrece una herramienta descriptiva útil para identificar tendencias generales en el comportamiento del sistema.

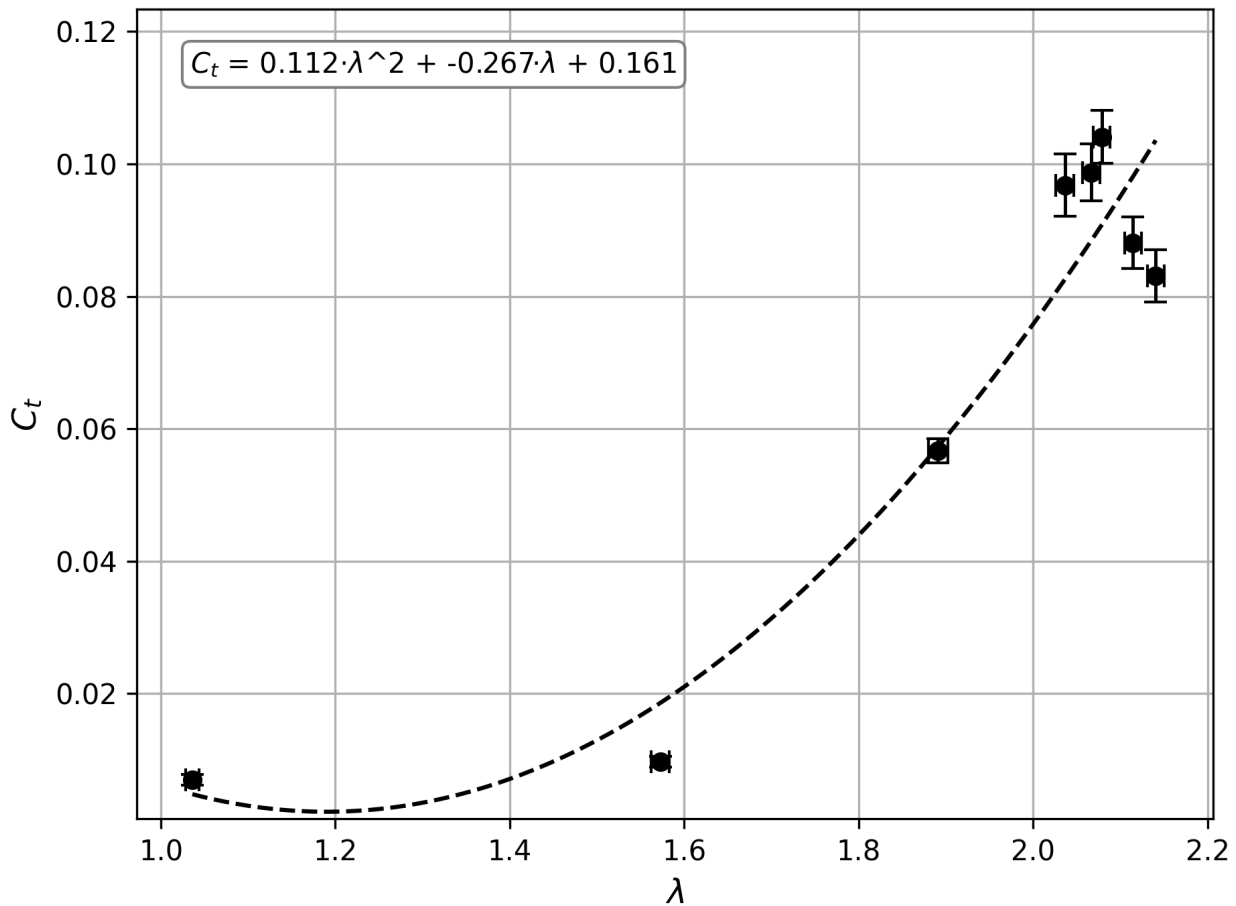


Figura 4.8: Variación del coeficiente de torque con respecto al coeficiente de velocidad de punta.

4.1. Discusión

Al analizar los resultados, se observó que el dispositivo tiene un comportamiento particular en distintos regímenes de operación. Se identifican condiciones más favorables para la extracción de energía y otras donde no favorece a la eficiencia general del sistema. Las pruebas realizadas proporcionan indicaciones claras sobre la funcionalidad del dispositivo y la capacidad de su rodete para transformar en energía cinética del flujo. Por lo cual, esto establece punto de partida para la discusión de futuras mejoras y la aplicación del dispositivo para proyectos de generación de energía.

El coeficiente de potencia (C_p) promedio de $0,3567 \pm 0,06$ logrado por el dispositivo de doble rodete, es un valor significativo que se enmarca dentro de los límites y rangos característicos establecidos en la literatura referente a turbinas de palas rectas y helicoidales. Es importante destacar que el sistema funciona integrado a un hidrogenerador de vórtices verticales (GWVG). Se recalca que este es el valor promedio del C_p , aunque uno de los rodetes alcanzó un C_p ligeramente superior.

En el contexto de la literatura sobre turbinas de flujo axial y helicoidal, es relevante mencionar los trabajos de Kirke y Marsh, quienes, según [Reddy et al., 2022], reportaron que la potencia y la helicidad eran inversamente proporcionales en sus experimentos con turbinas de palas rectas (SDHT), alcanzando un C_p máximo de 0,258. Aun cuando las condiciones experimentales y las escalas de los sistemas evaluados previamente no son idénticas a las de este estudio, la existencia de dichos hallazgos proporciona una base conceptual para la via-

bilidad del diseño específico de los rodets del dispositivo, especialmente a las modificaciones realizadas sobre el concepto de Gorlov y su interacción con el sistema GWVG. Por otro lado, este C_p es coherente con la idea general de que las turbinas helicoidales pueden ofrecer un rendimiento superior, una premisa respaldada por investigaciones como las de Gorlov, Khanjanpour y Javadi, y Al-Dabbagh y Yuce, también citadas en [Reddy et al., 2022]. Este resultado es prometedor porque indica que el diseño de los rodets propuestos, en conjunto con la flexibilidad que proporciona el GWVG y la simetría del dispositivo aprovecha mejor la energía del flujo.

El dispositivo generó una potencia máxima de $0,4264 \pm 0,00782$ W a $18,4045 \pm 0,0210$ rad/s ($175,45 \pm 0,1$ RPM), utilizando un rodete de 11,20 cm de diámetro y 14,1 cm de altura. Este resultado supera los 0,378 W registrados por [Vargas, 2019], lo que indica una mejora en el rendimiento con respecto a trabajos previos con dispositivos similares. Los 0,657 W reportados por [Jayaram and Bavanish, 2022] proveen un punto de referencia en este estudio. No obstante, es fundamental reconocer que su investigación se llevó a cabo con un rodete de dimensiones diferentes (0,6 m de diámetro y 0,6 m de altura) y bajo condiciones experimentales distintas. En este contexto, la capacidad del dispositivo para generar potencia es un indicador de la eficiencia del dispositivo.

Se registró una eficiencia del 35,7 % a $18,4045 \pm 0,0210$ rad/s ($175,45 \pm 0,1$ RPM). Para contextualizar este rendimiento, es acertado mencionar trabajos previos, como el de [Dhaka et al., 2015], que reportó una eficiencia del 27,75 % para un hidrogenerador de tanque cilíndrico. De manera similar, [Vargas, 2019] documentó una eficiencia máxima del 25,75 % con una geometría ligeramente más pequeña, el cual fue conceptualmente pionero para el desarrollo de este dispositivo. Es crucial reconocer que las condiciones de ensayo y las características específicas de los sistemas evaluados difieren de las de este estudio. No obstante, la eficiencia alcanzada por el dispositivo sugiere un buen rendimiento.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

El proyecto ha cumplido satisfactoriamente los objetivos planteados, se logró el dimensionamiento geométrico, la construcción y la validación del dispositivo. El diseño CAD inicial garantizó la adaptación al canal del laboratorio, y la construcción se completó con éxito. Este estudio se enfocó en la exploración de un dispositivo en desarrollo que fue diseñado, construido y validado en el canal experimental de la Universidad del Valle, tomando en consideración los resultados obtenidos se concluye lo siguiente.

- La experimentación validó la funcionalidad del dispositivo.
- Las pruebas experimentales revelaron que la potencia máxima de $0,4234 \pm 0,00782$ W y la eficiencia máxima del $35,7 \% \pm 0,0422 \%$ se obtuvieron consistentemente a una velocidad angular de $18,4045 \pm 0,0210$ rad/s. En esta velocidad angular se alcanza el punto de mayor rendimiento para el dispositivo.
- El rodete propuesto permite extraer energía de la corriente incidente.
- La eficiencia del rodete aumenta significativamente a partir del punto en que la velocidad tangencial del rodete es 1,5 veces mayor a la velocidad de aproximación del flujo. Este incremento continúa progresivamente hasta alcanzar una relación de 2,15 veces la velocidad de aproximación del flujo, lo que define un rango de operación óptimo para maximizar el rendimiento del dispositivo.
- Los valores reportados para este dispositivo supera los reportados por Vargas, S. G.
- A velocidades de aproximación del flujo de agua superior de 0,4958 m/s el dispositivo comenzó a experimentar taponamiento por lo cual la eficiencia comienza a disminuir.
- Las curva de ajuste ofrece una representación válida para describir el comportamiento global del sistema, sin implicar una interpretación física estricta, por lo que su uso debe considerarse como una herramienta descriptiva y no necesariamente predictiva fuera del dominio experimental.
- El sistema presenta un comportamiento coherente entre sus diferentes métricas de desempeño, lo cual permite identificar un régimen de operación eficiente. En particular, el coeficiente de potencia C_P alcanza su valor máximo de 0,3567 a una razón de velocidades $\lambda = 2,0787$. Esta tendencia está respaldada por el comportamiento observado en la eficiencia η , la cual también presenta sus valores más altos en ese mismo

intervalo. De manera similar, tanto la potencia generada P_g como el coeficiente de torque C_t muestran incrementos sostenidos a partir de $\lambda \approx 1,57$, estabilizándose o alcanzando máximos locales cerca de $\lambda = 2,1$. Esta coincidencia entre distintas variables sugiere que el sistema opera con mayor eficiencia energética y capacidad de conversión alrededor de $\lambda \approx 2,08$, el cual puede considerarse como el punto de operación óptimo dentro del rango evaluado. Este hallazgo permite establecer un criterio técnico para futuras estrategias de diseño, regulación o validación experimental, orientadas a maximizar el aprovechamiento del recurso hidráulico.

CAPÍTULO 6

RECOMENDACIONES

Para trabajos futuros se recomienda evaluar el comportamiento de la turbina en diferentes condiciones de operación. Realizar el montaje experimental más robusto para obtener mediciones precisas y una mayor durabilidad, para diversas condiciones de pruebas.

Para maximizar el potencial de diseño sin la necesidad de fabricar múltiples prototipos físicos, se recomienda realizar estudios de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) variando sistemáticamente aspectos geométricos que permitan identificar configuraciones que puedan mejorar la potencia o la eficiencia. Complementando esto, un análisis factorial, ya sean simulado o físico. Esta herramienta estadística permitirá entender no solo el efecto individual de cada variable experimental, sino también cómo interactúan entre sí, lo que es fundamental para optimizar el rendimiento y reducir el número de pruebas necesarias.

APÉNDICE A

DATOS EXPERIMENTALES

A.1. Resultados experimentales

- **Nivel:** Representa la posición de la perilla de la bomba la cual determina la velocidad de impulsión de la bomba. Es una medida indirecta del caudal suministrado.
- **Rpm:** Velocidad de rotación del rodete del, expresada en revoluciones por minuto.
- **Rad/s:** Velocidad angular del rodete, expresada en radianes por segundo.
- **Angulo:** Angulo registrado por el sistema de medición de torque.
- **t [s]:** Tiempo de medición o duración que se demora en llenar el volumen V.
- **V [L]:** Representa el volumen total de agua que ha pasado a través del sistema durante el tiempo de medición 't'.
- **Q [m³/s]:** Caudal volumétrico de descarga del dispositivo, expresado en metros cúbicos por segundo.
- **Q Canal [l/s]:** Caudal del canal medido con el Caudalímetro Doppler DFM 5.0, expresado en litros por segundo.
- **H columna agua [cm]:** Altura de la columna de agua en centímetros. Es medida a 2 cm antes de la entrada del dispositivo.
- **τ [Nm]:** Torque medido en cada rodete expresado en Newton-metro.
- **P[W] :** Potencia mecánica desarrollada por el dispositivo en cada cámara, expresada en Watts.
- **P_{tol} [W] :** Potencia mecánica total desarrollada por el dispositivo, expresada en Watts.
- **v_{∞} [m/s]:** Velocidad aproximación del agua, en metros por segundo.
- **P_{agua} [W]:** Potencia hidráulica disponible en el agua, expresada en Watts.
- **C_p :** Coeficiente de potencia de cada cámara.
- **λ :** Relación de velocidad de punta (Tip Speed Ratio - TSR) de cada cámara.

Cuadro A.2: Datos experimentales del rodete derecho

Nivel	Rpm	Rad/s	Angulo	Q		$\frac{Q}{\text{Canal}}$	H columna agua	τ	P	P_{tol}	v_{∞}	P_{agua}	C_p	λ	$\eta\%$	C_t	
				t [s]	V [L]	$[\text{m}^3/\text{s}]$	[l/s]	[cm]	[Nm]	[Nm]	[w]	[w]					
1	82,00	8,5870	26	7,24	9	0,0012	31,7	20	0,0008	0,0064	0,0105	0,4529	0,4522	0,0142	1,0619	1,16%	0,0085
2	127,91	13,3947	32	2,43	4	0,0016	34,855	21,5	0,0009	0,0119	0,0237	0,4632	0,4839	0,0245	1,6194	2,45%	0,0097
3	146,00	15,2891	37,5	2,52	4,3	0,0017	37,531	24,5	0,0047	0,0678	0,1400	0,4377	0,4083	0,1662	1,9562	17,14%	0,0550
5	162,70	17,0379	28	2,25	3,75	0,0017	43,811	27,5	0,0085	0,1471	0,2992	0,4552	0,4592	0,3202	2,0961	32,58%	0,0923
7	173,53	18,1720	31	2,44	4,28	0,0018	49,9	29,7	0,0093	0,1721	0,3630	0,4800	0,5387	0,3195	2,1199	33,70%	0,0911
8	182,60	19,1218	35	2,18	4,18	0,0019	53,5	30,83	0,0103	0,2017	0,4234	0,4958	0,5935	0,3398	2,1598	35,67%	0,0951
9	185,75	19,4517	31	2,25	4,65	0,0021	55,543	31,83	0,0093	0,1842	0,3713	0,4986	0,6035	0,3052	2,1848	30,77%	0,0844
10	190,70	19,9701	30	3,53	6,41	0,0018	56,29	32	0,0090	0,1836	0,3634	0,5026	0,6182	0,2970	2,2251	29,39%	0,0807

- $\eta\%$: Eficiencia total del dispositivo, expresado en porcentaje.
- C_t : Coeficiente de torque de cada cámara.

Cuadro A.1: Datos experimentales del rodete izquierdo

Nivel	Rpm	Rad/s	Angulo	Q t [s]	V [L]	Q [m³/s]	Q Canal [l/s]	H columna agua [cm]	τ [Nm]	P [W]	P _{tot} [W]	v _∞ [m/s]	P _{agua} [W]	C _p	λ	η %	C _t
1	78,00	8,1681	16	9,65	8	0,0008	31,7	20	0,0005	0,0041	0,0105	0,4529	0,4522	0,0090	1,0101	1,16 %	0,0054
2	120,50	12,6187	31	2,68	5,06	0,0019	34,855	21,5	0,0009	0,0118	0,0237	0,4632	0,4839	0,0244	1,5256	2,45 %	0,0097
3	136,30	14,2733	65	2,55	5,33	0,0021	37,531	24,5	0,0050	0,0721	0,1400	0,4377	0,4083	0,1766	1,8262	17,14 %	0,0585
5	153,43	16,0672	31	2,43	4,28	0,0018	43,811	27,5	0,0093	0,1521	0,2992	0,4552	0,4592	0,3313	1,9767	32,58 %	0,1013
7	164,80	17,2578	37	2,05	4,04	0,0020	49,9	29,7	0,0108	0,1910	0,3630	0,4800	0,5387	0,3545	2,0133	33,70 %	0,1064
8	168,90	17,6872	43	2,18	4,15	0,0019	53,5	30,83	0,0123	0,2218	0,4234	0,4958	0,5935	0,3737	1,9977	35,67 %	0,1131
9	173,80	18,2003	34	2,07	4,11	0,0020	55,543	31,83	0,0101	0,1871	0,3713	0,4986	0,6035	0,3101	2,0443	30,77 %	0,0917
10	176,23	18,4548	32	3,19	5,74	0,0018	56,29	32	0,0095	0,1798	0,3634	0,5026	0,6182	0,2909	2,0563	29,39 %	0,0855

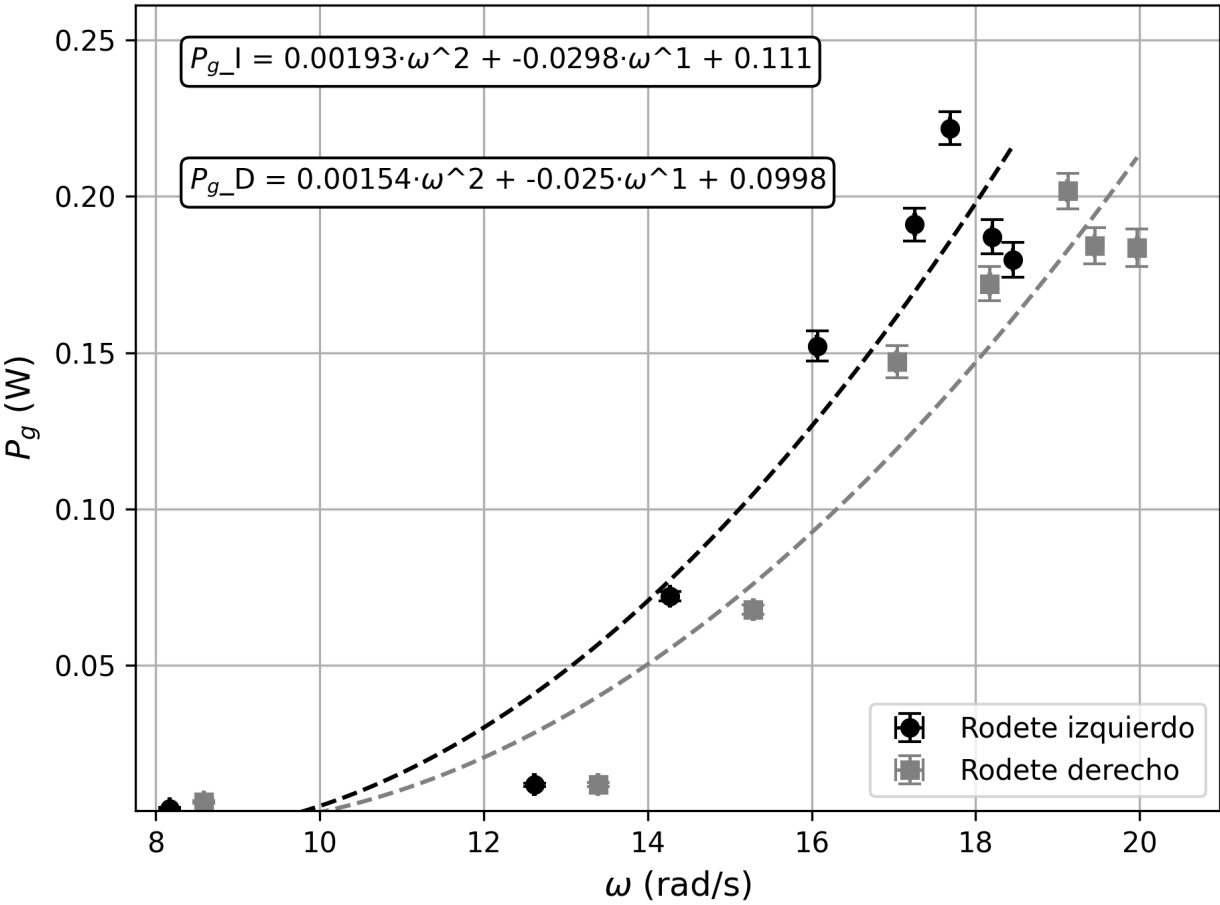


Figura A.1: Variación de la potencia con respecto a la velocidad angular del rodete.

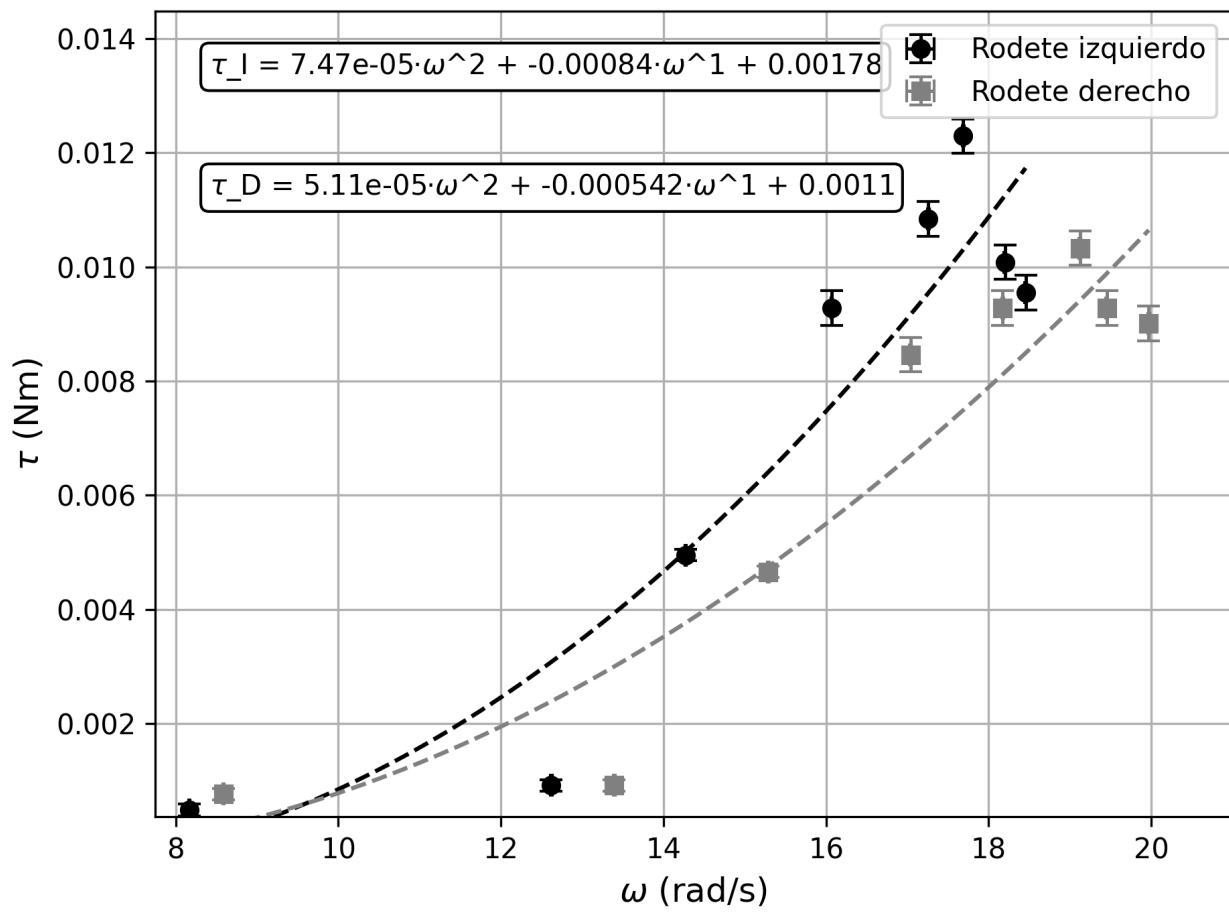


Figura A.2: Variación del torque con respecto a la velocidad angular del rodete.

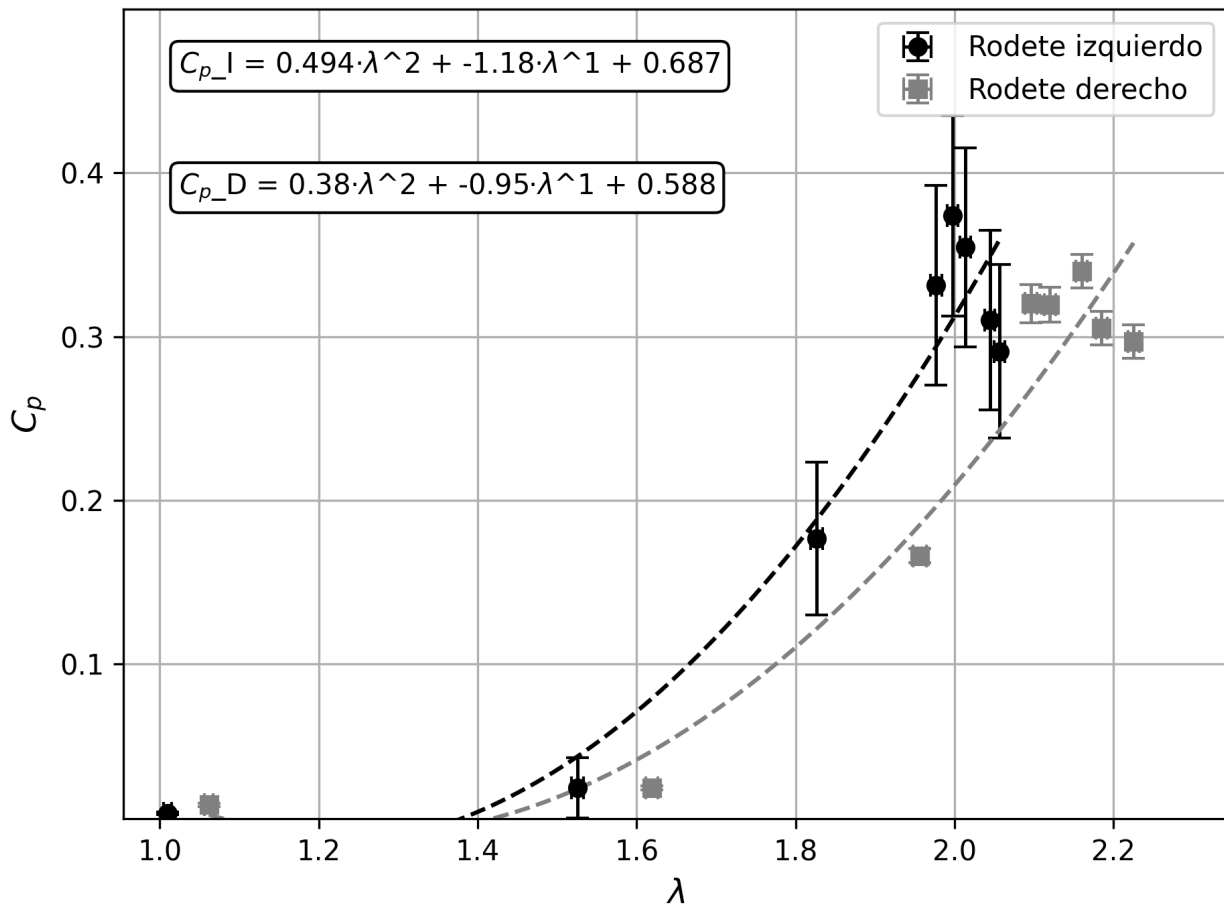


Figura A.3: Variación del coeficiente de potencia con respecto al coeficiente de velocidad de punta.

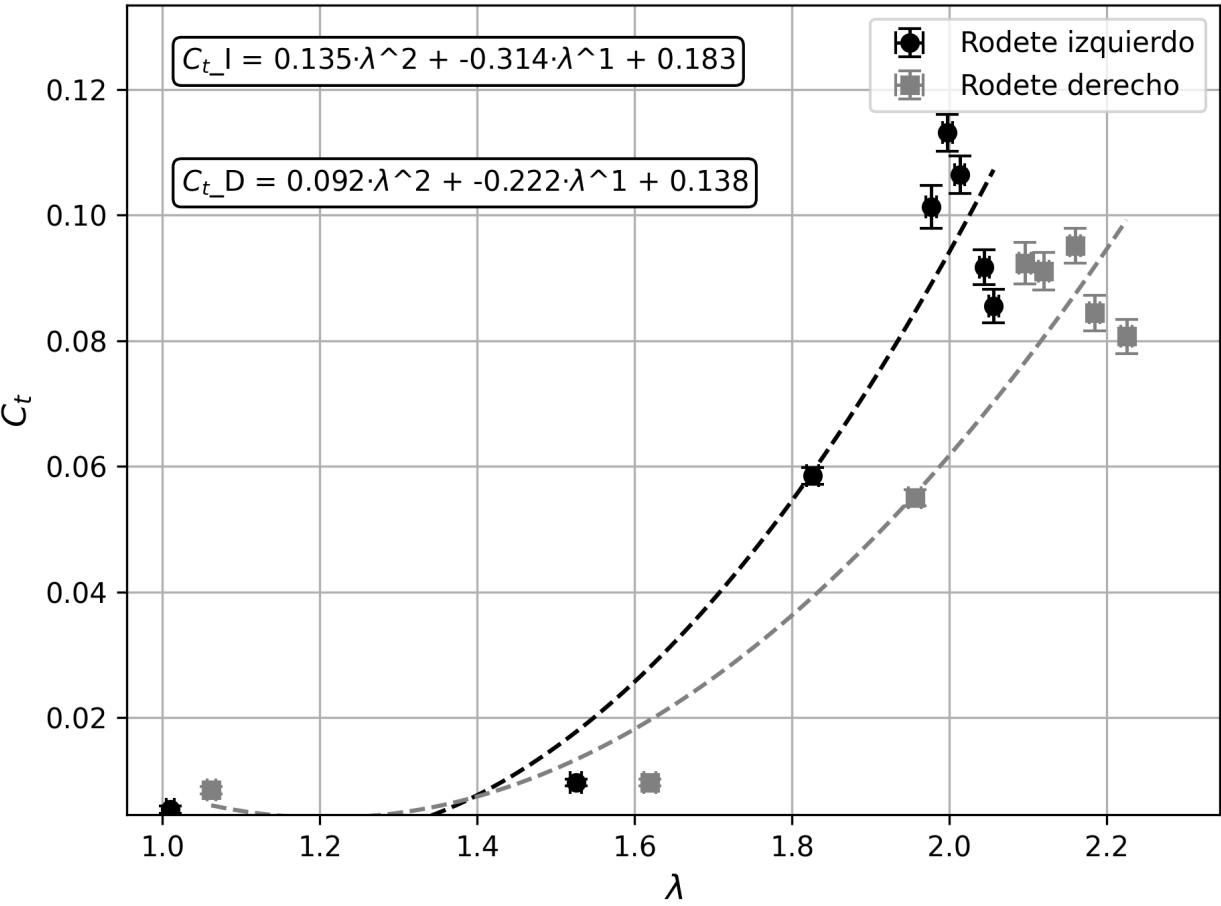


Figura A.4: Variación del coeficiente de torque con respecto al coeficiente de velocidad de punta.

A.2. Grupos Pi

Cuadro A.3: Grupos Pi Geométricos

Grupo	Valor
π_6	0,22
π_7	0,35
π_8	1,3
π_9	1,3
π_{10}	1,1
π_{11}	0,45
π_{12}	0,55
π_{13}	0,45
π_{15}	0,45
π_{16}	0,54
π_{17}	3,0
π_{18}	15

Cuadro A.4: Relación de la altura columna de agua con respecto al diámetro máximo del rodete

Altura columna de agua (A_a)	π_{14}
20	0,56
21,5	0,52
24,5	0,46
27,5	0,41
29,7	0,38
30,83	0,36
31,83	0,35
32	0,35

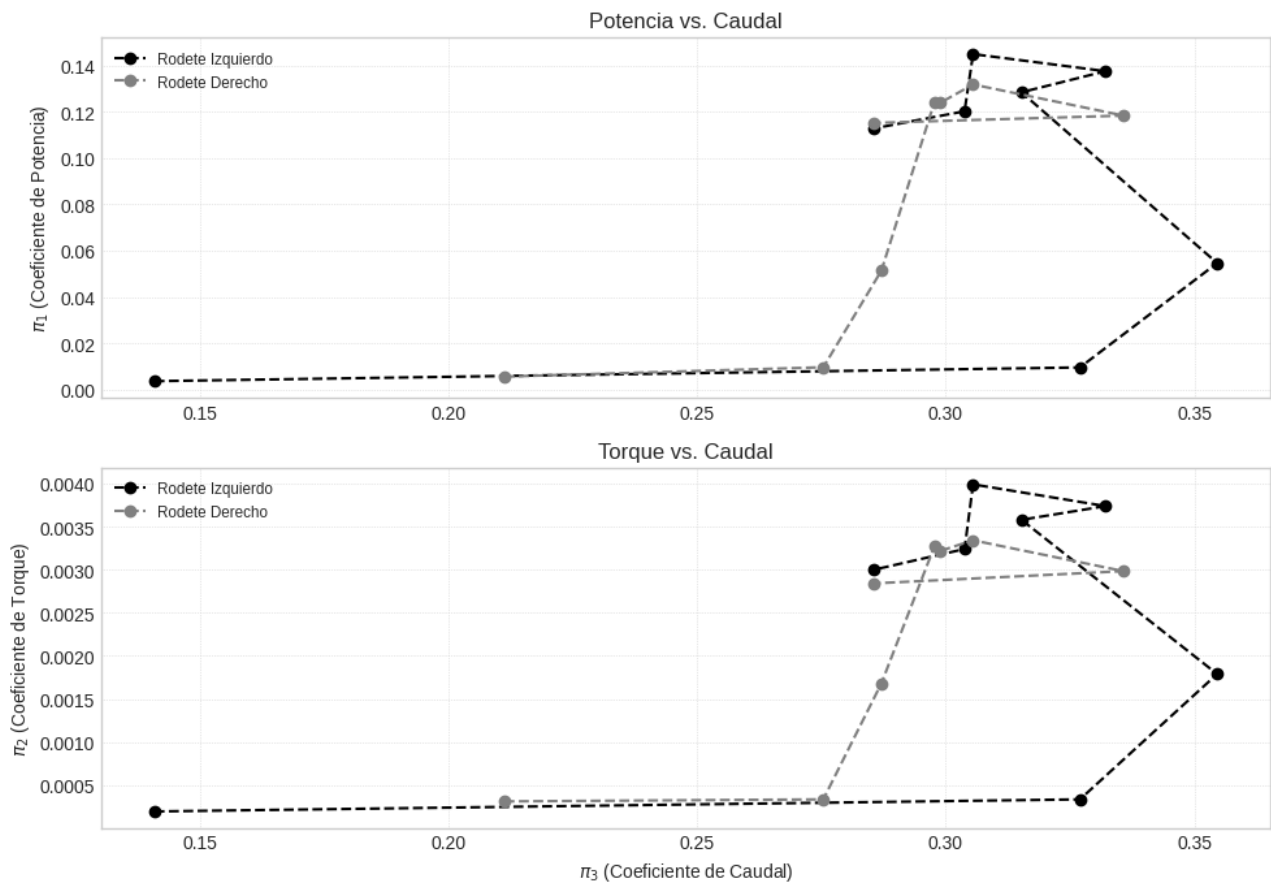
Rendimiento en función del Coeficiente de Caudal (π_3)

Figura A.5

Rendimiento en función del Parámetro de Velocidad Angular (π_5)

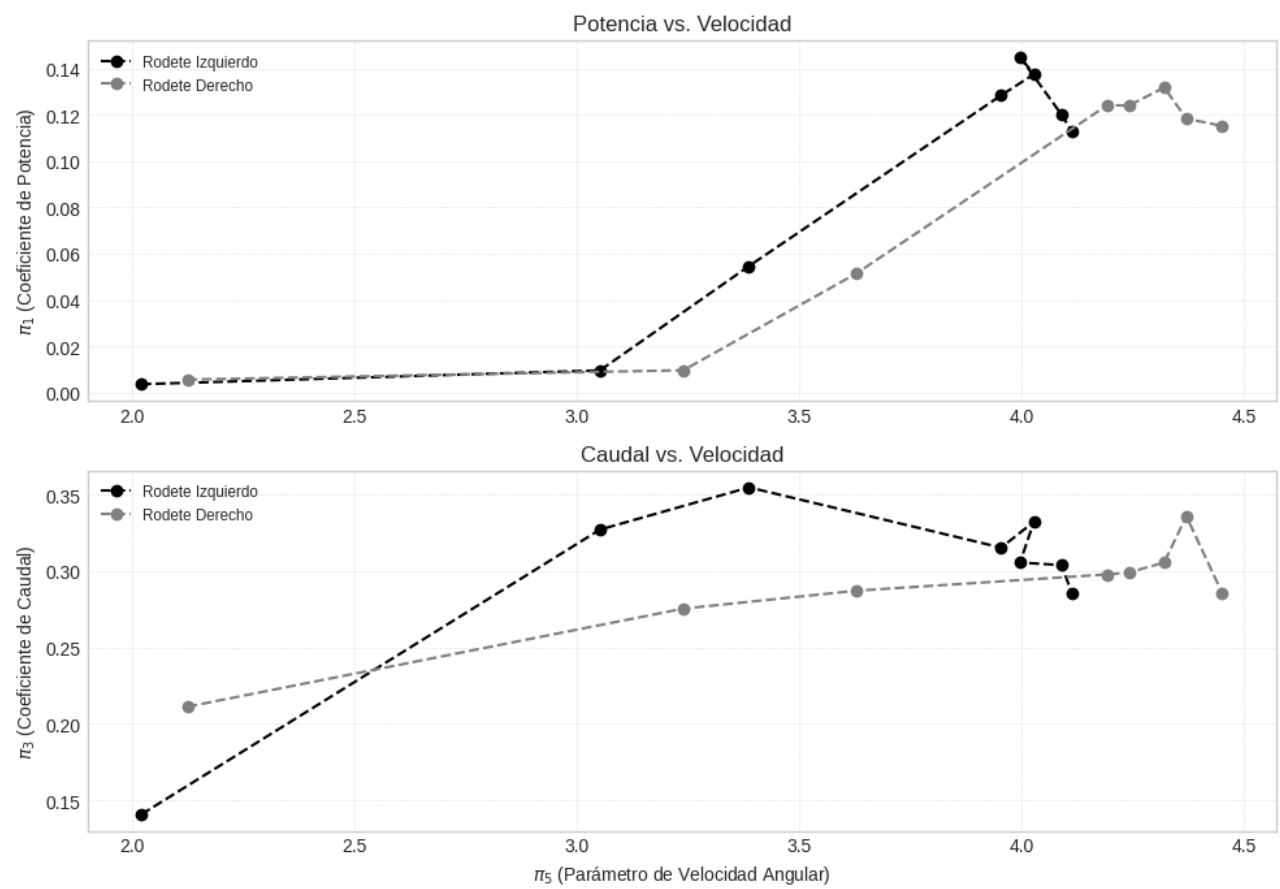


Figura A.6

Rendimiento en función del Número de Reynolds (Re)

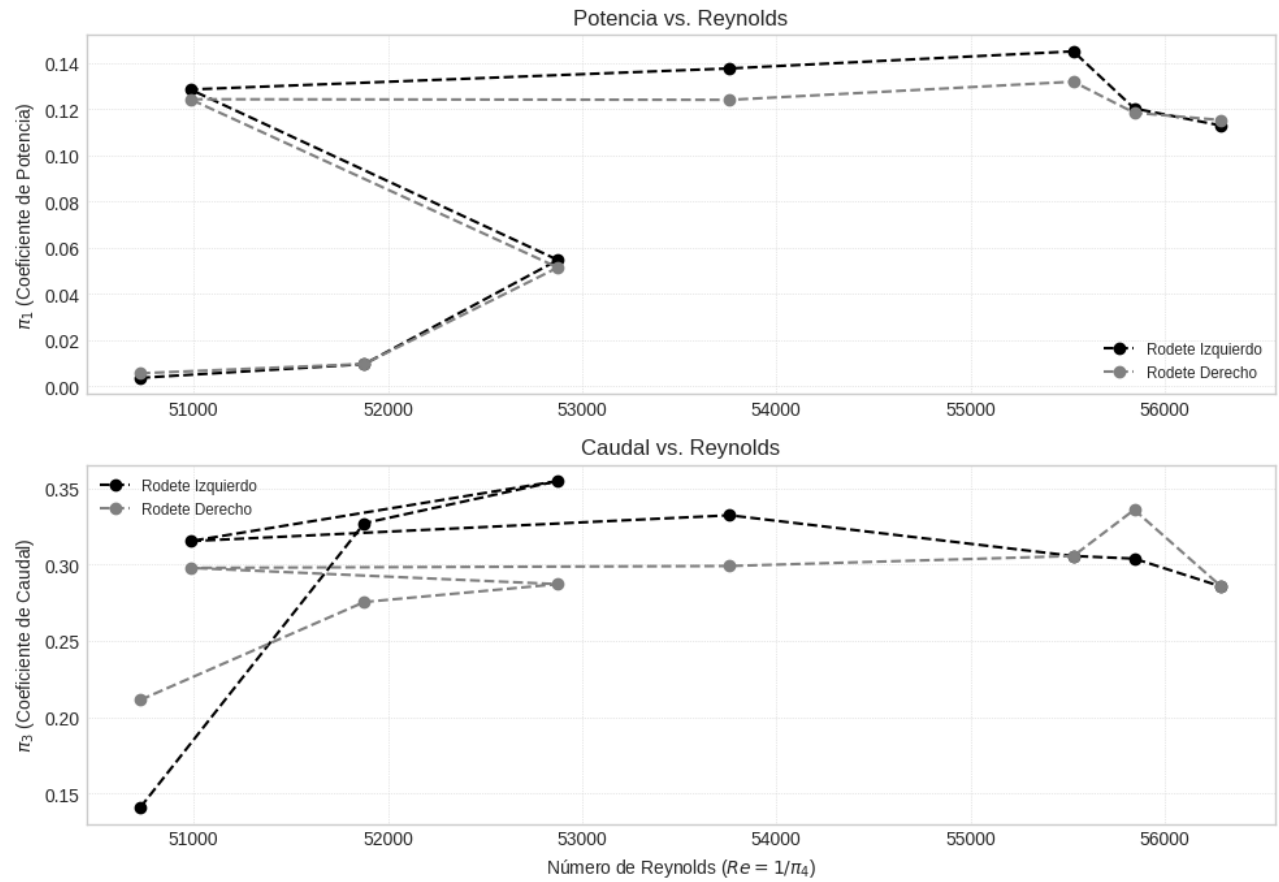


Figura A.7

APÉNDICE B

PLANOS

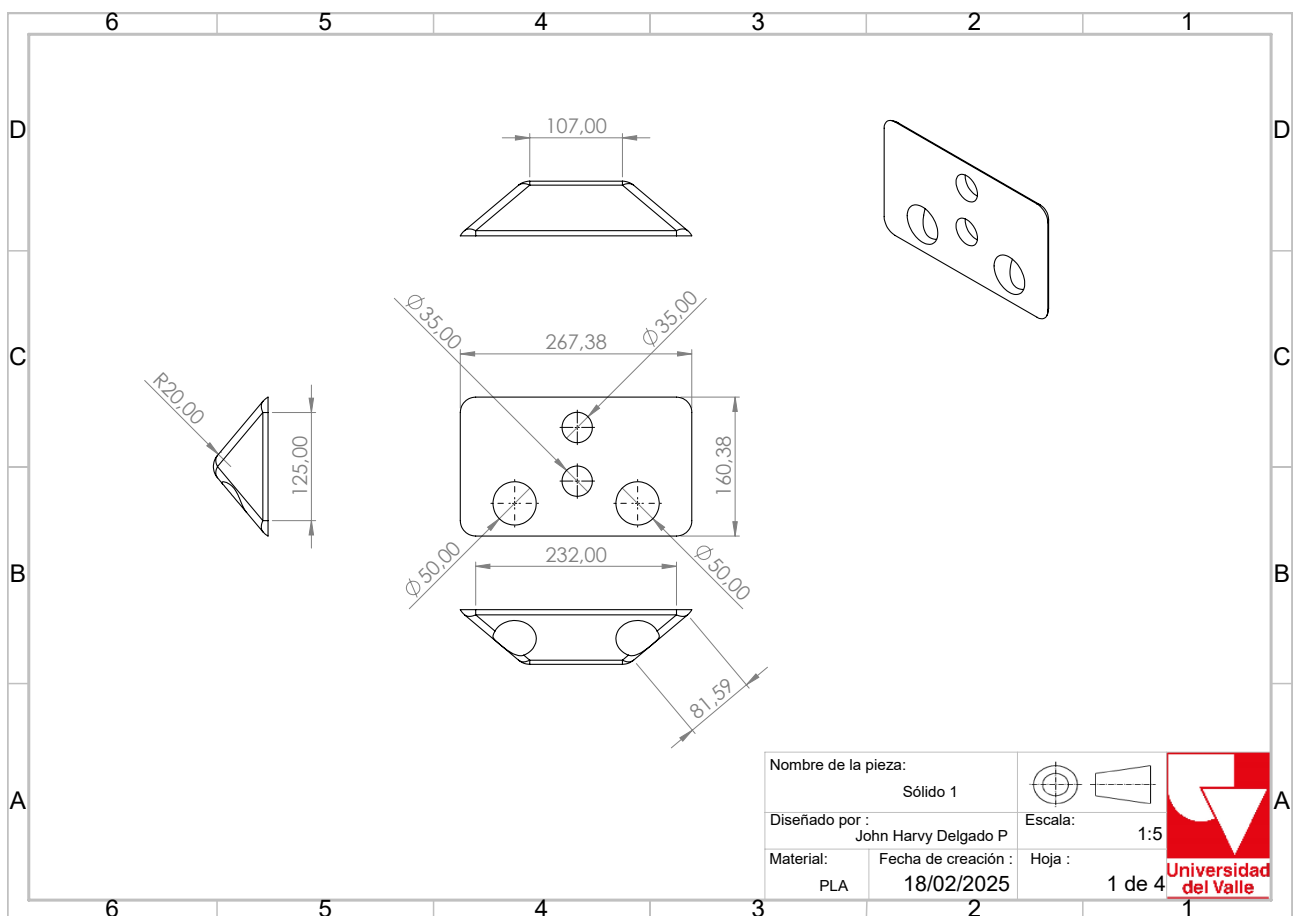


Figura B.1: Plano del Sólido 1.

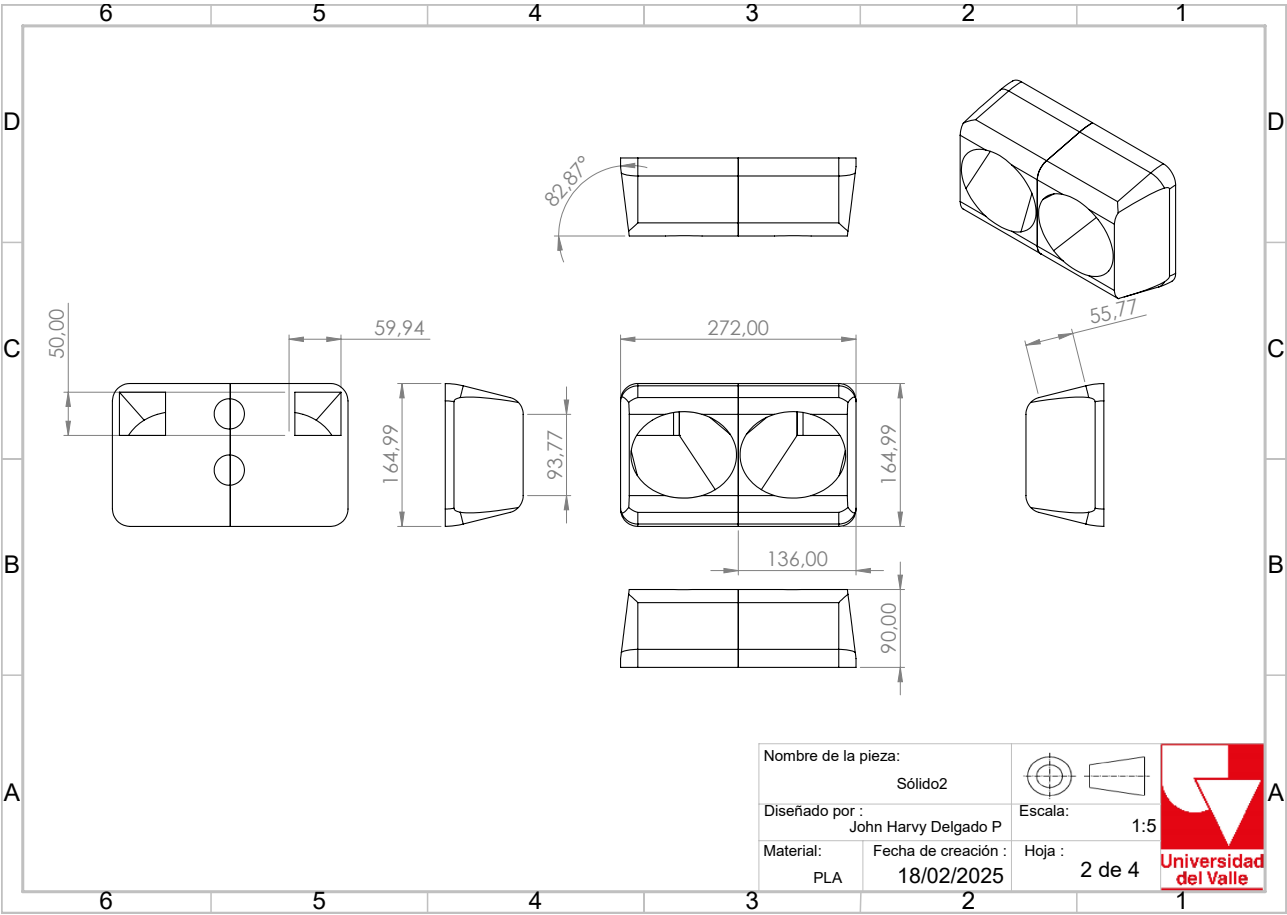


Figura B.2: Plano del Sólido 2.

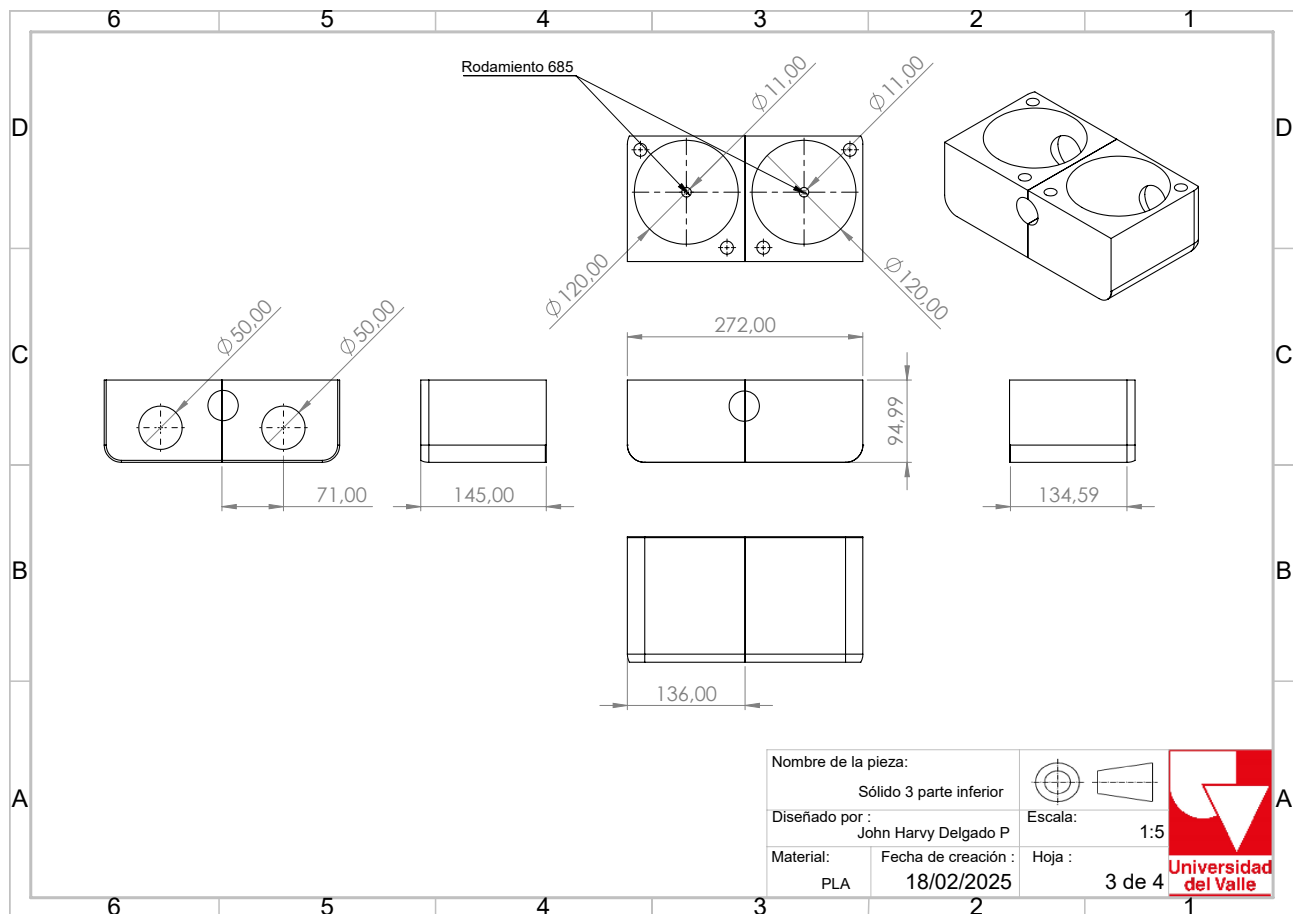


Figura B.3: Plano del Sólido 3 inferior.

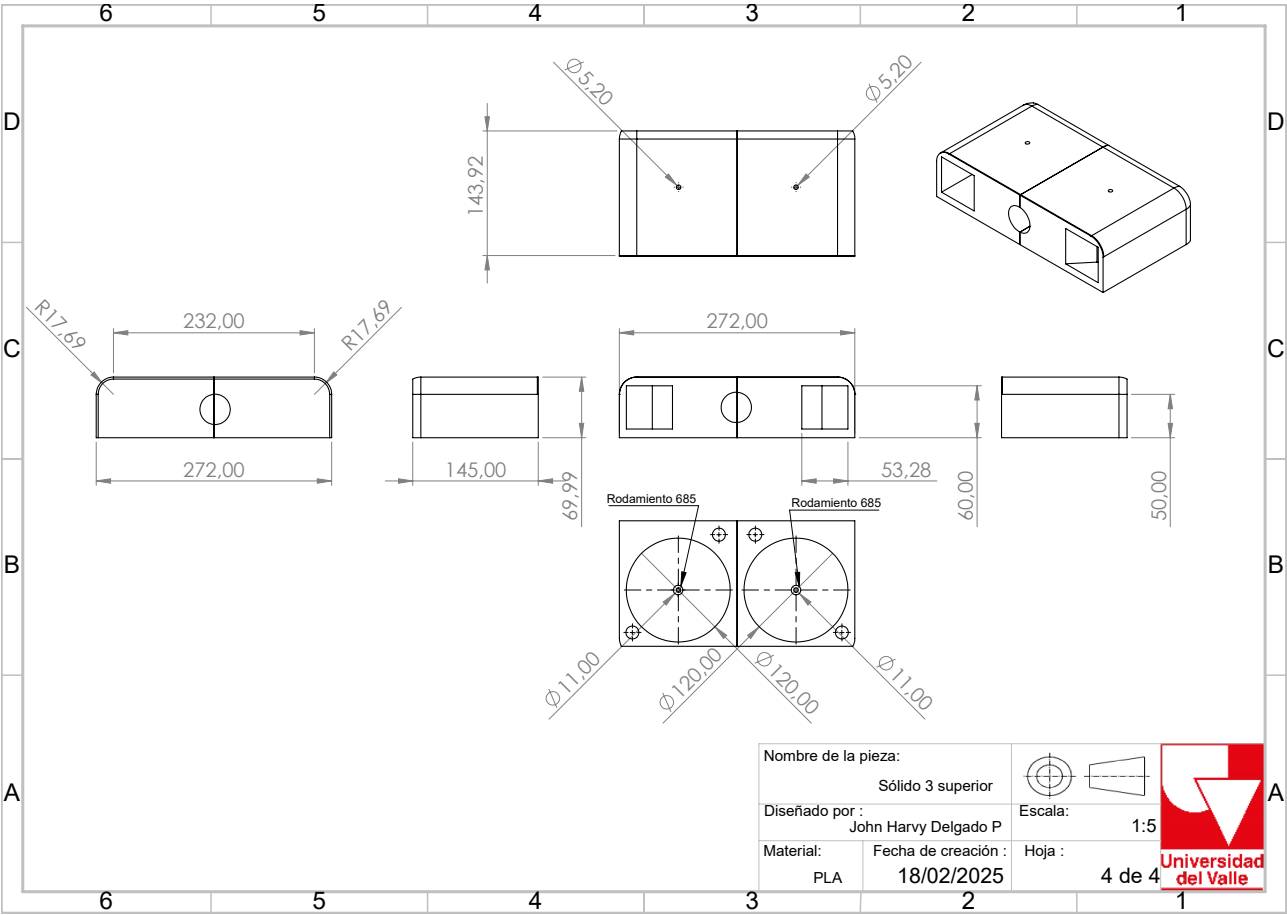


Figura B.4: Plano del Sólido 3 superior.

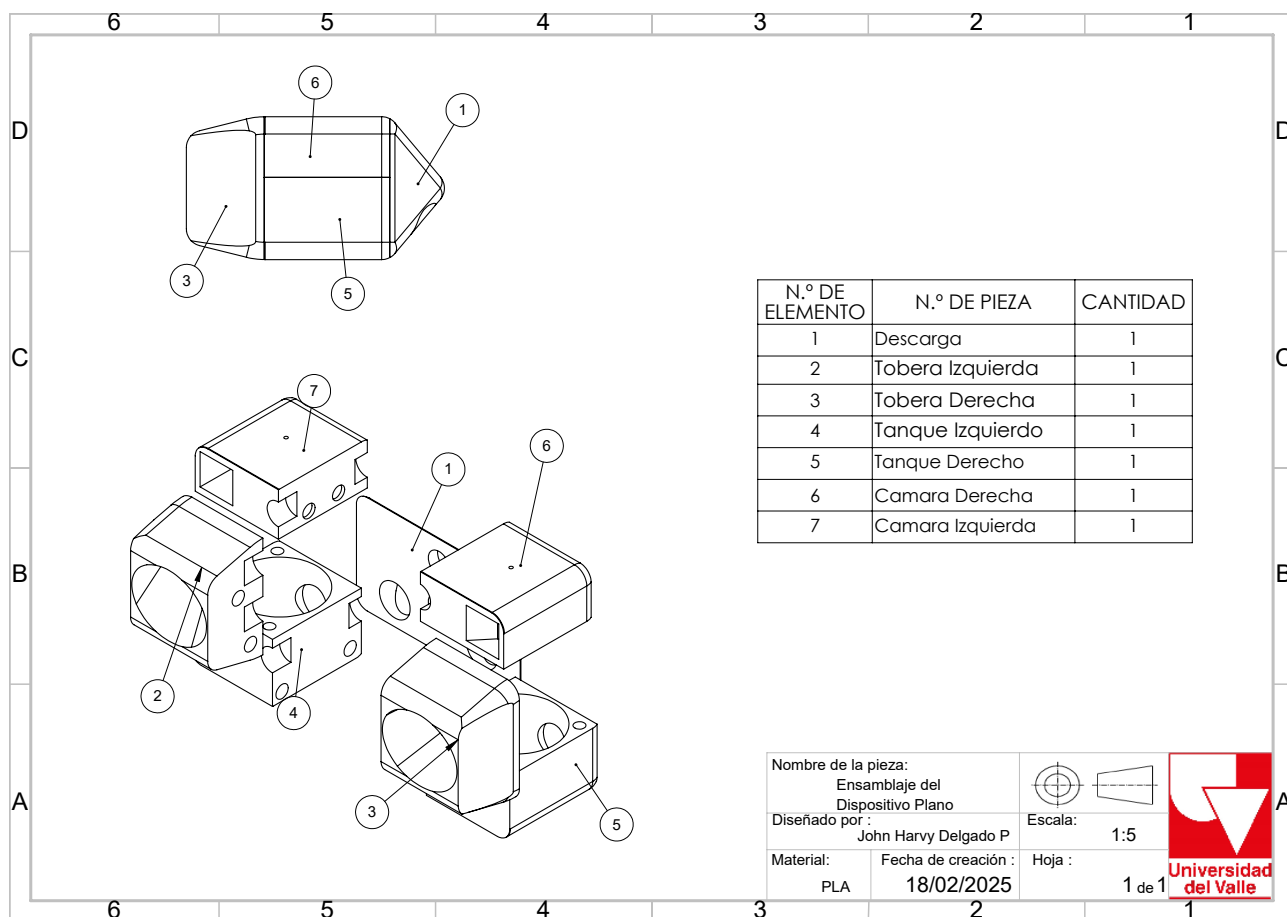


Figura B.5: Plano de Ensamblaje del Dispositivo.

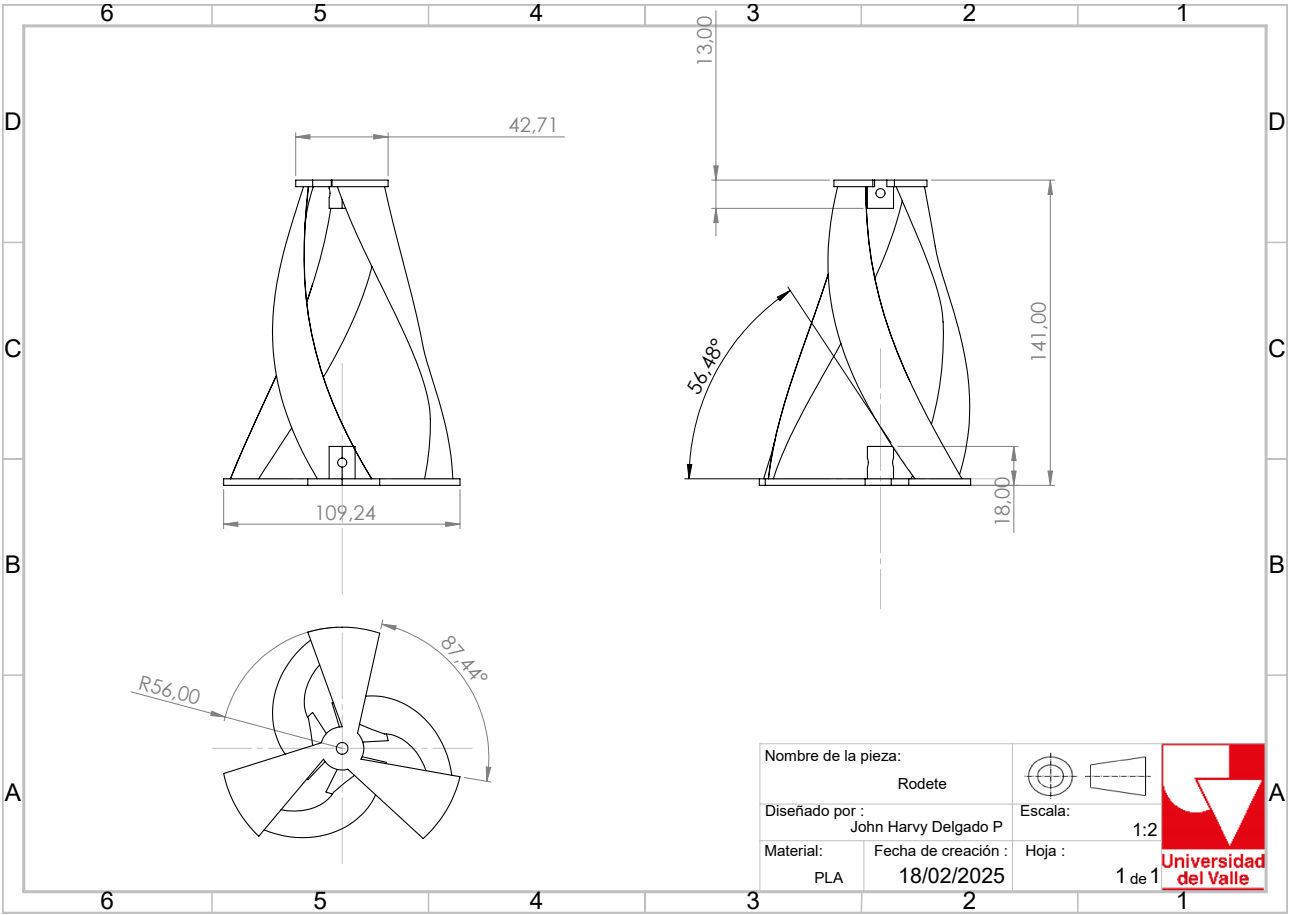


Figura B.6: Plano del Rodete.

BIBLIOGRAFÍA

- [Aranake et al., 2014] Aranake, A. C., Bhat, S. P., and Sreenivas, A. V. (2014). Biomimetic design of hydrokinetic turbine blades for enhanced performance. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(4):867–876.
- [Batchelor, 2000] Batchelor, G. K. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- [Betancour et al., 2023] Betancour, J., Romero-Menco, F., Velásquez, L., Rubio-Clemente, A., and Chica, E. (2023). Design and optimization of a runner for a gravitational vortex turbine using the response surface methodology and experimental tests. *Renewable Energy*, 210:306–320.
- [Cantwell, 2016] Cantwell, B. (2016). The naca airfoil series. https://web.stanford.edu/~cantwell/AA200_Course_Material/The%20NACA%20airfoil%20series.pdf. Accessed: 26 Jun 2024.
- [Cardona-Mancilla et al., 2018] Cardona-Mancilla, C., Sierra del Río, J., Chica-Arrieta, E., and Hincapié-Zuluaga, D. (2018). Turbinas hidrocínéticas de eje horizontal: una revisión de la literatura. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(3):180–197.
- [Chelton et al., 2021] Chelton, D. B., Schlax, M. G., and Samelson, R. M. (2021). Global observations of oceanic eddies. *Progress in Oceanography*, 201:102618.
- [Chica et al., 2015] Chica, E., Perez, F., Rubio-Clemente, A., and Agudelo, S. (2015). Design of a hydrokinetic turbine. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 195:137–148.
- [Childs, 2010] Childs, P. (2010). *Rotating flow*. Elsevier.
- [de Minas y Energía de Colombia, 2023] de Minas y Energía de Colombia, M. (2023). Transición energética en colombia.
- [de Pesca y Vida Silvestre de EE. UU., 2023] de Pesca y Vida Silvestre de EE. UU., S. (2023). Energía hidrocínética: una fuente de energía renovable, concentrada y limpia.
- [Dhakal et al., 2015] Dhakal, S., Timilsina, A. B., Dhakal, R., Fuyal, D., Bajracharya, T. R., Pandit, H. P., Amatya, N., and Nakarmi, A. M. (2015). Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48:662–669.

- [Domfeh et al., 2020] Domfeh, M. K., Gyamfi, S., Amo-Boateng, M., Andoh, R., Ofosu, E. A., and Tabor, G. (2020). Free surface vortices at hydropower intakes: – a state-of-the-art review. *Scientific African*, 8:e00355.
- [Etemadeasl et al., 2024] Etemadeasl, V., Esmaelnadjad, R., Gharlai, K., and Riasi, A. (2024). Application of entropy production theory for evaluating the performance of a gorlov hydrokinetic turbine. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, pages 1–20.
- [Faraji et al., 2022] Faraji, A., Jande, Y. A. C., and Kivevele, T. (2022). Performance analysis of a runner for gravitational water vortex power plant. *Energy Science & Engineering*, 10(4):1055–1066.
- [Fish and Lauder, 2006] Fish, F. E. and Lauder, G. V. (2006). Passive and active flow control by swimming fishes and marine mammals. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38:193–225.
- [Fox et al., 1995] Fox, R. W., McDonald, A. T., Cázares, G. N., and Callejas, R. L. (1995). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill.
- [Garcia and Lopez, 2019] Garcia, M. and Lopez, C. (2019). Environmental impact assessment of vortex-induced hydropower systems. *Journal of Clean Energy Technologies*, 7(2):45–52.
- [Gharib et al., 2019] Gharib, M., Rambod, E., and Kheradvar, A. (2019). Vortex formation in the cardiovascular system. *Journal of Biomechanics*, 45:1–10.
- [Giaimo,] Giaimo, C. Cómo se desplaza el pez más cuadrado del mundo. <https://www.nytimes.com/es/2020/04/22/espanol/ciencia-y-tecnologia/pez-cofre.html>. Accessed: 6 Ago 2024.
- [Gibson et al., 2010] Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer, New York.
- [Gorlov, 1998] Gorlov, A. (1998). Development of the helical reaction hydraulic turbine. final technical report, july 1, 1996–june 30, 1998. Technical report, Northeastern Univ., Boston, MA (United States).
- [Gómez-Giraldo et al., 2023] Gómez-Giraldo, J. A., Gallego-Zuluaga, J. F., Agudelo-Giraldo, J. D., Hincapié-Zuluaga, J. C., and López-Giraldo, J. E. (2023). Análisis del potencial hidrocínético en el río magdalena, colombia. *Dyna*, 80(206):147–156.
- [Hussain, 1986] Hussain, A. K. M. F. (1986). Coherent structures and turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 173:303–356.
- [Huwae et al., 2020] Huwae, R., Susatyo, A., Subekti, R. A., Sudibyo, H., and Khaerudini, D. S. (2020). A parametric of basin geometry of gravitational water vortex power plant. In *2020 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (IC-SEEA)*, pages 211–220. IEEE.
- [Ibrahim et al., 2021] Ibrahim, W., Mohamed, M., Ismail, R., Leung, P., Xing, W., and Shah, A. (2021). Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports*, 7:2021–2042.
- [IDEAM, 2018] IDEAM (2018). Estudio nacional del agua 2018.

- [IRENA, 2020] IRENA (2020). Renewable energy statistics 2020.
- [IRENA, 2021] IRENA (2021). Innovación en energías renovables: Hidroeléctrica.
- [Jayaram and Bavanish, 2022] Jayaram, V. and Bavanish, B. (2022). Design and analysis of gorlov helical hydro turbine on index of revolution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(77):32804–32821.
- [Jones, 2018] Jones, E. (2018). *History of Hydropower: From Water Wheels to Modern Turbines*. Green Energy Press, New York, USA.
- [Khan et al., 2009] Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., and Quaicoe, J. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9):2477–2487.
- [Khare et al., 2019] Khare, V., Khare, C., Nema, S., and Baredar, P. (2019). Chapter 5 - control system of tidal power plant. In Khare, V., Khare, C., Nema, S., and Baredar, P., editors, *Tidal Energy Systems*, pages 243–294. Elsevier.
- [Kundu et al., 2016] Kundu, P. K., Cohen, I. M., and Dowling, D. R. (2016). *Fluid Mechanics*. Academic Press.
- [Lauder, 2011] Lauder, G. V. (2011). Fish locomotion: hydrodynamics and biomechanics. *Journal of Experimental Biology*, 214:652–669.
- [Li et al., 2017a] Li, J., Li, X., Chen, Y.-G., Huang, C.-L., and Zhang, Y.-F. (2017a). A review of 3d printing for biomaterials. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 41(2):93–102.
- [Li et al., 2017b] Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., and Shimizu, K. (2017b). Effect of solidity on aerodynamic forces around straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel experiments (depending on number of blades, chord length and rotor radius). *Renewable Energy*, 104:468–482.
- [Lugt, 1996] Lugt, H. J. (1996). *Vortex Flow in Nature and Technology*. Wiley.
- [Maika et al., 2023] Maika, N., Lin, W., and Khatamifar, M. (2023). A review of gravitational water vortex hydro turbine systems for hydropower generation. *Energies*, 16(14).
- [Moghimí and Motawej, 2020] Moghimí, M. and Motawej, H. (2020). Investigation of effective parameters on gorlov vertical axis wind turbine. *Fluid Dynamics*, 55(3):345–363.
- [Narváez, 2016] Narváez, L. C. A. (2016). Desarrollo de un prototipo de turbina tesla implementada en un hidrogenerador de vórtice horizontal. Tesis de pregrado, Santiago de Cali, Valle del Cauca.
- [Porté-Agel et al., 2020] Porté-Agel, F., Bastankhah, M., and Shamsoddin, S. (2020). Wind-turbine and wind-farm flows: A review. *Boundary-Layer Meteorology*, 174:1–59.
- [Pérez Martínez et al., 2021] Pérez Martínez, J. A., Sánchez Valdés, E., Sánchez Yáñez, P., and Santos Fuentesfría, A. (2021). Estimación de energía de un parque hidrocínético: caso de estudio bahía de banes. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42:81–94.

- [Reddy et al., 2022] Reddy, K. B., Bhosale, A. C., and Saini, R. (2022). Performance parameters of lift-based vertical axis hydrokinetic turbines - a review. *Ocean Engineering*, 266:113089.
- [Roadifer and Running, 2024] Roadifer, L. and Running, C. (2024). Gravitational water vortex generator.
- [Saffman, 1992] Saffman, P. G. (1992). *Vortex Dynamics*. Cambridge University Press.
- [Spalart, 2021] Spalart, P. R. (2021). Aircraft wake vortices and their mitigation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 53:1–24.
- [StirlingShop,] StirlingShop. Torque Meter. <https://www.stirlingshop.de/Torque-Meter>. Accessed: 26 Feb 2025.
- [Thompson and Smalley, 2016] Thompson, M. K. and Smalley, A. J. (2016). *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Applications, and Challenges*. CRC Press.
- [Triantafyllou et al., 2020] Triantafyllou, M. S., Weymouth, G. D., and Miao, J. (2020). Biomimetic propulsion under random heaving conditions. *Journal of Fluid Mechanics*, 885:A1.
- [UPME, 2019] UPME (2019). Informe de generación hidroeléctrica en colombia.
- [Vargas, 2019] Vargas, S. G. (2019). Viabilidad de un hidrogenerador de vórtices verticales inducidos para funcionamiento en la superficie libre de los ríos. thesis, Universidad del Valle.
- [Vincent, 2001] Vincent, J. F. V. (2001). *Structural Biomaterials*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [Wohlers and Gornet, 2022] Wohlers, T. and Gornet, D. (2022). Wohlers report 2022: 3d printing and additive manufacturing state of the industry. *Wohlers Associates*, pages 1–350.
- [WWF, 2017] WWF (2017). Impactos ambientales de las represas hidroeléctricas.