



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS

*DISEÑO DE UNA TURBINA MICRO HIDROKINÉTICA PARA CANALES
DE RIEGO*

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

M.I. EDER PERALTA ESCOBAR

ASESORES:

DR. SERGIO RICARDO GALVÁN GONZÁLEZ

DR. GILDARDO SOLORIO DÍAZ



Morelia, Mich., Marzo 2025

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi querida esposa Flor del Carmen Maldonado, cuyo amor y comprensión han sido mi mayor fortaleza, por su apoyo incondicional en todo momento y por motivarme siempre a salir adelante. A mis hijos, por su alegría, por su paciencia de esperar los días para estar con ellos y por recordarme lo importante de perseguir mis sueños. A mis padres, por su apoyo incondicional y por ser mi inspiración en cada paso de este camino. A mis amigos, quienes han compartido risas y desafíos, y a mis compañeros de trabajo, por su colaboración, apoyo y motivación constante. Sin todos ustedes, este logro no habría sido posible.

Agradecimientos

Primero, agradezco a Dios por permitirme alcanzar nuevas metas.

Agradezco a mis directores de tesis, Dr. Sergio Ricardo Galván González y Dr. Gildardo Solorio Díaz, por su apoyo incondicional, orientación experta y confianza en mis capacidades. Sus valiosos consejos y críticas constructivas han sido fundamentales en el desarrollo de esta investigación. Su apoyo en la adquisición de materiales necesarios para el proyecto y asistencia a congresos.

Al Dr. Constantino Domínguez Sánchez por facilitar las instalaciones de laboratorio para realizar mediciones y por su orientaciones en el diseño de modelos reducidos.

A los miembros de mi mesa de jurado por el tiempo invertido en la revisión de este estudio y por las aportaciones otorgadas.

Agradezco a mi esposa, Flor del Carmen, por su amor, paciencia y apoyo incondicional. Su confianza en mis capacidades me ha motivado a seguir adelante.

A mis hijos gracias por su alegría y por recordarme la importancia de equilibrar el trabajo y la familia. Ustedes son mi mayor fuente de inspiración.

A mis compañeros de trabajo, agradezco su colaboración y sus ideas, que han contribuido significativamente al desarrollo de esta investigación. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en este proyecto.

A todos los participantes de mi investigación, cuya disposición para colaborar fue crucial para el éxito de este trabajo. Sin su aporte, este proyecto no habría sido posible.

A la UMSNH y a la Comisión Estatal del Agua y Gestión de Cuencas por todas las facilidades otorgadas para la culminación de este estudio.

Finalmente, agradezco a CONACyT, que brindó el apoyo financiero necesario para llevar a cabo esta investigación.

Gracias a todos por ser parte de este logro.

Resumen

La micro o también pico energía hidroeléctrica es una tecnología prometedora que combina accesibilidad económica y sostenibilidad ambiental, particularmente relevante para zonas rurales con acceso limitado a fuentes de energía convencionales. Su capacidad para generar electricidad partiendo de flujos de velocidad baja en canales de riego representa una oportunidad clave para reducir la dependencia de combustibles fósiles, mejorar la de vida de las comunidades aisladas y promover el desarrollo.

En esta investigación se diseñó y evaluó una turbina hidrocínética adaptada a las características del canal de riego que parte de la presa Centenario de la Revolución Francisco J. Múgica en Michoacán, México. La metodología incluyó la estimación de la energía hidráulica disponible mediante la Curva de Duración de Flujo, el diseño de una tobera-difusor para maximizar la velocidad del flujo, y la optimización del rotor utilizando la Teoría de Momentum del Elemento de Pala (BEM).

Los resultados indicaron que, con el diseño propuesto, fue posible incrementar la velocidad del flujo en un 60 % y la energía hidráulica disponible en un 43.15 %. La energía mecánica extraída se convirtió en electricidad mediante un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) acoplado a un sistema multiplicador de velocidades, alcanzando una eficiencia total del 78.53 %. Esto resultó en una generación anual de 4,444.15 kWh, suficiente para cubrir necesidades básicas de electrificación en comunidades rurales y operaciones agrícolas. Esta investigación evidencia el potencial de los canales de riego como fuentes de energía renovable de bajo costo, promoviendo soluciones tecnológicas accesibles y de bajo mantenimiento para poblaciones rurales.

Palabras Clave: Energía, renovable, tobera, difusor, medición, experimental.

Abstract

Small-scale hydropower (micro and pico-hydroelectric) is a promising technology that combines economic accessibility and environmental sustainability, particularly relevant for rural areas with limited access to conventional energy sources. Its ability to generate electricity from low-velocity flows in irrigation canals offers a key opportunity to reduce dependence on fossil fuels, improve local quality of life, and promote sustainable development.

This research designed and evaluated a hydrokinetic turbine tailored to the characteristics of the irrigation canal from the “Centenario de la Revolución Francisco J. Múgica” dam in Michoacán, Mexico. The methodology included estimating hydraulic energy availability through the Flow Duration Curve, designing a diffuser-duct to maximize flow velocity, and optimizing the rotor using the Blade Element Momentum (BEM) theory.

Results demonstrated that the proposed design increased flow velocity by 60 % and hydraulic energy availability by 43.15 %. The mechanical energy extracted was converted into electricity using a permanent magnet synchronous generator (PMSG) coupled with a speed multiplier system, achieving a total efficiency of 78.53 %. This generated 4,444.15 kWh annually, sufficient to meet basic electrification needs in rural communities and support agricultural operations. This research highlights the potential of irrigation canals as low-cost renewable energy sources, promoting accessible and low-maintenance technological solutions for rural populations.

Key Words: Energy, renewable, nozzle, diffuser, measurement, experimental.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	X
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Hipótesis	4
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo General	4
1.5.2. Objetivos Específicos	5
1.6. Contribución al estado del arte	5
1.7. Estructura del documento	6
2. Marco Teórico	7
2.1. Turbinas hidrocínéticas	7
2.1.1. Turbinas de flujo axial.	7
2.1.2. Turbinas de flujo cruzado.	9
2.2. Canales de flujo abiertos	10
2.2.1. Geometría del canal prismático	11
2.2.2. Propiedades geométricas que presentan los canales trapezoidales. .	12
2.2.3. Distribución de la velocidad del fluido en un canal	12
2.2.4. Estado del flujo	13
2.2.5. Efecto de la gravedad.	14

2.2.6. Velocidad del flujo uniforme	14
2.3. Flow Duration Curve	15
2.4. La energía y potencia de corrientes de agua	15
2.5. Modelos reducidos	17
2.5.1. Análisis dimensional	17
2.5.2. Semejanza hidráulica	18
2.6. Tipos de Difusores	19
2.7. Calculo del rotor	21
2.7.1. Teorías Aerodinámicas en Aeroturbinas	22
2.7.2. Proceso del calculo	24
2.8. Estado del Arte	26
3. Metodología	28
3.1. Recurso Hídrico	29
3.2. Evaluación de la energía hidráulica en el canal	30
3.3. Conversión a Energía Mecánica.	31
3.3.1. selección de la Tobera difusor	31
3.3.2. Modelo experimental para obtención de velocidades	32
3.3.3. Diseño de los álabes del rotor	32
3.4. Conversión en Energía Eléctrica	33
4. Resultados	34
4.1. Estimación de la energía Hidráulica	34
4.1.1. Selección de la Tobera-difusor	37
4.1.2. Construcción del modelo experimental	37
4.1.3. Medición de la velocidad en el modelo	41
4.1.4. Cálculo del rotor	45
4.2. Conversión de la Energía Mecánica a Energía Eléctrica	53
4.2.1. Selección del multiplicador de velocidades	54
4.2.2. Selección del generador eléctrico	55
5. Discusión	57
5.1. Energía obtenida	57
5.2. Comparación con otros trabajos	58
5.3. Limitaciones del Estudio	58
5.4. Trabajos futuros	58
6. Conclusiones	61

7. Apéndice	63
7.1. Participación en congresos	63
7.2. Artículos Publicados en revistas JCR	88
Bibliografía	99

Índice de figuras

2.1. Clasificación de las turbinas hidrocínéticas	8
2.2. Turbinas de flujo axial.	8
2.3. Turbinas de flujo cruzado	9
2.4. Porcentaje de uso de turbinas	10
2.5. Elementos de canales.	11
2.6. Canal Trapezoidal	12
2.7. Distribución de velocidades en canal trapezoidal	13
2.8. Flujo laminar y turbulento.	13
2.9. Área barrida	16
2.10. Difusor Anular de Plancha Plana	20
2.11. Difusor Anular de Sección Hidrodinámica	20
2.12. Difusor Anular con Flange	21
2.13. Difusor Anular de Múltiples Elementos	21
2.14. Tubo de corriente y disco actuador	23
2.15. Tubo de corriente y disco actuador con estela giratoria.	23
2.16. Fuerzas aerodinámicas sobre un perfil	24
2.17. Diagrama de Sankey.	26
3.1. Proceso de transformación de la energía.	28
3.2. Recurso Hídrico	29
3.3. Propiedades geométricas.	31
4.1. Curva de Duración de Flujo (FDC)	35
4.2. Dimensiones de la tobera-difusor perfil NACA 10510	37
4.3. Corte del modelo de la tobera-difusor	38
4.4. CAD del molde para el difusor	38
4.5. Vaciado con resina cristal	39
4.6. Mitades del Difusor transparente	39
4.7. Construcción del modelo del canal	40
4.8. Componentes de ensamble del modelo	41
4.9. Construcción del modelo del canal	41

4.10. Modelo del canal	42
4.11. Analisis de velocidades con PIV	43
4.12. Medición de velocidad en el modelo del canal	43
4.13. Diferentes representaciones de la velocidad en el canal y en la tobera-difusor.	44
4.14. Análisis de perfiles aerodinámicos.	46
4.15. Partes del álabe desde $i = 1$ hasta $n = 20$	47
4.16. Resultado de los parámetros del rotor	52
4.17. Sección y ángulo del aspa	53
4.18. Transmisión por engranajes cónicos helicoidales	54
4.19. Generador Eléctrico PMSG	55
5.1. Diagrama de Sankey.	57
5.2. Análisis computacional de velocidades.	59
5.3. Medición de caudal disponible en laboratorio	59

Índice de tablas

2.1. Ventajas técnicas y desventajas de las turbinas horizontales y verticales. . .	10
3.1. Localidades en cruce del canal de riego.	30
3.2. Módulos medios mensuales de riego	30
4.1. Tabla de FDC	34
4.2. Calculo de la Velocidad y Profundidad para el caudal.	36
4.3. Energía hidráulica disponible en el caudal en el año.	36
4.4. Comparación entre el canal real y el modelo.	39
4.5. Efecto provocado por la tobera-difusor en la energía hidráulica.	45
4.6. Datos iniciales para calcular el rotor.	46
4.7. Cálculo de la Velocidad Relativa	49
4.8. Resultado de iteración sección 1.	50
4.9. Cuerda y ángulo de calado para el álabe del rotor	51
4.10. Cálculo finales del rotor.	53
4.11. Características del generador síncrono de imanes Permanentes (PMSG) . .	56

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

El utilizar la energía eléctrica genera un papel de gran importancia para el crecimiento económico y la mejora de la vida de la humanidad, pero el uso excesivo de combustibles fósiles para generar electricidad causa la contaminación ambiental, el efecto invernadero, las emisiones de CO₂; por no mencionar que los recursos de combustibles fósiles se están agotando [1].

Por lo tanto, reducir el uso de combustibles fósiles es urgente y su sustitución por una fuente de energía ideal (una fuente de energía ideal debe ser renovable y tener efectos mínimos sobre el medio ambiente) es esencial para proporcionar un ambiente habitable y no contaminado para las próximas generaciones.

Existen diferentes tipos de tecnologías renovables, como la biomasa, el viento, la energía solar, la hidroeléctrica y la geotérmica, que son limpias y fiables para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que conducen al calentamiento global [2].

De las diferentes tecnologías de generación renovable, la energía hidroeléctrica, ya sea grande o pequeña escala, es la opción principal en términos de aportación a la generación de electricidad en el mundo.

Además, se ha demostrado que un tercio de la población mundial no tiene electricidad, pero tienen acceso al agua. [3]

Actualmente la obtención de energía eléctrica que se obtiene de corrientes de agua se basa solamente en la acumulación de energía potencial, con la conclusión del proyecto se pretende realizar la aplicación de un sistema que sea capaz de capturar la mayor parte de la energía cinética de los canales de riego y tener un aprovechamiento tanto energético y demográfico dando nueva utilidad para lo que fueron creados. [4]

Las nuevas tecnologías hidrocínéticas nos permiten aprovechar la energía del agua en movimiento para generar energía sin los impactos negativos asociados con los proyectos hidroeléctricos tradicionales. La hidrocinetica es el proceso de extraer la energía de corrientes, de mareas, o de olas.

Este uso de la energía cinética es calificado como una alternativa o forma no convencional para generar electricidad, que emplea una fuente renovable de energía.

Este tipo de energía renovable cuanta con una gran ventaja respecto de las otras y es que su generación puede ser de manera constante, puesto que siempre existirá una corriente que puede ser predecible. [5]

El estudio de este tipo de turbinas va marcado principalmente por la aplicación de la tecnología hacia la conversión de la energía cinética, esto lo podemos desarrollar gracias a toda la investigación previa en los campos de la energía eólica, las hélices de embarcaciones rápidas y de turbinas hidráulicas.

1.2. Planteamiento del problema

La energía hidroeléctrica a pequeña escala se presenta como una de las soluciones más económicas y ecológicas para proyectos de electrificación rural. En México, hay recursos hídricos, como los canales de riego, que no se han explorado en profundidad debido a la percepción de su viabilidad limitada para este tipo de electrificación, [6]. En el estado de Michoacán, donde la agricultura juega un papel fundamental y se utilizan canales de riego, hay potencial energético que podría aprovecharse empleando turbinas hidrocínéticas para proporcionar energía a las comunidades cercanas y facilitar el bombeo de agua hacia los cultivos.

Las turbinas hidrocínéticas funcionan mediante aspas que transforman la energía cinética del agua en movimiento par mecánico, el cual se puede convertir en energía eléctrica a través de un generador acoplado al eje o utilizar para accionar bombas de riego. Entre las diferentes tipos de turbinas hidrocínéticas mencionadas en [7], las de eje horizontal son similares a las turbinas eólicas en cuanto a los principios físicos y operativos, ya que solo varía la densidad del fluido, [8].

Aunque la velocidad del agua en un canal de riego puede ser baja, esto no implica que la energía disponible sea escasa. Las turbinas hidrocínéticas de eje horizontal pueden generar energía eléctrica de manera continua, incluso con corrientes de baja velocidad. Un ejemplo de esto son los recursos hídricos de las mareas en la costa patagónica de Argentina, donde [9] evidenció un gran potencial energético aprovechable por turbinas hidroquinéticas para la generación de electricidad.

En estos canales, se han utilizado turbinas abiertas (similares a las eólicas convencionales) que extraen energía del fluido, aunque con un límite impuesto por el teorema de Betz [10]. Esto ocurre porque, al disminuir la velocidad del flujo sin alterar la presión, las líneas de corriente deben expandirse para preservar la continuidad del fluido.

1.3. Justificación

En base a la observación de varios hechos se toma la iniciativa de participar en el diseño de una micro turbina de aprovechamiento cinético. En primer lugar, una revisión a la literatura ha puesto de manifiesto que una de las principales barreras que obstaculizan el empleo de la tecnología de microhidrocinética en las zonas rurales con acceso a agua corriente es la falta de investigación que demuestre los beneficios técnicos, económicos y ambientales de esta tecnología en comparación con otras técnicas de electrificación rural. [11]

En el contexto del crecimiento en la utilización de energía eólica en el mundo, se han desarrollado aerogeneradores capaces de generar grandes cantidades de electricidad de manera competitiva y conectarse a la red de distribución sin causar alteraciones. Estos dispositivos captan la energía cinética de un fluido que se está moviendo. Al comparar la energía obtenida del agua con la del aire, se observa que el agua es casi 800 veces más densa que el aire, lo que permite a las turbinas hidrocinéticas extraer una energía significativa incluso a bajas velocidades. [12]

Es importante señalar que las velocidades de los ríos que se desean aprovechar son bastante menores y, además, la velocidad del agua en un canal de riego tiende a ser más constante a lo largo del tiempo, es mejor conocida históricamente y puede preverse a partir de registros de precipitaciones.

Por lo tanto, resulta razonable pensar que las turbinas hidrocinéticas podrían alcanzar un rendimiento similar al de los aerogeneradores, aprovechando la ventaja que ofrece la densidad.

En otro caso sería interesante implementarlo como fuente de energía autónoma limpia e inagotable para regiones aisladas donde el servicio de energía eléctrica se vuelve una necesidad de las comunidades que se encuentran alejadas de una zona urbana donde este servicio no se tiene debido a los altos costos que implica hacer llegar dicho servicio. Además, hacer énfasis en la implementación de energías limpias que ayudan al medio ambiente utilizando fuentes de generación de energías naturales y evitando el uso de productos contaminantes que otros procesos de energía requieren para su funcionamiento.

Las turbinas hidrocinéticas pueden compararse como turbinas eólicas que operan dentro del agua, por lo que al momento de diseñar las aspas se pueden utilizar todos los principios de diseño de una turbina eólica considerando que lo único que cambiaría es el fluido de trabajo.

La energía hidroeléctrica a una escala pequeña es una de las tecnologías más económicas y que no causa efectos al medio ambiente por lo que se cree que deben considerarse para realizar proyectos de electrificación en zonas rurales. Puede ser un muy buen complemento a un sistema de energía solar, ya que produce electricidad durante

24 horas al día, siempre y cuando el agua corriente está disponible.

Este tipo de turbina no supone un obstáculo mayor para el movimiento natural ni para las migraciones de la vida acuática en el lugar. No modifica el cauce del río, no altera el paisaje, no conlleva la inundación de parte alguna. Por tal motivo podemos decir que el impacto al medio ambiente es mínimo. [13]

1.4. Hipótesis

El fundamento de la investigación se basa en la teoría de Aerogeneradores ya que dichas maquinas extrae la energía cinética de una masa de fluido en movimiento, lo que podemos cambiar es el fluido de trabajo.

En los cálculos realizados con anterioridad, una turbina hidrocínética de flujo axial con eje paralelo al flujo de la corriente del agua genera un buen aprovechamiento de la mayor cantidad de energía, las características de las hélices provocan muy poca resistencia al agua, por lo cual son el estudio perfecto para el proyecto.

La aplicación de turbinas hidrocínéticas en canales de riego mejora la estimación de energía extraída por el flujo constante de agua en el transcurso del tiempo, así puede ser predecible en cada temporada del año. Kirke revisó los recientes desarrollos en el diseño de turbinas de corriente de flujo abierto y exploró algunas ventajas potenciales de las turbinas actuales con conductos o "difusores-aumentados".

La implementación de un modelo a escala con su respectivo análisis dimensional podrá dar resultados que servirán para mejorar y corregir fallas que puedan obtenerse con el fin de obtener resultados satisfactorios para construir el prototipo sabiendo que funcionara según lo calculado.

El prototipo ya puesto en marcha podrá ser colocado en diversas zonas que cumplan las características de operación sin tener que modificar su estructura, será construido de tal forma que de ser necesario solo se reemplazaran las hélices por las más adecuadas.

Se estudiara con detalle el sistema de conversión de electricidad que sea adecuado para hacer llegar a la población de forma directa o para la conexión con la red eléctrica del país. Esto con el análisis si se necesitara un sistema de acumulación de energía o si las potencias y velocidades obtenidas alcanzan para entrar en fase directamente con la red.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar el modelo de una turbina micro hidrocínética que sea capaz de generar energía eléctrica partiendo de la energía cinética de las corrientes de agua de los canales de

riego.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Evaluar las zonas de aplicación más adecuadas para que el prototipo funciones de forma correcta a lo largo de todo el tramo del canal de la presa “Centenario de la Revolución Francisco J. Múgica” ubicado en el estado de Michoacán, México, mediante la Curva de Duración de Flujo del canal
- Diseñar una tobera-difusor que incremente la velocidad del flujo en el rotor.
- Optimizar el diseño del rotor utilizando la Teoría de Momentum del Elemento de Pala (BEM).
- Conseguir fabricar un modelo a escala de la turbina y del canal para realizar mediciones utilizando Velocimetría de Imágenes por Partículas (PVI) en laboratorio de hidráulica de la UMSNH
- Evaluar la cantidad de energía extraída por el modelo en el laboratorio, comparar con la teoría y realizar modificaciones de ser necesario.
- Evaluar la probabilidad de crear un banco de turbinas colocadas en serie o paralelo para obtener más cantidad de energía
- Proponer características de canales para construcción en ciertas zonas donde podría obtenerse mayor cantidad de energía.

1.6. Contribución al estado del arte

Aunque en el estado del arte podemos encontrar trabajos relacionados sobre la generación de energía eléctrica utilizando la energía cinética de un fluido en movimiento ya sea con agua o aire, investigadores han puesto en manifiesto que se requiere saber mas sobre el aprovechamiento de la energía cinética en los canales de riego, con este tenemos un campo de oportunidad para estudiar este tipo de recurso para implementar turbinas hidrocinéticas en la generación de energía eléctrica.

Con un recurso disponible se plantea realizar un estudio partiendo desde la cantidad de energía que tiene disponible un canal de riego para diseñar una turbina hidrocinéticas que pueda extraer la mayor cantidad de esa energía en un periodo de tiempo con la implementación de una tobera difusor para mejorar esa cantidad de energía extraída.

Se realizarán mediciones experimentales del comportamiento de la velocidad dentro del tubo en un modelo a escala y con el resultado se calculará el rotor para la turbina hidrocinética.

Con el resultado de este trabajo se podrá obtener un estimado de la cantidad de energía extraída de un canal de riego partiendo desde su caudal disponible con el fin de analizar posteriormente la viabilidad de implementar un banco de turbinas capas de alimentar de energía eléctrica a una comunidad cercana al canal o para aplicaciones agrícolas como el bombeo.

1.7. Estructura del documento

Este documento se organiza en las siguientes secciones:

- Marco Teórico: Presenta los fundamentos científicos y técnicos que sustentan la investigación, incluyendo conceptos de energía hidrocínética, diseño de turbinas y metodologías de optimización.
- Metodología: Detalla los procedimientos experimentales y analíticos empleados para estimar la energía disponible, diseñar los componentes de la turbina y evaluar su rendimiento.
- Resultados y Discusión: Expone los hallazgos principales, como el incremento en la eficiencia del sistema, y los compara con estudios previos.
- Conclusiones y Recomendaciones: Resume los aportes de la investigación y sugiere líneas futuras para optimizar y escalar la tecnología desarrollada.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Turbinas hidrocínéticas

Las turbinas hidrocínéticas se diseñan para generar energía eléctrica aprovechando la velocidad de la corriente de agua, sin necesidad de construir presas o canales que obliguen al agua a fluir. Este tipo de turbinas se conoce por varios nombres: turbinas hidrocínéticas, turbinas de corriente de agua, turbinas de río y turbinas de flujo libre, entre otros.

Han surgido diversos conceptos para la conversión hidrocínética, siendo la turbina la opción más común. En ríos y vías navegables artificiales, este tipo de tecnología se denomina típicamente turbinas de corriente de río y suele tener una capacidad de entre 1 y 10 kW. Las turbinas hidrocínéticas se pueden clasificar según la orientación de su eje respecto al flujo del líquido: pueden ser de eje horizontal o vertical, similares a las turbinas utilizadas en generación eólica.

Las dos configuraciones más frecuentes de turbinas hidrocínéticas de pequeña escala son las turbinas de flujo axial y las de flujo cruzado. Las turbinas de flujo axial (o de eje horizontal) tienen ejes alineados con la dirección del flujo del agua y utilizan rotores de tipo hélice. Por otro lado, las turbinas de flujo cruzado presentan ejes de rotor perpendiculares al flujo del agua pero paralelos a la superficie de esta, y pueden dividirse en variantes de eje vertical (perpendiculares al plano del agua) y en plano (con el eje en el plano horizontal de la superficie del agua).

Además, dentro de cada categoría de calificación también se encuentran subcategorías que diferencian los tipos de equipos. Fig. 2.1

2.1.1. Turbinas de flujo axial.

Las turbinas de flujo axial son similares a las turbinas eólicas en términos de diseño y punto de vista estructural.

Las turbinas de flujo axial se clasifican como bombas axiales, debido a que su eje

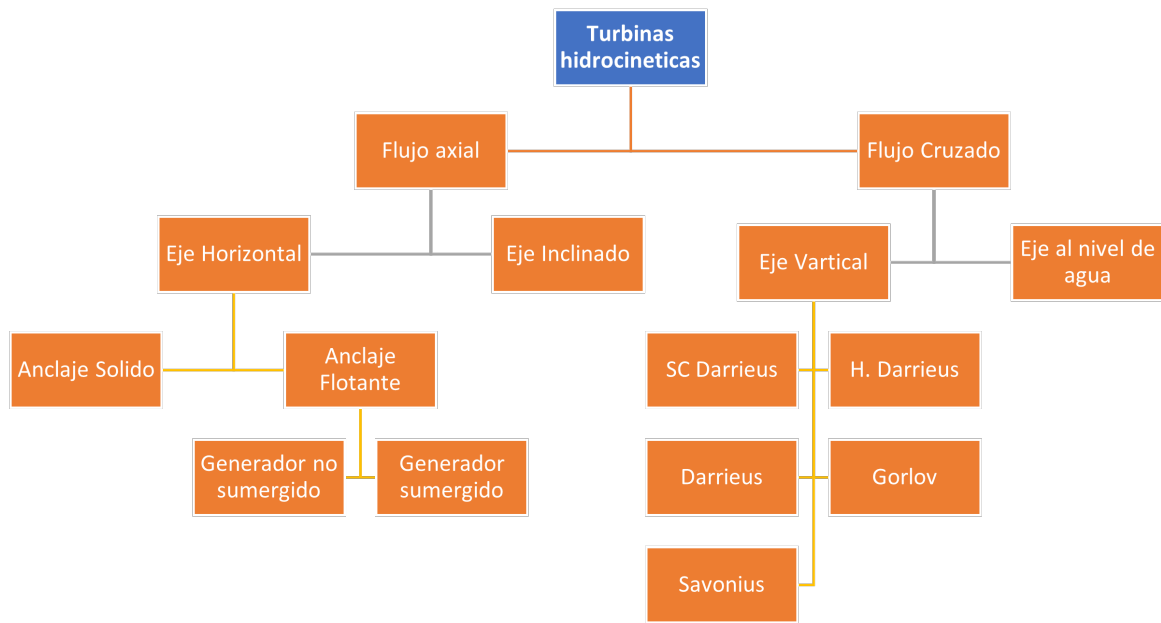


Figura 2.1: Clasificación de las turbinas hidrocinéticas

es paralelo al fluido de desplazamiento. Hay dos subdivisiones de esta categoría que son las turbinas de flujo axial con eje horizontal y eje inclinado. Las turbinas de eje horizontal son ampliamente utilizadas en la generación de energía en los ríos y mares, y utilizan los mismos principios de las turbinas de viento, ya que el eje de inclinación ha sido ampliamente estudiado para su uso en pequeñas corrientes. Varias disposiciones se muestran en la Fig. 2.2.

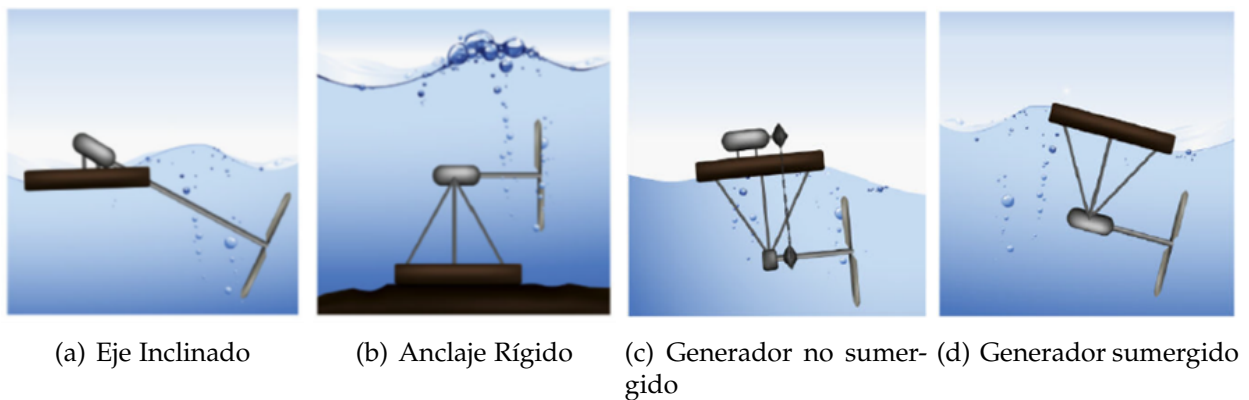


Figura 2.2: Turbinas de flujo axial.

Al igual que cualquier equipo mecánico las turbinas axiales tienen sus ventajas y desventajas de la parte delantera de flujo transversal. Existe la facilidad para ponerse en marcha sin necesidad de otro método para el inicio de la operación.

El rendimiento óptimo para este tipo de turbina se consigue con una velocidad de

rotor superior, por lo tanto, hay una reducción del acoplamiento de transmisión. La operación es más eficiente para el control activo, y hay a menudo protección de sobrecarga. La principal desventaja observada es el alto coste y la complejidad, ya que el funcionamiento del generador y el acoplamiento es subacuático.

2.1.2. Turbinas de flujo cruzado.

Las turbinas de flujo cruzado se llaman así porque tienen su rotor perpendicular a la corriente de agua. Ellos se pueden subdividir en dos categorías: en el eje vertical y el eje al nivel del agua. El eje de la turbina con el nivel de agua es turbinas con su principio de funcionamiento basado en la fricción, por lo que son generalmente menos eficiente que el eje vertical. Las ventajas del uso de turbinas de flujo cruzado son las emisiones de ruido más bajos debido a la reducción de pérdidas en las puntas de las palas e incluso pueden girar con flujo bidireccional. Por otra parte se presentan las desventajas: generar rizado del par en la salida; A veces necesitan alimentación externa para iniciar la operación; menor eficiencia en comparación con otros tipos. Varias disposiciones se muestran en la Fig. 2.3.

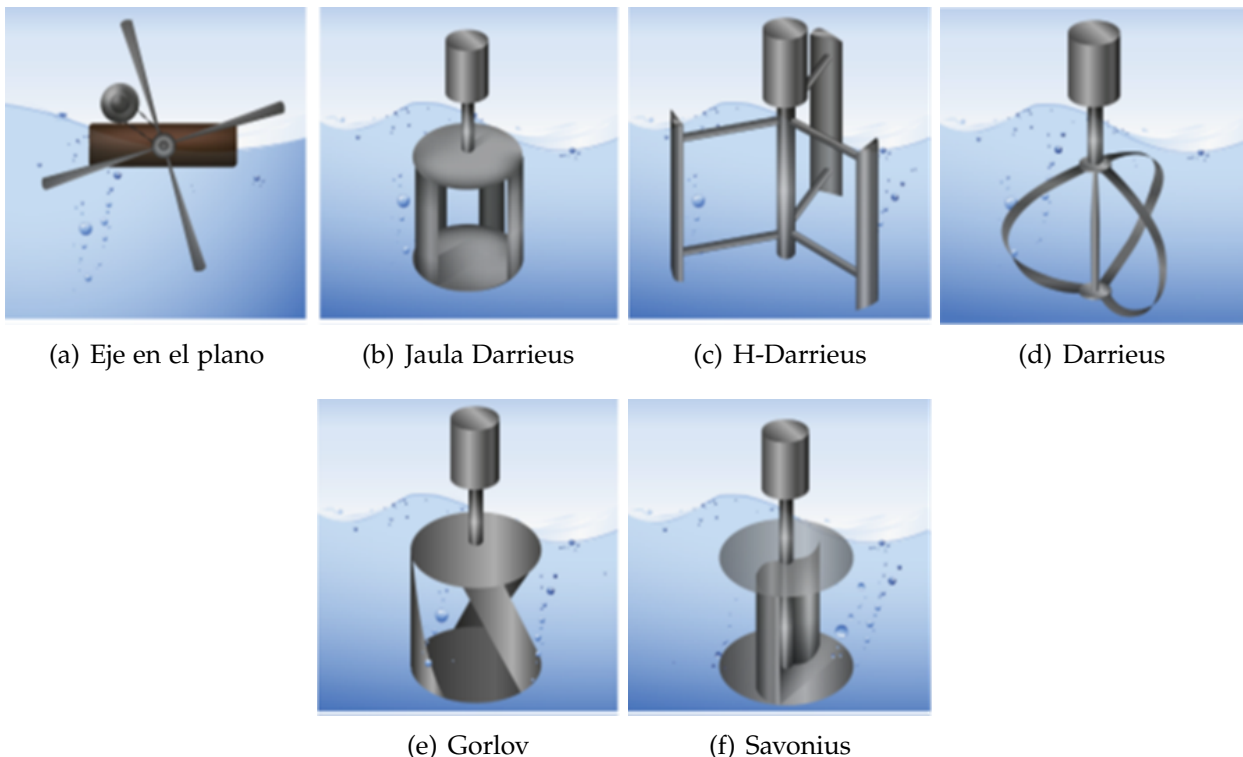


Figura 2.3: Turbinas de flujo cruzado

Las ventajas técnicas y desventajas asociadas con las turbinas horizontales y verticales se muestran en la Tabla 2.1.

Como las turbinas axiales, la selección del tipo de turbina siempre dependerá del tipo de corriente, la velocidad, y lo que es la potencia requerida del sistema.

Tabla 2.1: Ventajas técnicas y desventajas de las turbinas horizontales y verticales.

Configuración de turbina	Ventajas	Desventajas
Turbinas de eje horizontal	Capacidad de autoarranque.	Es necesaria la inversión y rectificación de frecuencia durante la variación de la velocidad.
	Posible eliminación de caja de velocidades mediante el uso de un conducto.	Para obtener una frecuencia adecuada a baja velocidad, se requiere un gran número de polos y un aumento en el radio de la turbina.
	Puede funcionar a velocidades lentas. Menores costos de mantenimiento. Densidad de alta potencia.	
Turbinas de eje Vertical	Puede suministrar voltaje constante y frecuencia constante a velocidades variables.	Menor eficiencia en comparación con el generador síncrono de imanes permanentes.
	Alta fiabilidad.	Necesita velocidad más rápida que la velocidad síncrona. A bajas velocidades de flujo existe la necesidad de incrementar la velocidad
	Diseño barato y simple.	

En la Fig. 2.4 podemos observar la distribución de uso de las turbinas hidrocínéticas, puedes ver que las turbinas de eje axial son las que mas se utilizan con un 43 %, después las turbinas de eje vertical con un 33 %, las turbinas de flujo cruzado presentan solamente un 7 %, mientras que lo restante que equivale al 17 % se encuentran los demás diferentes tipos de turbinas hidrocínéticas.

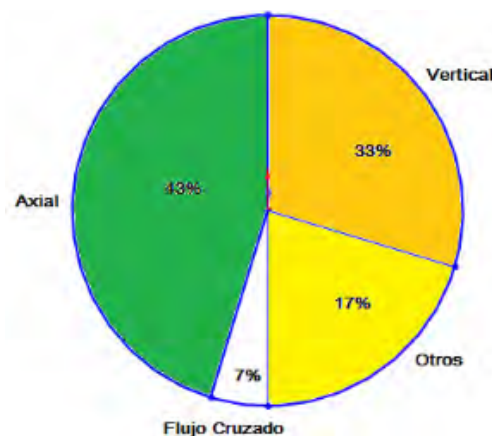


Figura 2.4: Porcentaje de uso de turbinas

2.2. Canales de flujo abiertos

Un canal es una estructura natural o artificial que permite el flujo de líquidos, gracias exclusivamente a la fuerza de gravedad, a diferencia de las tuberías, donde el flujo se

produce generalmente bajo presión. Los canales tienen una superficie libre que está en contacto con la presión atmosférica.

Existen dos tipos de canales: los naturales y los artificiales. Los canales naturales son aquellos que se encuentran en la naturaleza, como arroyos, ríos y bahías generadas por mareas. La complejidad para estudiar las propiedades hidráulicas de estos canales requiere de su estudio bajo ciertas suposiciones, utilizando los principios de la teoría hidráulica, y es un campo que se aborda mediante la Hidráulica Fluvial.

Por otro lado, los canales artificiales son aquellos que han sido construidos por el ser humano, incluyendo canales de navegación, canales hidroeléctricos, infraestructuras de riego, cunetas de drenaje, vertederos y otros. Las propiedades hidráulicas de los canales artificiales pueden ser diseñadas y controladas conforme a requisitos específicos.

Un canal artificial suele ser extenso y presenta una pendiente suave; puede estar revestido o no con materiales como roca, concreto o madera. La sección del canal se refiere a su área transversal medida perpendicularmente al flujo, y la sección vertical es la que pasa por el punto más bajo de dicho canal.

2.2.1. Geometría del canal prismático

Los canales artificiales se diseñan con secciones que tienen formas geométricas regulares. Entre ellos, el canal trapecial es uno de los más comunes debido a sus ventajas constructivas.

Estos aspectos son cruciales para el cálculo del flujo. En los canales artificiales, se definen según la profundidad del flujo y las dimensiones de la sección, mientras que en los canales naturales, se determinan curvas que reflejan la relación entre sus elementos y la profundidad del flujo. Fig. 2.5

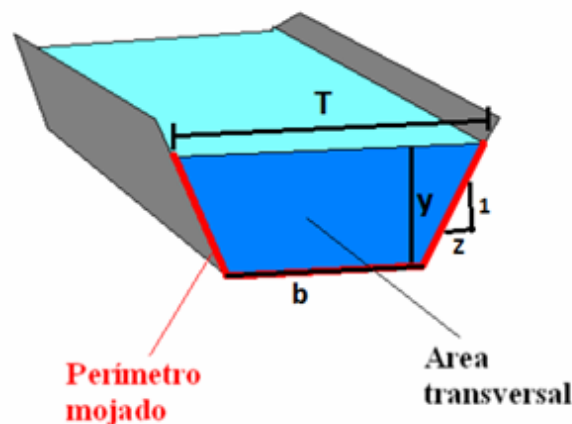


Figura 2.5: Elementos de canales.

2.2.2. Propiedades geométricas que presentan los canales trapezoidales.

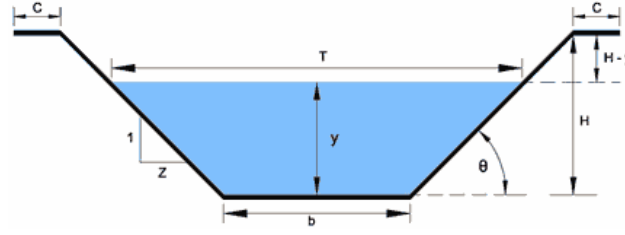


Figura 2.6: Canal Trapezoidal

La Profundidad (y). Es la distancia vertical desde la superficie libre hasta el punto más bajo del canal.

Área (A). Es el área de la sección transversal del flujo y es perpendicular al sentido del flujo.

$$A = (b + Zy)y \quad (2.1)$$

Perímetro mojado (P). Es la longitud del perímetro de la sección transversal que está en contacto con el líquido y la pared

$$P = b + 2y\sqrt{1 + Z^2} \quad (2.2)$$

Radio hidráulico (R). Es la división del área mojada entre su perímetro mojado:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b + Zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + Z^2}} \quad (2.3)$$

Ancho superficial (T). Es el ancho del canal en la superficie.

$$T = b + 2Zy \quad (2.4)$$

Profundidad hidráulica (D). Es la división entre el área mojada y el ancho en la superficie. Indica a que altura el flujo es crítico.

$$D = \frac{A}{T} = \frac{(b + Zy)y}{b + 2Zy} \quad (2.5)$$

2.2.3. Distribución de la velocidad del fluido en un canal

La velocidad en un canal no se comporta de manera constante ni tampoco es la misma en diferentes puntos de una sección del canal. Esta velocidad se ve afectada por diversos factores como son la viscosidad, la rugosidad y la forma del canal, entre otros. En un canal de forma trapezoidal, la velocidad es muy similar a la que se muestra en la Fig. 2.7.

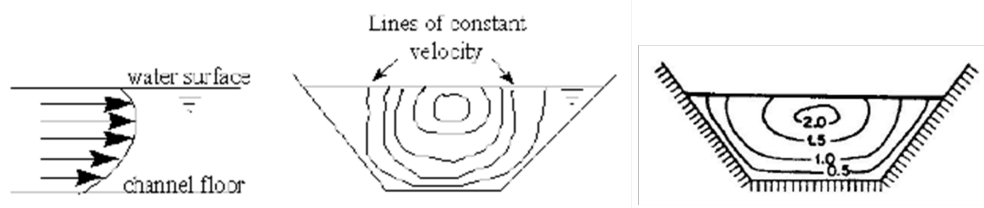


Figura 2.7: Distribución de velocidades en canal trapezoidal

2.2.4. Estado del flujo

El comportamiento del flujo en un canal abierto es gobernado por la viscosidad y la gravedad relativa a las fuerzas de inercia.

Efectos de la viscosidad: El flujo puede ser laminar, turbulento o de transición, Fig. 2.8. El flujo laminar se caracteriza por un bajo gradiente de velocidad, donde la fuerza de inercia supera a la fuerza de fricción. En este tipo de flujo, las partículas se mueven en trayectorias definidas, desplazándose en capas o láminas sin rotar significativamente. Todas las partículas que pasan por un punto en el flujo siguen la misma trayectoria.

En contraste, el flujo turbulento ocurre cuando el gradiente de velocidad aumenta, lo que genera un mayor efecto de fricción entre partículas del fluido. Este incremento en la fricción provoca que las partículas adquieran una notable energía de rotación, lo que desestabiliza sus trayectorias. En el flujo turbulento, las partículas colisionan y cambian de rumbo de manera errática, haciendo que el movimiento sea más caótico y menos predecible.

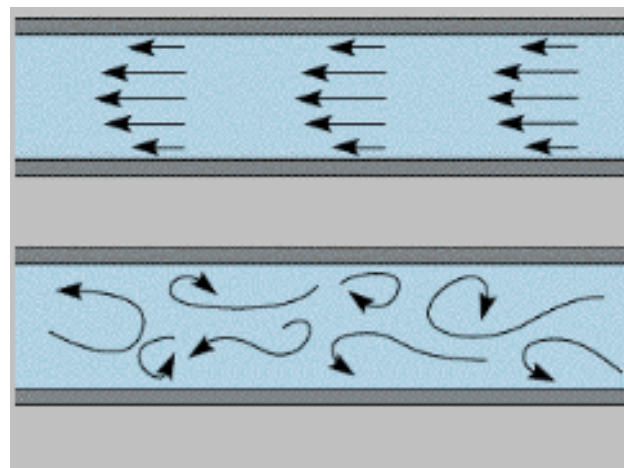


Figura 2.8: Flujo laminar y turbulento.

Si las fuerzas de inercia del fluido en movimiento son muy bajas, la viscosidad es la fuerza dominante y el flujo es laminar. Cuando predominan las fuerzas de inercia el flujo es turbulento.

El número de Reynolds permite establecer el tipo de flujo y se define con la Ec. 2.6.

$$R = \frac{VL}{\nu} \quad (2.6)$$

Donde V es la velocidad del fluido, L representa el radio hidráulico del conducto y ν viscosidad cinemática del agua.

2.2.5. Efecto de la gravedad.

El efecto que tiene la gravedad sobre el estado del flujo se representa por la división entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales que están establecidas por el numero de Froude.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2.7)$$

Donde V es la velocidad media del flujo, g la aceleración de la gravedad y L la longitud característica.

En los canales abiertos, L representa la profundidad hidráulica D , y esta definida como el área de la sección transversal perpendicular a la dirección de flujo en el canal, dividida entre el ancho de la superficie.

2.2.6. Velocidad del flujo uniforme

La ecuación de Chezy sirve para determinar la velocidad del flujo uniforme se expresan de la forma:

$$V = c\sqrt{RS_0} \quad (2.8)$$

Donde V es la Velocidad media del Fluido, c el coeficiente de Chezy, R el Radio Hidráulico y S_0 es la pendiente del cauce.

Manning Propuso la siguiente ecuación para determinar el coeficiente de Chezy conociendo la rugosidad de las paredes dependiente de el material con que se construyo el canal.

$$c = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}} \quad (2.9)$$

Sustituyendo la Ec. 2.9 en la Ec. 2.8 resulta que la velocidad se puede determinar con:

$$V = \frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}S_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

donde n es el Coeficiente de rugosidad del material de construcción del canal.

Para determinar el caudal del agua en el canal puede determinarse con

$$Q = VA = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

Donde A es el área de la sección transversal del flujo en el canal explicada en el sección 2.2.2.

2.3. Flow Duration Curve

Una de las técnicas más utilizadas en hidrología es la curva de duración del flujo (FDC), proporciona una representación gráfica de la distribución de frecuencias del régimen de flujo completo, Utilizando el FDC, es posible determinar el porcentaje de tiempo que se iguala o excede un flujo especificado. Este tipo de información se utiliza comúnmente para la evaluación de recursos, incluyendo esquemas de diseño hidroeléctrico, suministro de agua y evaluación de la calidad del agua y la evaluación de los hábitats de los ríos.

La unidad de tiempo básico que se utiliza en la preparación de una curva de flujo-duración afectará en gran medida su apariencia. Para la mayoría de los estudios, se utilizan las descargas diarias medias. Esto le dará una curva pronunciada. Cuando se utiliza el flujo medio durante un largo período (como flujo mensual media), la curva resultante será más plana debido al promedio de los picos a corto plazo con intervenir flujos más pequeños durante un mes. Los valores extremos se promedian cada vez más, como el período de tiempo se hace más grande.

Paso 1: Ordenar (rango) los caudales promedio diario de periodo de registro desde el valor más alto al valor más pequeño, con un total de n valores.

Paso 2: Asignar cada valor de descarga de un rango (M), comenzando con 1 para el valor más grande de descarga diaria.

Paso 3: Calcular el porcentaje de flujo mediante la siguiente ecuación.

$$P_t = \frac{M}{n} \times 100 \quad (2.12)$$

Donde P_t es el Porcentaje de tiempo de permanencia del flujo, M es el rango y n es el número total de eventos

2.4. La energía y potencia de corrientes de agua

La potencia es no de los parámetros que mas importancia tienen en el tratamiento de cualquier fuente de energía. En el caso de turbinas hidrocínicas, la potencia está directamente relacionada con el flujo de agua que la turbina puede interceptar y transformar

en energía mecánica. A interceptar se refiere a una cierta cantidad de agua en un área de tamaño “A” conocida como área de barrido por el rotor e indica el espacio físico que ocupa la turbina.

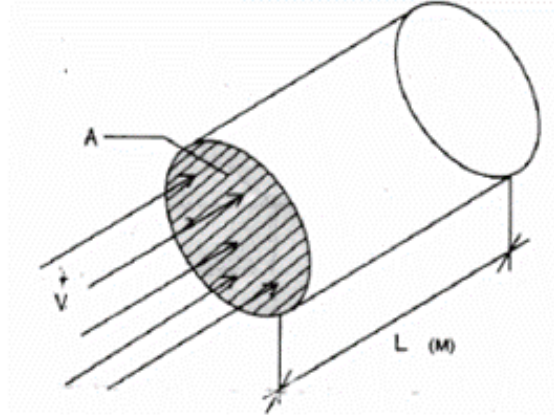


Figura 2.9: Área barrida

En esta área se realiza la transformación de la energía cinética del agua EC en potencia mecánica P , para que posteriormente sea entregada al generador a través del eje de la turbina. La energía cinética del agua ocasionada por una masa de agua en movimiento se puede calcular con la Ec. 2.13:

$$EC = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.13)$$

Donde m es la masa del agua, kg y v es la velocidad instantánea del agua, m/s.

Sabiendo que la masa de esta cantidad de agua es igual a $m = \rho V$ donde el volumen $V = AL$ y la longitud $L = vt$, la Ec. 2.13 se transforma de la siguiente manera.

$$Ec = \left(\frac{1}{2}\right) \rho Vv^2 = \frac{1}{2}\rho ALv^2 = \frac{1}{2}\rho Avtv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3t \quad (2.14)$$

Por tanto, al dividir la Energía Cinética entre el tiempo obtenemos la Potencia teórica de un flujo de agua P representada por:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.15)$$

En una turbina que aprovecha esta energía no es posible extraer toda la potencia de la corriente de agua, esto es debido a dos razones principalmente:

1. La número uno es que para que el agua otorgue toda la energía cinética disponible, esta se tendría que detener, lo que claramente no se puede hacer o lograr en un flujo libre.

2. Y la numero dos se debe usar algun tipo de rotor para la turbina y pueda convertir la energía cinética del agua en potencia del eje y este rotor tiene muchas limitación por las fuerzas de arrastre que disiparan un la energía.

Añadiendo una constante para representar la eficiencia de conversión del flujo en potencia en el eje de la turbina, la Ec. 2.15 anterior se puede escribir:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2.16)$$

Dónde C_p representa el coeficiente de potencia que se determina con la teoría del calculo del rotor que se vera en secciones mas adelante.

2.5. Modelos reducidos

La naturaleza presenta numerosos fenómenos que, debido a su complejidad, aún no hemos logrado reproducir con precisión mediante modelos matemáticos adecuados. Este desafío es particularmente evidente en situaciones donde, a pesar de contar con la experiencia de especialistas y la utilización de avanzados modelos numéricos, la incertidumbre en los resultados de un diseño puede ser tan significativa que se vuelve necesaria la creación de un modelo a escala. Este modelo a escala se define como una representación que intenta emular con la mayor fidelidad posible el comportamiento real del prototipo original.

La decisión de construir modelos reducidos se justifica especialmente en aquellos casos donde la incertidumbre es considerable y el costo del prototipo es elevado. Estos modelos han sido y continúan siendo herramientas esenciales en campos como la mecánica de fluidos, pero su aplicación requiere un entendimiento profundo de los problemas que se están investigando. Sin este conocimiento, existe el riesgo de que los resultados obtenidos sean poco representativos de la realidad. Por lo tanto, el modelo a escala debe ser capaz de duplicar adecuadamente los fenómenos que se desean estudiar y las variables que les afectan.

Para abordar de manera efectiva el estudio de los modelos reducidos, es fundamental introducir el concepto de análisis dimensional. Este enfoque permite simplificar el problema al reducir la cantidad de variables involucradas, expresando las demás en función de aquellas que se consideran fundamentales. Este método no solo facilita el entendimiento del fenómeno en estudio, sino que también mejora la precisión y la relevancia de los modelos desarrollados.

2.5.1. Análisis dimensional

El objetivo del análisis dimensional es el de determinar la relación de dependencia existente entre una variable con una serie de parámetros que gobiernan una situación,

en este caso de flujo, sin que sepamos la solución analítica del problema analizado. El análisis dimensional permite, entre otras utilidades, construir modelos de un prototipo y analizarlo sometido a condiciones equivalentes a las de dicho prototipo. El análisis dimensional permite expresar una serie de magnitudes físicas en función de otras que consideramos fundamentales.

2.5.2. Semejanza hidráulica

Como se mencionó anteriormente, el costo de construcción de ciertas obras puede ser extremadamente elevado, y el comportamiento real de estas frente a distintas situaciones puede conllevar un grado de incertidumbre significativo. Sin embargo, esta incertidumbre puede ser considerablemente disminuida mediante la modelización previa a la construcción de un modelo a escala, lo que permite prever y analizar cómo podría comportarse el prototipo en condiciones reales.

El costo asociado a la realización de un modelo a escala constituye una pequeña parte del total del presupuesto de la obra. Esta inversión inicial puede resultar muy beneficiosa, incluyendo reducciones en el costo de ejecución gracias a la optimización del diseño y la identificación de posibles problemas antes de la construcción. Esto no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también puede conducir a un ahorro significativo en recursos económicos y tiempo.

La relación entre una magnitud física en el prototipo y su correspondiente en el modelo se denomina "semejanza". Esta relación se expresa en las mismas unidades y se representa mediante la variable λ .

La comprensión de la semejanza es crucial, ya que permite establecer las condiciones necesarias para que el modelo a escala reproduzca de manera fiel el comportamiento del prototipo, asegurando así que los resultados obtenidos sean válidos y aplicables a la realidad.

Para que los resultados del modelo puedan proyectarse sobre el prototipo se han de cumplir estas tres condiciones:

- Relación de semejanza geométrica como dimensiones lineales.
- Relaciones de semejanza cinemática como velocidades.
- Relaciones de semejanza dinámica como fuerzas.

Decimos que existe semejanza geométrica si todas las dimensiones del cuerpo en las tres coordenadas tienen la misma razón escalar lineal, es decir, las formas son las mismas independientemente del tamaño. Estas magnitudes son la longitud L , el área L^2 y el volumen L^3 .

Para una similitud geométrica entre el modelo y el prototipo se debe cumplir el número de Froude para garantizar que las condiciones son iguales.

La similitud obtenida para un canal de riego es: Dimensión lineal

$$\frac{L_p}{L_m} = \lambda \quad (2.17)$$

Áreas

$$\frac{A_p}{A_m} = \lambda^2 \quad (2.18)$$

Volumen

$$\frac{V_p}{V_m} = \lambda^3 \quad (2.19)$$

Tiempo

$$\frac{t_p}{t_m} = \lambda \quad (2.20)$$

Velocidad

$$\frac{V_p}{V_m} = \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

Caudales

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \lambda^{\frac{5}{2}} \quad (2.22)$$

2.6. Tipos de Difusores

Los difusores se dividen principalmente en 2 categorías; difusores anulares y difusores verticales. La elección de cada tipo depende del tipo de rotor con el que se cuenta, con la geometría de cada uno y también con las velocidades de flujo presentes en el lugar de instalación. A continuación, se detallarán algunos tipos de difusores.

Difusor Anular de Plancha Plana mostrado en la Fig. 2.10, es construido en base a planchas de espesor despreciable, moldeadas de manera que el corte en su forma genere cierta fuerza de sustentación por su curvatura, no es una forma recomendable de construir un difusor ya que los beneficios hidrodinámicos son mínimos.

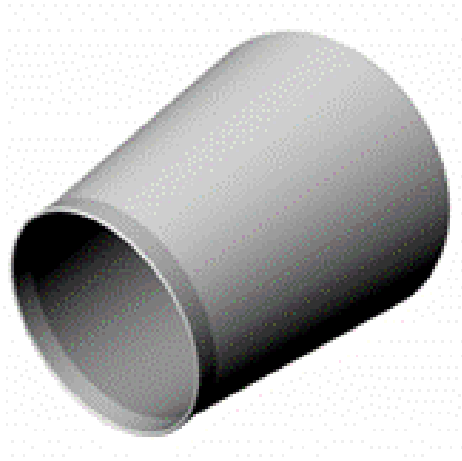


Figura 2.10: Difusor Anular de Plancha Plana

Difusor Anular de Sección Hidrodinámica. En este caso, el difusor si cuenta con una sección de perfil hidrodinámico. Es recomendación realizar los perfiles hidrodinámicos en base a perfiles conocidos, como es el caso de los NACA, ya que esto facilita la reproducción de las geometrías y permite un lenguaje universal al tratar con la numeración estándar. El difusor anular mostrado en la Fig. 2.11 fue generado por la revolución de un perfil NACA 10510.

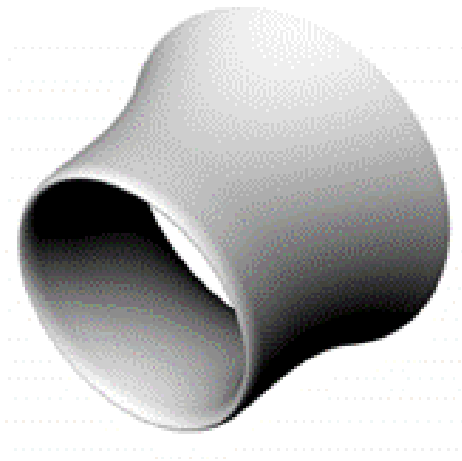


Figura 2.11: Difusor Anular de Sección Hidrodinámica

Difusor Anular con Flange. Este dispositivo mostrado en la Fig. 2.12 cuenta con una gran curvatura en su salida, o bien una plancha anular totalmente perpendicular a este, la cual teóricamente genera una región de baja presión en las inmediaciones de la salida del difusor por formación de vórtices, induciendo un mayor flujo de masa a la turbina.

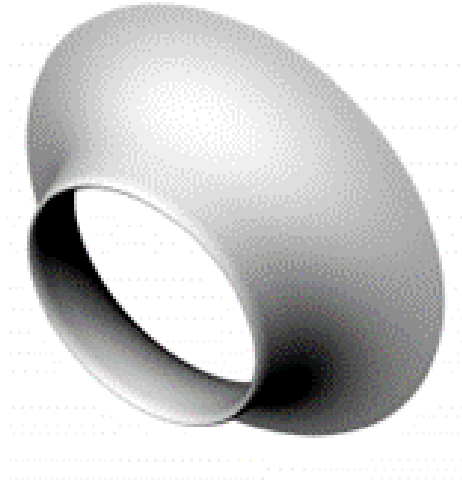


Figura 2.12: Difusor Anular con Flange

Difusor Anular de Múltiples Elementos El objetivo de esta configuración es que por los espacios entre los perfiles hidrodinámicos ingrese un flujo acelerado, el cual genera en el perfil siguiente una capa límite turbulenta más delgada, favoreciendo el amortiguamiento de la separación del flujo, en ejemplo es el mostrado en la Fig. 2.13.

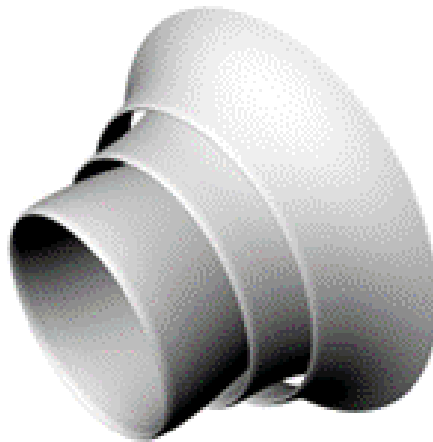


Figura 2.13: Difusor Anular de Múltiples Elementos

De acuerdo con [14] el Difusor Anular de Sección Hidrodinámica presenta los mejores resultados gracias al análisis computacional que realizo en cada uno de ellos.

2.7. Calculo del rotor

Uno de los componentes mas importante de la turbia es el rotor, su principal función es extraer una parte de la energía cinética del agua y convertirla en energía mecánica que posteriormente será entregada por el rotor a un generador eléctrico. El rotor puede

construirse por dos o tres palas con una sección transversal en forma de perfil aerodinámico. Uno de los problemas con mayor relevancia en términos de la confiabilidad y durabilidad de los rotores es el problema de la fatiga.

En la práctica nunca será posible extraer toda la potencia disponible del fluido en movimiento, esto por dos sencillas razones:

- Para que el agua ceda toda su energía cinética tendría que detenerse por completo, lo que claramente no es posible de lograr en un flujo libre.
- Se debe usar alguna clase de rotor de turbina para convertir la energía cinética del agua en potencia del eje y este está limitado por ser un tema de fuerzas de arrastre que disiparan un poco de la energía.

Entonces es necesario añadir una constante que representaría la eficiencia de conversión del flujo del agua en potencia sobre el eje esta dada por la Ec. (2.23).

$$P_{eje} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (2.23)$$

2.7.1. Teorías Aerodinámicas en Aeroturbinas

Para analizar cualquier máquina que funcione con un fluido, es fundamental entender el concepto de volumen de control. Este volumen define el área en donde se aplicarán los principios de conservación de la mecánica de medios continuos, como el teorema de conservación de la cantidad de movimiento y el teorema de conservación del momento cinético.

Teoría de la cantidad de movimiento lineal

Esta teoría utiliza un modelo simplificado del rotor eólico para ilustrar el intercambio de energía que ocurre cuando el viento pasa a través del aerogenerador. Se considera una turbina ideal, que tiene un número infinito de palas y se representa como un disco sin espesor, con un área equivalente a la superficie barrida por las palas en movimiento. Este modelo se conoce como disco actuador. Fig. 2.14

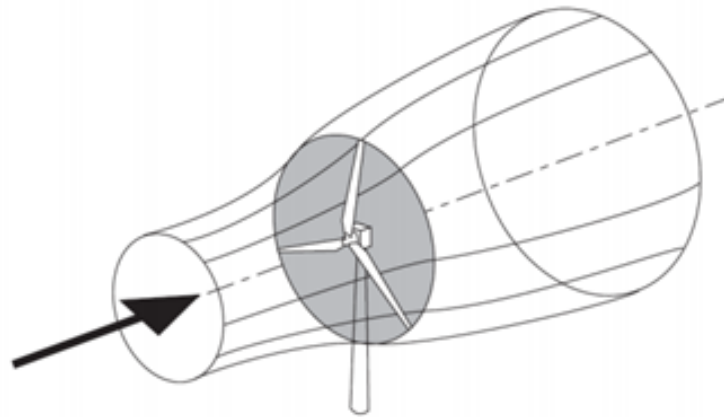


Figura 2.14: Tubo de corriente y disco actuador

Al simplificar analizar esta teoría resulta un valor llamado coeficiente de Betz, quien lo dedujo en 1927 [15] y expresa que, de la potencia disponible en la corriente de aire, sólo puede extraerse un 59.3

Teoría del disco actuador con estela giratoria

Este modelo corrige el anterior al incluir el efecto de la rotación del molino sobre la estela del viento Fig. 2.15. Dado que el intercambio de energía entre el viento y la turbina ocurre a través del movimiento giratorio, y según la teoría de conservación del momento cinético, el par que el viento aplica al rotor será igual y opuesto al que el molino ejerce sobre las partículas de aire.

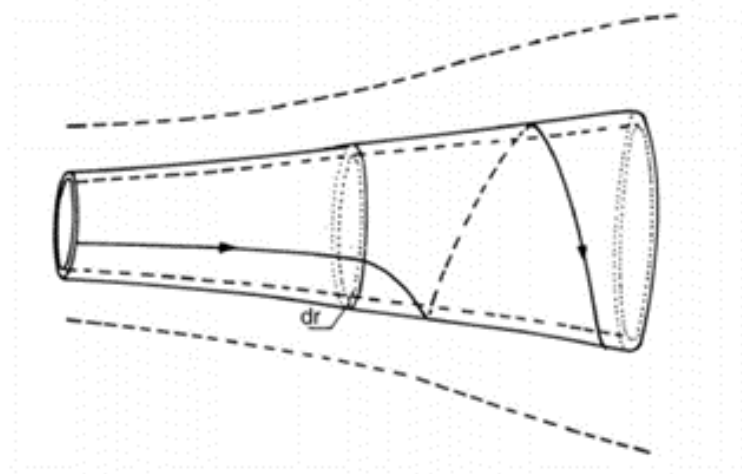


Figura 2.15: Tubo de corriente y disco actuador con estela giratoria.

En este caso, puesto que se tiene en cuenta que el rotor está girando, las leyes de conservación se deberán aplicar sobre un anillo del tubo de corriente de espesor diferencial y área $2\pi r dr$.

Teoría del elemento diferencial de pala

El modelo del elemento pala es un método que considera la existencia de palas con sus coeficientes aerodinámicos que interactúa con el fluido [16]. Inicialmente fue desarrollado por Froude y Taylor y consiste en una división del rotor en múltiples palas que a su vez se divide en pequeñas secciones diferenciales en las que se calcula fuerzas tangenciales y normales al plano de giro. Después, estas fuerzas se integran a lo largo de la pala para conocer las fuerzas producidas por el rotor.

Los coeficientes aerodinámicos de un perfil concreto vienen dados por su forma y varían con el ángulo de ataque Fig. 2.16.

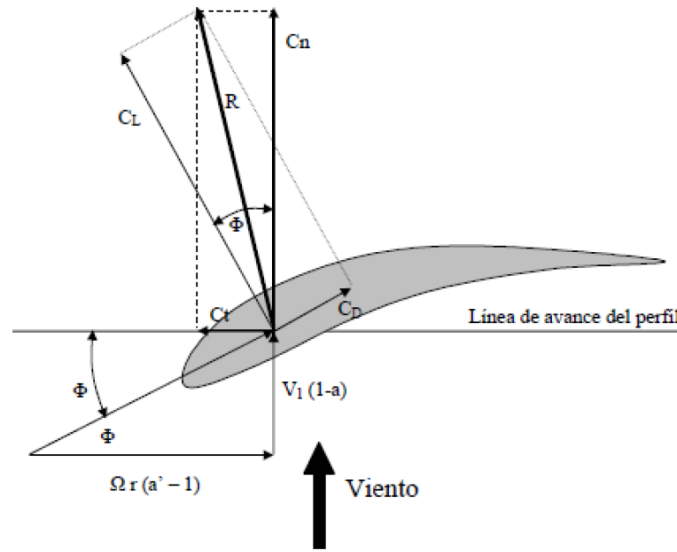


Figura 2.16: Fuerzas aerodinámicas sobre un perfil

2.7.2. Proceso del calculo

Los cálculos se efectuarán analizando el rotor en un número determinado de secciones entre el radio de acoplamiento de la pala con el cubo, y el radio exterior del rotor, definiendo tramos de igual longitud. Los pasos a seguir son:

1. Partiendo del radio r_i de la sección genérica se determina la velocidad específica en cada una de las secciones de la pala (λ_i):

$$\lambda_i = \frac{\omega r_i}{v} = \frac{\pi n r_i}{30v} \quad (2.24)$$

2. Con λ_i podemos determinar el factor de inducción axial a lo largo de la pala (a_i):

$$a_i = \sqrt{\lambda_i^2 + 1} \cos \left(\frac{1}{3} \arctan(\lambda_i) + \frac{\pi}{3} \right) \quad (2.25)$$

3. Utilizando λ_i y a_i se puede determinar el coeficiente de rotación inducida (h_i), que es fundamental para calcular la rotación inducida a lo largo de la pala. Este coeficiente refleja el incremento en la velocidad de giro del viento tras pasar por el rotor. La fórmula para calcular h_i es la siguiente:

$$h_i = \sqrt{1 + \frac{1 - a_i^2}{\lambda_i^2}} \quad (2.26)$$

4. Evaluamos el ángulo de inclinación para cada sección de la pala (θ_i):

$$\theta_i = \arctan \left(\lambda_i \frac{1 + h_i}{1 + a_i} \right) \quad (2.27)$$

5. Se determina el producto $Q_i = C_L c_i$ donde se ha supuesto flujo ideal, $B = \text{Numero de palas}$

$$Q_i = \frac{8\pi r_i (1 - a_i) \sin^2 \theta_i}{B(1 + a_i) \cos \theta_i} \quad (2.28)$$

6. Conocidos θ_i y la cantidad Q_i , podemos determinar el ángulo de calado (β_i) y la cuerda (c_i).

$$c_i = \frac{Q_i}{C_L} \quad (2.29)$$

$$\beta_i = \theta_i - \alpha_i \quad (2.30)$$

Para esto necesitamos conocer los parámetros C_L y α que dependen de perfil aerodinámico. Tenemos que calcular el número de Reynolds para cada sección, ya que, dependiendo de este número, van a variar las curvas polares del perfil, es decir, los valores de los coeficientes de sustentación (C_L) y de resistencia (C_D) en función del ángulo de ataque (α), estos los obtenemos con ayuda del software QBLADE.

El número de Reynolds es calculado por la Ec. (2.31)

$$Re = \frac{w_i c_i}{\nu} \quad (2.31)$$

Donde: w_i = es la velocidad relativa en la sección del álabe. c_i = longitud de la cuerda en la sección del álabe. ν = es la viscosidad cinemática del agua

Como tenemos 2 variables en una misma ecuación, el Re y la cuerda c , se realiza un proceso iterativo para encontrar su valor descrito de la siguiente forma:

Paso 1.- Proponer un valor inicial de $C_L = 1$ y determinar la cuerda c . Paso 2.- Calcular el Re utilizando la cuerda encontrada. Paso 3.- Se introducen los datos del perfil y el Re en el software QBLADE para determinar el valor en donde C_L/C_D sea máxima para

diferentes ángulos de ataque α . Paso 4.- con el nuevo valor de C_L determina nuevamente el valor de c y se repite el proceso hasta que la cuerda C_L , c y α no cambien.

2.8. Estado del Arte

En la actualidad, el desarrollo de turbinas hidrocinéticas ha sido un área de investigación creciente debido a su capacidad de generar energía renovable sin la necesidad de grandes infraestructuras hidroeléctricas. A diferencia de las turbinas convencionales, estas no requieren presas ni saltos de agua, lo que las hace particularmente adecuadas para aplicaciones en canales de riego y cuerpos de agua de bajo caudal. Sin embargo, su implementación en canales artificiales aún es limitada, lo que representa una oportunidad de investigación.

Investigaciones previas han demostrado que las turbinas de flujo axial ofrecen mayores eficiencias debido a su similitud con los aerogeneradores.

En 1976 William J. Mouton y colegas [17] patentó el diseño de una turbina flotante llamada "River Turbine" con la idea de diseñar turbinas de aprovechamientos cinéticos capaces de trabajar con pocas condiciones, mostrada en la Fig. 2.17.

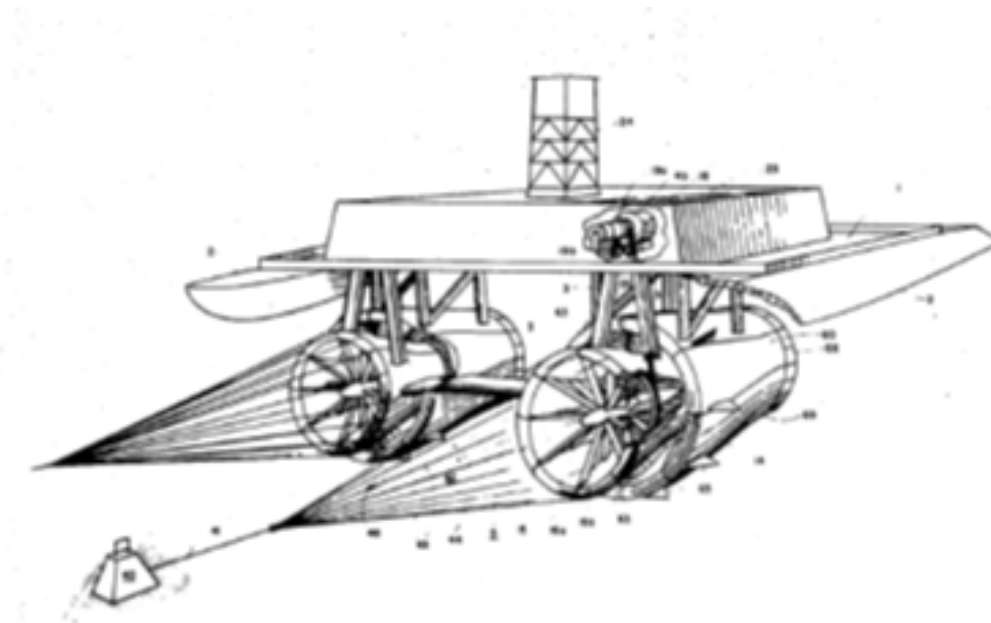


Figura 2.17: Diagrama de Sankey.

Estudios como los de [18] han explorado el uso de turbinas hidrocinéticas con conductos para mejorar la captación de energía en corrientes de baja velocidad. Además, el trabajo de [19] destaca que la aplicación de difusores puede incrementar la potencia capturada hasta en un 65 %, lo que respalda la importancia de optimizar estos dispositivos en el diseño de turbinas.

Diversos estudios han validado el uso de estos dispositivos en aplicaciones marinas y fluviales. [20] demostró que los difusores de perfil NACA optimizados pueden incrementar la eficiencia global del sistema, reduciendo las pérdidas aerodinámicas y maximizando la captación de energía.

El uso de turbinas hidrocínéticas en canales de riego ha sido menos explorado en comparación con su aplicación en ríos y sistemas mareomotrices. Investigaciones como la de [21] analizaron la viabilidad de turbinas en canales de riego en Malasia, destacando que las condiciones hidrodinámicas en estos entornos requieren diseños específicos para maximizar la generación de energía.

En el contexto de México, hay escasa investigación sobre el aprovechamiento hidrocínético de los canales de riego, a pesar de que el país cuenta con una extensa red de canales artificiales. Este trabajo busca llenar este vacío académico mediante el diseño y validación experimental de una turbina optimizada para estos entornos.

Estudios como el de [22] han demostrado que las herramientas CFD pueden predecir con alta precisión la eficiencia del rotor y el impacto del diseño de difusores en el flujo. Complementariamente, experimentos en modelos a escala han permitido validar los resultados numéricos y mejorar el diseño de los sistemas hidrocínéticos antes de su implementación a gran escala.

Uno de los principales beneficios de las turbinas hidrocínéticas es su bajo impacto ambiental. A diferencia de las grandes presas hidroeléctricas, estas turbinas no afectan significativamente el caudal de los ríos ni impiden la migración de especies acuáticas. Estudios como el de [23] han evaluado el impacto de turbinas en la fauna acuática y han concluido que, con diseños adecuados, se minimizan los efectos adversos.

Desde una perspectiva social, la electrificación rural mediante turbinas hidrocínéticas representa una solución viable y de bajo costo para comunidades alejadas de la red eléctrica. Investigaciones en Argentina y Brasil han demostrado que estas tecnologías pueden integrarse con sistemas solares para proporcionar una fuente de energía continua.

Capítulo 3

Metodología

En la Fig. 3.1 se ilustran los diferentes procesos de conversión de energía que se planean implementar para aprovechar la energía disponible proveniente de un canal de riego, procederemos a analizar cada uno de ellos.

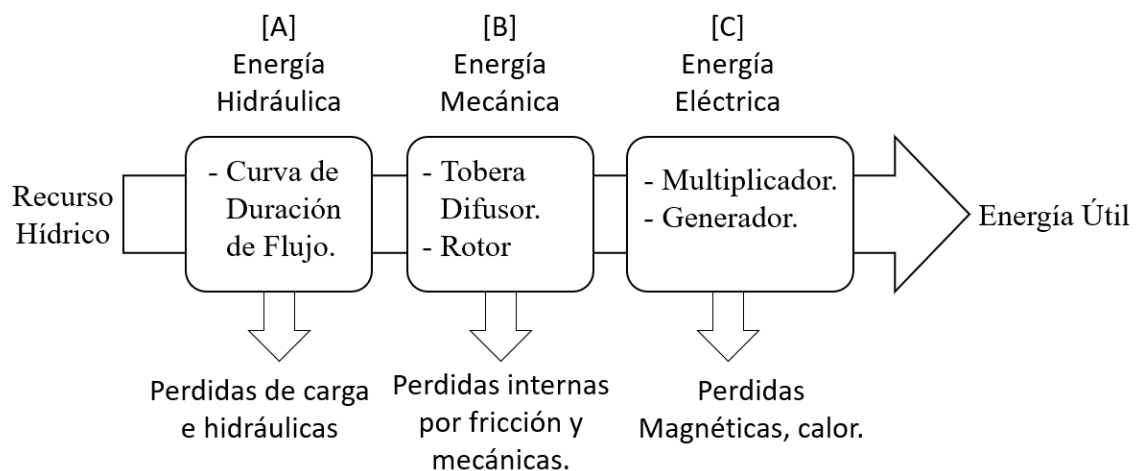


Figura 3.1: Proceso de transformación de la energía.

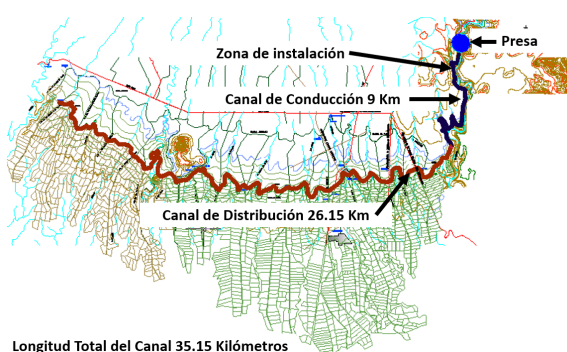
Con base en la disponibilidad del recurso hídrico a lo largo del año, se estima la cantidad de energía hidráulica en el punto A. En el punto B, se determina la energía mecánica obtenida gracias al rotor, el cual utiliza un dispositivo llamado tobera-difusor. Este componente tiene como objetivo mejorar la eficiencia de la turbina al aumentar la energía cinética del agua [24]. Las propiedades del álabe del rotor se calcularán usando la teoría de Blade Element Momentum (BEM) [25]. En el punto C, se procederá a elegir un generador de imanes permanentes que sea adecuado para turbinas de baja velocidad, y se finaliza obteniendo la potencia eléctrica generada por la turbina.

3.1. Recurso Hídrico

La presa “Centenario de la Revolución Francisco J. Mujica”, supervisada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y perteneciente a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Dirección de Gestión Forestal, es una de las infraestructuras de riego más significativas construidas en los últimos 25 años en el estado de Michoacán, México.

Este proyecto multifuncional tiene como propósito principal el riego agrícola y forma parte del Distrito de Riego 097, que abastece de agua aproximadamente a 87,000 hectáreas.

Además, cuenta con un canal de poco mas de 35 kilómetros de longitud como se muestra en la Fig.3.2(a), este canal facilita el riego en 12,200 hectáreas principalmente a través de gravedad, beneficiando a los municipios de Huacana, Parácuaro y Múgica, donde se encuentran diversas comunidades mencionadas en la Tabla3.1 [26]. Sin embargo, ante la disponibilidad de este recurso hídrico, surge la necesidad de investigar cuánta energía eléctrica se podría extraer con una turbina hidrocínética sin alterar sus características ni su función principal, minimizando así el impacto ambiental. Fig.3.2(b)



(a) Mapa del canal



(b) Canal de riego

Figura 3.2: Recurso Hídrico

Las centrales hidroeléctricas que tienen un tamaño considerable suelen contar con grandes represas y deposito de agua que producen elevada potencia energética, pero enfrentan críticas importantes por sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Por otro lado, las instalaciones hidroeléctricas de menor escala generalmente no disponen de capacidad para el almacenamiento [27], lo que las limita a aprovechar únicamente la energía cinética del agua. Por ello, se diseñará una turbina hidrocínética que demuestre el potencial de generación de energía eléctrica para las comunidades rurales cercanas a este recurso hídrico en Michoacán, México.

Tabla 3.1: Localidades en cruce del canal de riego.

Municipio	Localidad/Ejido
La Huacana	El Naranjo de Tziritzícuaró
Múgica	Nueva Italia
	El Ceñidor
	Gámbara
	El Letrero
Parácuaro	Llanos de Antúnez
	Los pozos

3.2. Evaluación de la energía hidráulica en el canal

El de predecir el recurso hídrico es un aspecto de gran importancia para la generación de energía utilizando la tecnología hidrocínética. Partiendo de los estudios anuales sobre los cultivos que serán regados [28], se obtuvieron los datos sobre los caudales mensuales de riego con los que partiremos para analizar la cantidad de energía hidráulica que se tiene disponible en el canal en el año. Tabla 3.2

Tabla 3.2: Módulos medios mensuales de riego

Módulos medios mensuales de riego (m ³ /s)	
Enero	7.209
Febrero	8.109
Marzo	8.982
Abril	9.255
Mayo	9.751
Junio	7.542
Julio	6.054
Agosto	5.985
Septiembre	5.535
Octubre	6.803
Noviembre	7.756
Diciembre	7.377

Es importante mencionar que si cambia el caudal en el canal, también cambia su profundidad así como la velocidad del fluido. Considerando esto, se utilizara el procedimiento conocido como Curva de Duración de Flujo-[29] para estimará el porcentaje de tiempo que un determinado caudal estará disponible a lo largo del año.

A partir de esto se tiene que seleccionar el caudal que aporte la mayor cantidad de energía a lo largo del año. Es necesario tener en cuenta la profundidad y la velocidad del canal para cada uno de los caudales.

El canal de la presa que se va a estudiar tiene con una sección trapezoidal como podemos ver en la Fig. 3.3 donde la definición de las propiedades y elementos geométricas que lo conforman son muy importantes para realizar el cálculo de la profundidad y también de la velocidad, [30].

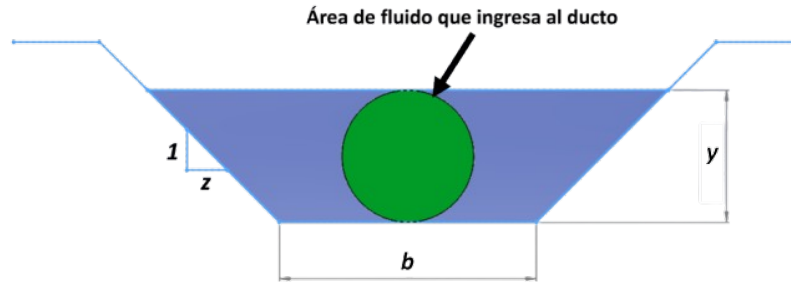


Figura 3.3: Propiedades geométricas.

La profundidad del canal se determina por el tirante (y), que se define como la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie del agua. El talud (Z) representa el ángulo de inclinación de los lados que conforman la estructura del canal en relación con la horizontal. La base (b) se refiere a la longitud de la parte inferior del canal, también conocida como el ancho de solera.

La zona circular en color verde que se ilustra representa el área barrida por el rotor, se calcula considerando el diámetro igual al tirante y . Dado que el caudal varía a lo largo del año, es fundamental realizar un análisis para obtener los parámetros que nos permitan estimar la energía total generada por cada caudal.

Al tener estos resultados, se podrá seleccionar la velocidad y el diámetro del rotor que mas energía aprovecha de la corriente de agua del canal.

3.3. Conversión a Energía Mecánica.

Según [24], el uso de una tobera-difusor puede mejorar la eficiencia de la turbina en un 65 % o más, al aumentar la energía cinética del agua. Este aumento en la energía es aprovechado por el rotor, que será diseñado utilizando la teoría del *Blade Element Momentum* (BEM) [25].

3.3.1. selección de la Tobera difusor

En los canales, se han instalado turbinas abiertas similares a las turbinas eólicas convencionales, las cuales aprovechan la energía del flujo de agua conforme a los límites

establecidos por la teoría de Betz. Esto se debe a que, al reducirse la velocidad del flujo sin alterar la presión, las líneas de corriente se expanden para mantener la continuidad. No obstante, al incorporar un ducto en el rotor, los límites del flujo quedan claramente definidos, restringiendo dicha expansión. Como resultado, la energía se extrae principalmente a partir de la caída de presión, haciendo que la turbina funcione más como una de bajo salto que como una eólica tradicional, [31]. Sin embargo, la presencia del ducto provoca efectos hidrodinámicos en el sistema, lo que puede modificar el perfil de velocidades. Por ello, para determinar con mayor precisión la energía hidráulica disponible para el rotor, se llevará a cabo una medición experimental de la velocidad del flujo dentro de la tobera-difusor.

3.3.2. Modelo experimental para obtención de velocidades

Para evaluar el aumento de la velocidad real en el interior de la tobera-difusor, se construirá un modelo a escala del difusor y del canal para realizar mediciones experimentalmente.

La técnica de medición conocida como *Velocimetría de Imágenes por Partículas* (VIP). Se trata de una técnica de medición óptica que no altera el flujo natural del agua. Consiste en introducir pequeñas partículas trazadoras, que poseen características físicas similares a las del agua, para que reproduzcan con precisión la dinámica del fluido [32]. Estas partículas son iluminadas mediante un láser plano en la sección que se desea estudiar y son registrada a través de una serie de imágenes obtenidas por una cámara de alta velocidad.

Para permitir que el láser ilumine el interior del difusor y que la cámara pueda captar las partículas, será necesario fabricar el difusor y el canal con un material transparente, lo que facilitará las mediciones.

Con el resultado de estas mediciones, obtendremos tanto la velocidad como el diámetro lo que nos permitirá proceder al cálculo de las aspas del rotor para la turbina hidrocínética.

3.3.3. Diseño de los álabes del rotor

El cálculo del rotor se basa en la aplicación de diversas teorías que permiten interpretar cómo el agua transfiere potencia a través de este. Para ello, se empleará la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento junto con el Límite de Betz, que facilita el planteamiento del balance general de fuerzas sobre el rotor mediante el concepto de disco poroso, estableciendo el máximo teórico de extracción de energía del flujo. Además, se aplicará la teoría del momento cinético para considerar el intercambio de momento entre el flujo de agua y el rotor. Junto con esta, se utilizará la teoría turbillonaria alrededor del rotor, lo que permitirá deducir el campo de velocidades. Finalmente, la teoría

del elemento de pala se incorporará para incluir los parámetros geométricos de las palas en el proceso de captación de energía, [33].

3.4. Conversión en Energía Eléctrica

Un generador eléctrico síncrono de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés) se presenta como una opción recomendable para el acoplamiento directo al rotor. Su diseño y proceso de fabricación son bastante sencillos, lo que su costo en el mercado es relativamente bajo. Además, estos generadores funcionan de manera silenciosa, lo cual es una gran ventaja en entornos donde el ruido es una consideración importante. Otra de sus características destacadas es su capacidad para generar electricidad incluso a bajas velocidades de rotación. Más allá de estos beneficios, es relevante señalar que los PMSG no requieren un sistema de excitación externo, lo que simplifica aún más su operación y mantenimiento. [34, 35] Según diversos estudios sobre el diseño de generadores de imanes permanentes, se ha comprobado que es posible producir energía de forma eficiente a bajas revoluciones por minuto, lo cual amplía su atractivo en aplicaciones de energía renovable, especialmente en sistemas de energía hidroeléctrica de pequeño tamaño.[36]

No obstante, para maximizar la eficiencia de estos generadores, es fundamental realizar un análisis de un sistema multiplicador de velocidades. Este tipo de sistema permite aumentar la velocidad de rotación del generador, asegurando así que se alcance el rango óptimo de operación. Por lo tanto, se deberá llevar a cabo una evaluación para seleccionar el generador más adecuado del mercado, en función de las necesidades específicas de producción de energía y de las condiciones operativas del lugar de instalación.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Estimación de la energía Hidráulica

Como se mencionó en la metodología, si cambia el caudal en el canal, también va a cambiar su profundidad y por lo tanto también puede cambiar la velocidad del fluido por lo que, utilizando el procedimiento de la "Curva de Duración de Flujo" se estima el porcentaje de tiempo que un determinado caudal estará disponible a lo largo del año.

En la Tabla 4.1 se muestra ordenado el proceso de análisis utilizando la Curva de Duración de Flujo.

Tabla 4.1: Tabla de FDC

Paso 1	Paso 2	Paso 3
Ordenar Caudal	Rango de duración	Cálculo de porcentaje
9.751	1	8.33
9.255	2	16.67
8.982	3	25
8.109	4	33.33
7.756	5	41.67
7.542	6	50
7.377	7	58.33
7.209	8	66.67
6.803	9	75
6.054	10	83.33
5.985	11	91.67
5.535	12	100

Como resultado, la Fig. 4.1 muestra que sólo el 8.3 % del año se tendrá disponible del máximo caudal en el canal y el caudal que se tendrá disponible todo el año será de 5.535 m³/s.

A partir de esto se tiene que analiza el caudal de diseño que mas energía puede aportar en todo el año.

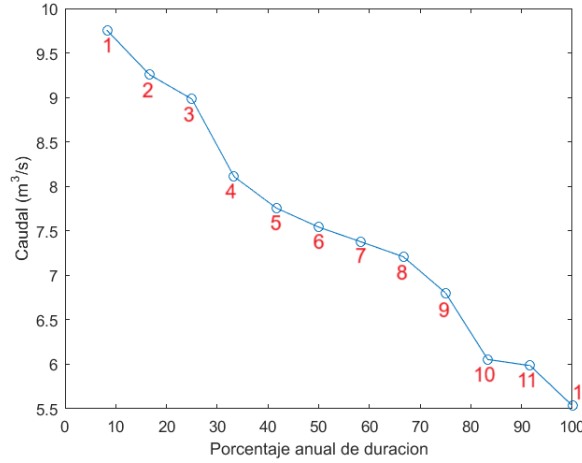


Figura 4.1: Curva de Duración de Flujo (FDC)

Según la información proporcionada por el personal de la presa, se ha determinado que la base del canal b mide 3 metros, el talud Z tiene un valor de 1, la rugosidad del material n es de 0.014, y la pendiente de la línea de energía S_0 es 0.0002. Además, el caudal Q se conoce a través de los módulos de riego.

Utilizando las ecuaciones fundamentales para el diseño de un canal trapezoidal y las fórmulas empleadas para el cálculo del caudal, [30], se desarrolla un sistema de ecuaciones interrelacionadas, 4.1.

$$A = (b + Zy)y \quad (4.1a)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + Z^2} \quad (4.1b)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b + Zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + Z^2}} \quad (4.1c)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (4.1d)$$

$$Q = A \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (4.1e)$$

Donde R representa el radio hidráulico, P es el perímetro mojado, y A denota el área de la sección transversal que es perpendicular a la dirección del flujo. Al resolver el sistema de ecuaciones mediante el método no lineal *Generalized Reduced Gradient* (GRG) [37], se presentan en la Tabla 4.2 los valores de profundidad y velocidad que el flujo alcanza en el canal para cada caudal.

La potencia de una turbina hidrocínética que está completamente sumergida se calcula utilizando la Ec. (4.2), [38].

$$P = \frac{1}{8} \pi \rho D^2 V^3 \quad (4.2)$$

Tabla 4.2: Calculo de la Velocidad y Profundidad para el caudal.

No.	Caudal Q m^3/s	Área Hidráulica m^2	Perímetro Mojado m	Radio Hidráulico m	Espejo de Agua m	Velocidad m/s	Tirante (y) m
1	9.75	9.08	8.28	1.10	6.73	1.07	1.87
2	9.26	8.74	8.13	1.07	6.63	1.06	1.81
3	8.98	8.55	8.05	1.06	6.57	1.05	1.79
4	8.11	7.93	7.78	1.02	6.38	1.02	1.69
5	7.76	7.67	7.67	1.00	6.30	1.01	1.65
6	7.54	7.52	7.60	0.99	6.25	1.00	1.63
7	7.38	7.40	7.54	0.98	6.21	1.00	1.61
8	7.21	7.27	7.49	0.97	6.17	0.99	1.59
9	6.80	6.97	7.35	0.95	6.07	0.98	1.54
10	6.05	6.41	7.08	0.90	5.88	0.95	1.44
11	5.99	6.35	7.05	0.90	5.87	0.94	1.43
12	5.54	6.00	6.88	0.87	5.75	0.92	1.37

De acuerdo con [39], se determina la energía hidráulica anual correspondiente a cada nivel de profundidad a lo largo del año, y estos datos se presentan en la Tabla 4.3 en kWh. Esta es la energía que puede ser utilizada por la turbina hidrocínética para la generación de energía eléctrica.

Tabla 4.3: Energía hidráulica disponible en el caudal en el año.

No.	Energía unitaria Wh	Disponibilidad de caudal hr	Energía hidráulica al año kWh
1	1694.37	730	1236.89
2	1537.58	1460	2244.87
3	1454.08	2190	3184.43
4	1200.62	2920	3505.80
5	1104.12	3650	4030.03
6	1047.33	4380	4587.32
7	1004.44	5110	5132.69
8	961.57	5840	5615.58
9	861.37	6570	5659.18
10	689.34	7300	5032.20
11	674.35	8030	5415.03
12	580.18	8760	5082.38

La Tabla 4.3 indica que en el punto 9 se registra la mayor cantidad de energía hidráulica disponible, que alcanza los 5659.18 kWh. Este nivel se logra con un caudal disponible el 75 % del año, lo que equivale a 6570 horas.

4.1.1. Selección de la Tobera-difusor

Con el fin de incrementar la energía disponible en el canal de riego, se utiliza una tobera-difusor completamente sumergida considerando el diámetro máximo del ducto como la profundidad del canal.

La tobera difusor que se propone es mostrada en la Fig. 4.2, que de acuerdo con [14], utiliza un perfil aerodinámico NACA 10510 que está inclinando la cuerda 15° con respecto a la línea horizontal y además se rota 360° para formar el cono que adaptado a las mediciones de este canal tendría un diámetro de entrada de 1.019 m y en su salida de 1.54 m, estas medidas son por que debe quedar totalmente sumergida en el cana, el tirante mostrado en el punto 9 fue el seleccionado en la Tabla 4.2 y es de 1.54 m.

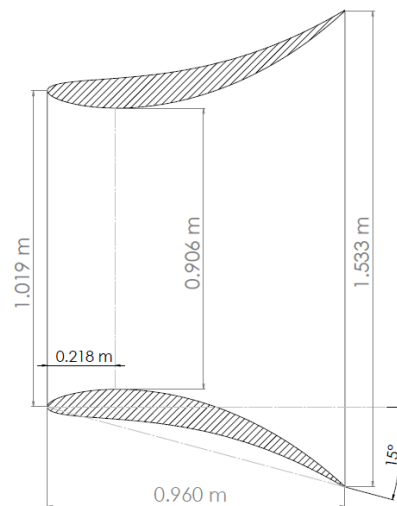


Figura 4.2: Dimensiones de la tobera-difusor perfil NACA 10510

4.1.2. Construcción del modelo experimental

El modelo experimental se construyó en el laboratorio de Termofluidos de la universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Con el equipo disponible y con los recursos existentes se toma la decisión de fabricar el modelo a una escala de 1:14.28 y utilizando la teoría de similitud dinámica manteniendo el número de Froude, que en nuestro caso es de $Fr=0.2907$, se obtuvo la similitud geométrica.

Como resultado, podemos ver en la Fig. 4.3 la mitad del modelo que será utilizado para realizar experimentación así como también puedes ver sus dimensiones.

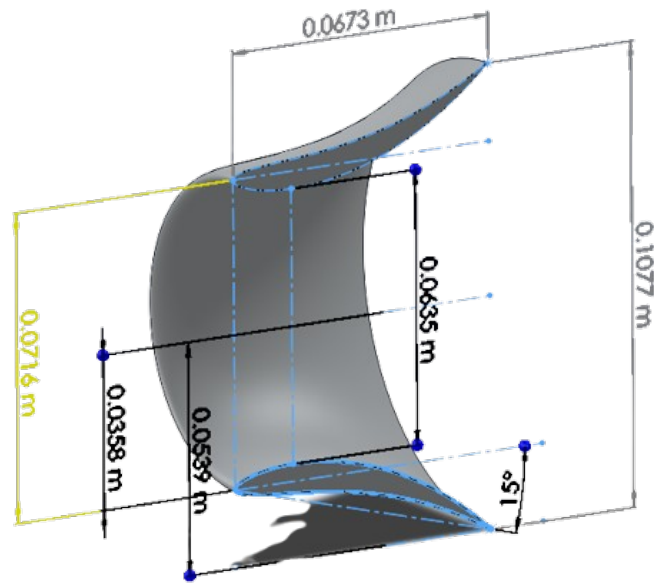


Figura 4.3: Corte del modelo de la tobera-difusor

La fabricación el difusor comienza con la impresión en 3D de un molde que mantendría la forma del difusor en la parte hueca para posteriormente rellenar con la resina cristal transparente, quedando como se muestra en la Fig. 4.4.

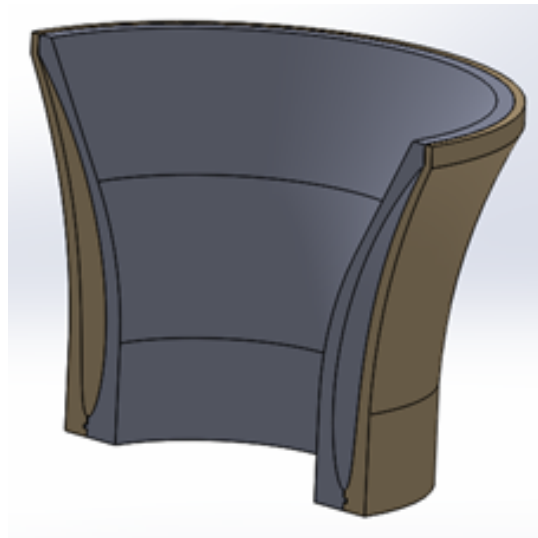


Figura 4.4: CAD del molde para el difusor

Después de imprimir el molde, se vacía con resina cristal para fabricar el difusor en dos partes Fig. 4.5.

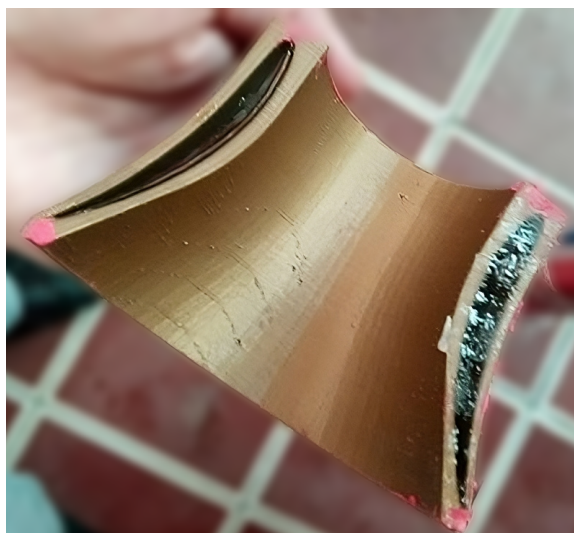


Figura 4.5: Vaciado con resina cristal

Finalmente después de secar la resina, el resultado final de las partes del difusor es el mostrado en la Fig. 4.6.



Figura 4.6: Mitades del Difusor transparente

Así mismo para fabricar el canal, en la Tabla 4.4 se observa la similitud que hay entre el canal en tamaño real y el modelo reducido que se calculó.

Tabla 4.4: Comparación entre el canal real y el modelo.

	Rugosidad (n)	Solera (b)	Caudal	Velocidad	Tirante (y)
	$\lambda^{(1/6)}$	λ	$\lambda^{(5/2)}$	$\lambda^{(1/2)}$	λ
		m	m ³ /s	m/s	m
Real	0.014	3	6.803	0.98	1.54
Modelo	0.00899	0.21	0.0089	0.2584	0.1078

Una de las variables fundamentales que debe considerarse en el modelo es la rugosidad del canal, la cual está determinada por el material con el que está construido dicho canal. La rugosidad puede obtenerse mediante el uso de las tablas de coeficientes de rugosidad de Manning. Afortunadamente, numerosos estudios han sido realizados por investigadores en este campo, quienes han analizado distintas situaciones de flujo y su interacción con las características físicas de los cauces y sus márgenes. A través de sus investigaciones, se ha logrado establecer una relación entre estas características y valores representativos del coeficiente de Manning. Estos coeficientes son cruciales, ya que permiten estimar la resistencia al flujo en el canal, lo que a su vez afecta la velocidad y el caudal del agua.

La tabla de valores del coeficiente de rugosidad n , [40], nos indica que el acrílico tiene un coeficiente de rugosidad entre 0.009 a 0.010 el cual es el ideal para nuestro modelo.

En la Fig. 4.7 se ve el proceso de fabricación del canal junto con los materiales utilizados.

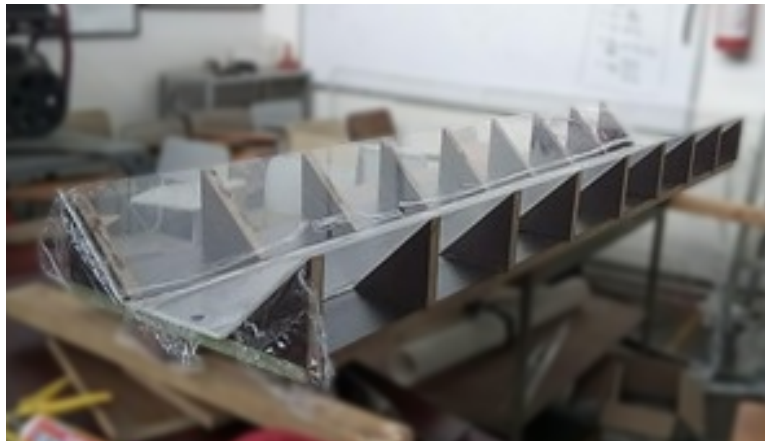


Figura 4.7: Construcción del modelo del canal

El caudal del modelo es de 8.9 litros por segundo, para este se usará la bomba mostrada en la Fig. 4.8(a) conectada a un controlador Fig. 4.8(b) con el que se ajustan las revoluciones, la tubería conectada a la bomba de PVC es de 4 pulgadas de diámetro, también se conectará un flujómetro Fig. 4.8(c) para calibrar las revoluciones de la bomba y que nos proporcione el caudal necesitado.



(a) Bomba revoluciones variables



(b) Controlador



(c) Flujómetro

Figura 4.8: Componentes de ensamble del modelo

Finalmente en la Fig. 4.9 se muestra el resultado del difusor colocado en el canal.



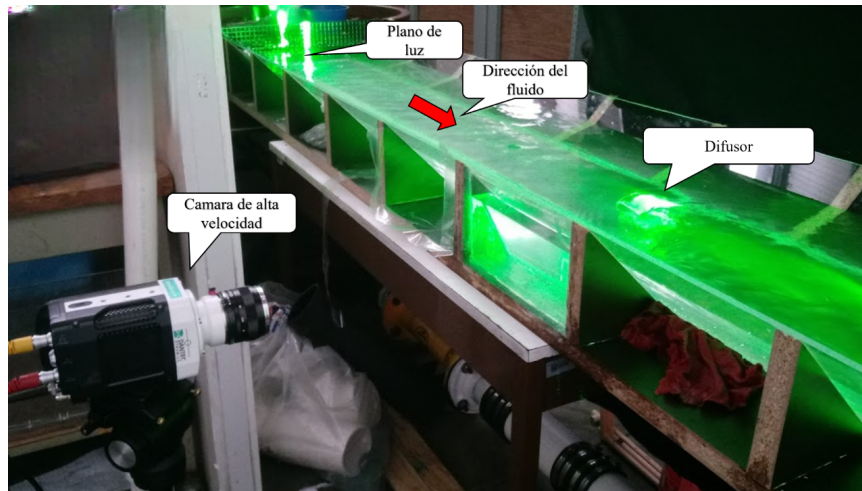
Figura 4.9: Construcción del modelo del canal

Con todo el modelo armado y calibrado es momento de proceder con las mediciones.

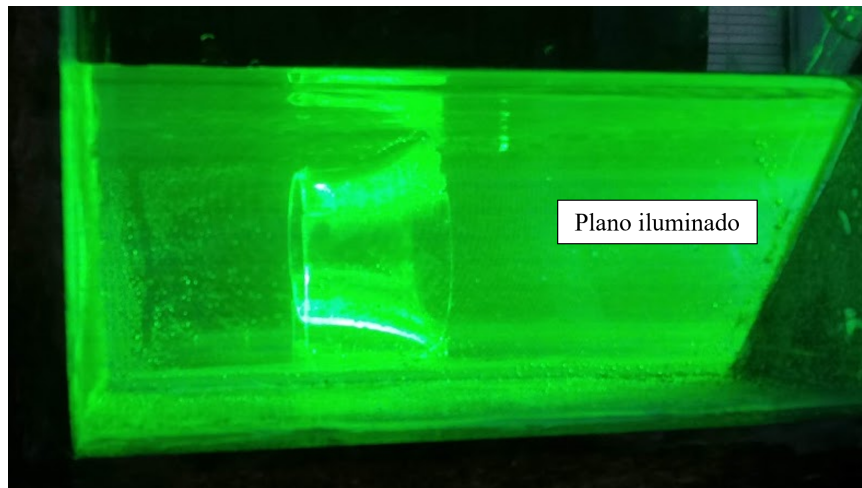
4.1.3. Medición de la velocidad en el modelo

Podemos apreciar en la Fig. 4.10(a) el armado del modelo del canal junto con el equipo para realizar la medición. También en la Fig. 4.10(b) se observa la tobera difusor

que esta totalmente sumergida en el modelo del canal donde el plano iluminado del láser pasa a la mitad, ahí es donde se realizaran las mediciones de velocidad del flujo.



(a) Modelo del canal con el PIV



(b) Tobera-Difusor dentro del canal

Figura 4.10: Modelo del canal

Se tomaron 500 imágenes utilizando una cámara de alta velocidad en un lapso de 0.667 segundos. Estas imágenes fueron analizadas con el software PIVLAP [41], que permite calcular la velocidad media en el plano central de la tobera-difusor del modelo. Este análisis es fundamental para comprender el comportamiento del flujo en dicha zona, ya que las velocidades obtenidas proporcionan información valiosa sobre la dinámica del sistema.

Para visualizar las partículas en movimiento, puedes hacer clic en el nombre de la Fig. 4.11, donde se presentará un video que ilustra el flujo capturado y los vectores de velocidad calculados en el análisis. Esta representación visual facilita una mejor comprensión de los patrones de flujo y permite realizar una evaluación más detallada del

desempeño del modelo.

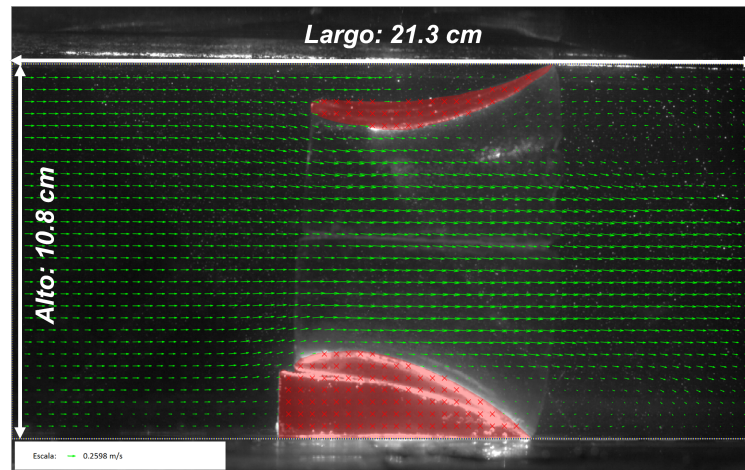


Figura 4.11: Analisis de velocidades con PIV

Para validar el modelo experimental se mide la velocidad del agua del canal aguas arriba de la ubicación del difusor Fig. 4.12. El promedio de la velocidad es de 0.259720584 m/s .

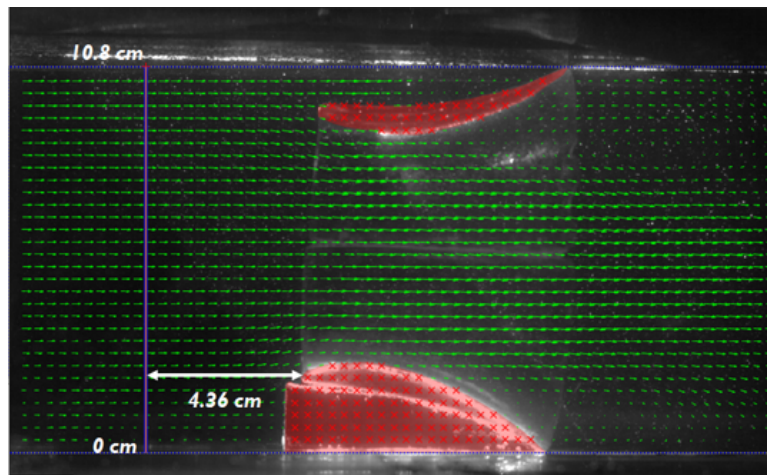
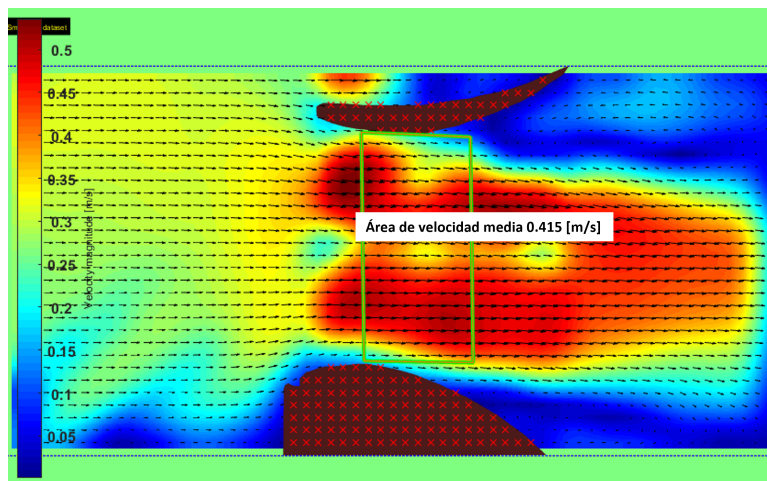
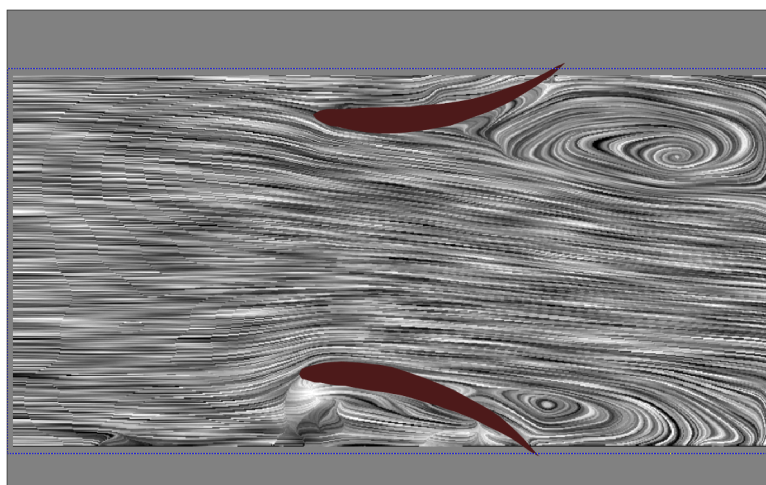


Figura 4.12: Medición de velocidad en el modelo del canal

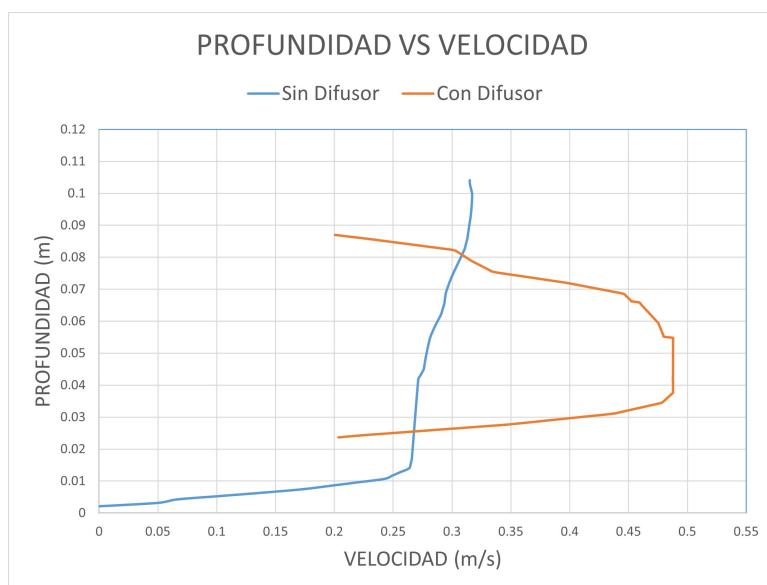
Los resultados de las mediciones experimentales revelan un aumento en la velocidad del fluido, el cual se visualiza en los contornos de velocidad presentados en la Fig.4.13(a). La velocidad aumentó de 0.2584 m/s en el canal a 0.415 m/s en la tobera-difusor, lo que representa un incremento de poco más del 60 % respecto a la velocidad del agua en el canal. La Fig.4.13(b) ilustra, mediante las líneas de corriente, cómo la tobera-difusor restringe la expansión del flujo. Por otro lado, la Fig. 4.13(c) presenta una comparación de los perfiles de velocidad, mostrando la velocidad en el canal en la línea color azul y en la tobera-difusor en la línea color naranja.



(a) Vectores y contornos de velocidad.



(b) Líneas de corriente.



(c) Comparación de perfiles de velocidades.

Figura 4.13: Diferentes representaciones de la velocidad en el canal y en la tobera-difusor.

Este aumento en la velocidad afecta la energía hidráulica disponible. En la Tabla 4.5, se presentan las estimaciones de los incrementos tanto en la velocidad como en la energía hidráulica disponible. Se observa que la energía hidráulica incrementa aproximadamente en un 43.15 %, a pesar de la disminución en el área de barrido, lo cual puede ser aprovechado por el rotor de la turbina hidrocínética.

Tabla 4.5: Efecto provocado por la tobera-difusor en la energía hidráulica.

	Velocidad m/s	Area barrida m ²	Potencia W	Energía Anual kWh
Sin tobera difusor	0.98	1.86	861.37	5659.18
Con tobera difusor	1.567	0.6413	1233.11	8101.6

Para comenzar el calculo de las aspas del rotor se toma en cuenta una velocidad del fluido de 1.567 m/s y un área barrida del rotor de 0.6413 m².

4.1.4. Cálculo del rotor

Para iniciar con el cálculo del rotor, es fundamental seleccionar un perfil aerodinámico. Los criterios para esta selección se centran en encontrar un alto valor en la relación entre el cociente del coeficiente de sustentación y el de arrastre CL/CD , ya que esta relación favorece un aumento en el coeficiente de potencia [42].

Los perfiles aerodinámicos que más se utilizan para diseñar turbinas hidrocínéticas incluyen al NACA 0012 (cuerda máxima de 0.30 m), NACA 2415 (0.22 m), NACA 4412 (0.20 m), NACA 6412 (0.19 m), NREL S833 (0.23 m) y SG6043 (0.40 m).

Partiendo con estos antecedentes, se calculará el número de Reynolds utilizando la longitud de la cuerda correspondiente a cada uno. Posteriormente, mediante el software Profili 2.0, se analizará el comportamiento aerodinámico de cada perfil para diferentes valores de Reynolds. Finalmente, se seleccionará el perfil que presente la mejor relación entre Sustentación y Arrastre en las distintas condiciones evaluadas.

Al estudiarlos, se ve en la Fig. 4.14 que la relación de CL/CD máxima obtenida al utilizar diferentes Reynolds es el perfil SG6043, éste será el perfil que seleccionaremos para diseñar las aspas del rotor.

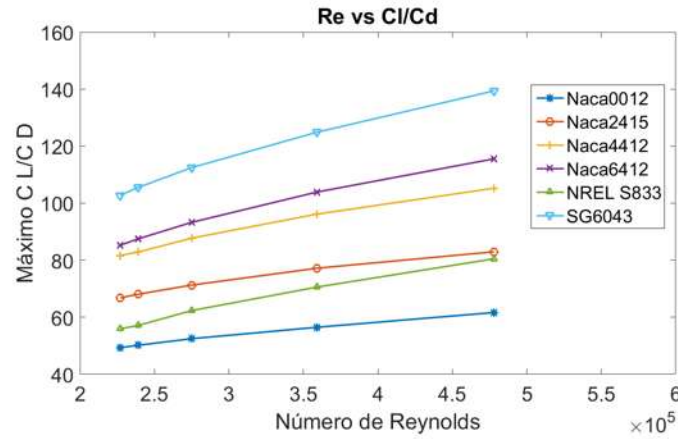


Figura 4.14: Análisis de perfiles aerodinámicos.

La velocidad específica λ es otro parametro importante a obtener, para un rotor de 3 palas el resultado del calculo viene dado por:

$$\lambda_{optimo} = \frac{4\pi}{B} = \frac{4\pi}{3} = 4.19 \quad (4.3)$$

Se toma el valor de 4 por tratarse de un fluido mas denso y prevenir problemas estructurales.

Con este valor se pueden determinar las revoluciones del rotor.

$$\omega = \frac{\lambda v}{r} = 13.92 \frac{Rad}{s} \quad (4.4)$$

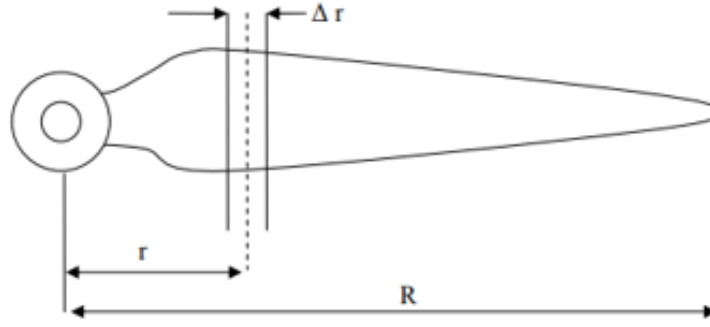
Dando como resultado que el rotor giraría a 132.98 revoluciones por minuto.

El método de cantidad de movimiento del elemento de pala (BEM) consiste en segmentar el aspa en varias secciones y evaluar su geometría en relación con la potencia. Los datos necesarios para el cálculo del rotor se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Datos iniciales para calcular el rotor.

Variable conocida	Valor determinado
Número de palas (B)	3
Velocidad (v)	1.567 m/s
Viscosidad Cinemática (ν)	1.31×10^{-6}
Radio (r)	0.45 m
Velocidad Especifica (λ)	4

Con la velocidad media del agua en el interior del difusor conocida, se llevó a cabo el diseño de los parámetros del álabe. Según [43], es fundamental dividir el álabe en diferentes secciones, desde $i=1$, que corresponde a la raíz, hasta $i=20$, que representa el extremo del álabe. Esto se ilustra en la Fig.4.15, lo que permite llevar a cabo el diseño en cada sección según el sistema de ecuaciones acopladas 4.5.


 Figura 4.15: Partes del álabe desde $i = 1$ hasta $n = 20$

$$\lambda_i = \frac{\omega r_i}{v} = \frac{\pi n r_i}{30 v} \quad (4.5a)$$

$$a_i = \sqrt{\lambda_i^2 + 1} \cos \left(\frac{1}{3} \arctan(\lambda_i) + \frac{\pi}{3} \right) \quad (4.5b)$$

$$h_i = \sqrt{1 + \frac{1 - a_i^2}{\lambda_i^2}} \quad (4.5c)$$

$$\theta_i = \arctan \left(\lambda_i \frac{1 + h_i}{1 + a_i} \right) \quad (4.5d)$$

$$Q_i = \frac{8 \pi r_i (1 - a_i) \sin^2 \theta_i}{B (1 + a_i) \cos \theta_i} \quad (4.5e)$$

$$c_i = \frac{Q_i}{C_L} \quad (4.5f)$$

$$Re = \frac{w_i c_i}{\nu} \quad (4.5g)$$

$$w = \frac{v(1 + a_i)}{2 \sin a_i} \quad (4.5h)$$

$$\beta_i = \theta_i - \alpha_i \quad (4.5i)$$

$$dP = \rho \pi v \omega^2 r_i^3 dr (1 - a_i)(h_i - 1) \quad (4.5j)$$

$$dM = \frac{dP}{\omega} \quad (4.5k)$$

$$C_p = \frac{\omega^2 r^2}{v_1^2} (1 - a_i)(h_i - 1) \quad (4.5l)$$

Donde se sabe que:

r_i radio de la sección,

λ_i velocidad específica en cada sección,

a_i factor de inducción axial a lo largo,

h_i coeficiente de rotación inducida,

θ_i ángulo de inclinación para cada sección,

Q_i coeficiente de producto,

c_i Longitud de la cuerda,

α_i ángulo de ataque,

w = velocidad relativa en la sección,

β_i el ángulo de calado en cada sección,

C_p Coeficiente de Potencia

dP Diferencial de Potencia.

El resultados de los calculos puedes verlos en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Cálculo de la Velocidad Relativa

Sección	Radio	Velocidad Específica	Factor de inducción axial	Coeficiente de rotación inducida	Ángulo de inclinación	Coeficiente	Velocidad relativa
	r_i	λ_i	a_i	h_i	θ_i	Q_i	w
1	0.023	0.2	0.451	4.574	0.916	0.074	1.433
2	0.045	0.4	0.416	2.483	0.794	0.113	1.556
3	0.068	0.6	0.393	1.830	0.687	0.128	1.720
4	0.09	0.8	0.377	1.530	0.597	0.131	1.918
5	0.113	1	0.366	1.366	0.524	0.126	2.140
6	0.135	1.2	0.359	1.267	0.463	0.119	2.382
7	0.158	1.4	0.353	1.203	0.413	0.111	2.638
8	0.18	1.6	0.349	1.159	0.372	0.103	2.905
9	0.203	1.8	0.346	1.128	0.338	0.096	3.180
10	0.225	2	0.344	1.105	0.309	0.089	3.461
11	0.248	2.2	0.343	1.087	0.284	0.083	3.748
12	0.27	2.4	0.341	1.074	0.263	0.078	4.038
13	0.293	2.6	0.34	1.063	0.245	0.073	4.332
14	0.315	2.8	0.339	1.055	0.229	0.069	4.628
15	0.338	3	0.339	1.048	0.215	0.065	4.926
16	0.36	3.2	0.338	1.042	0.202	0.061	5.226
17	0.383	3.4	0.337	1.038	0.191	0.058	5.527
18	0.405	3.6	0.337	1.034	0.181	0.055	5.830
19	0.428	3.8	0.337	1.030	0.172	0.053	6.134
20	0.45	4	0.336	1.027	0.163	0.05	6.438

Con la Ec. 4.5f calculamos la longitud de la cuerda en cada sección, para ello, es necesario conocer el coeficiente de sustentación C_L el cual es proporcionado por el perfil aerodinámico a un determinado angulo de ataque que aun no hemos calculado.

Un procedimiento para encontrarlo es mediante convergencia por iteraciones, se asigna un valor inicial de $C_L = 1$ y se calcula una aproximación a la cuerda, después se determina el número de Reynolds, Ec. 4.5g, y el resultado se ingresa al software QBlade [44], para analizar el perfil aerodinámico y obtener un nuevo valor de C_L donde la relación C_L/C_D sea máxima.

El proceso anterior tiene que repetirse hasta que el valor de la cuerda deje de variar y se aplica para cada una de las 20 secciones del álabe.

Un resultado se muestra en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Resultado de iteración sección 1.

velocidad relativa	Coeficiente	Coeficiente de susten- tación	Cuerda	Número de Reynolds	Ángulo de ataque
w	Q_i	C_L	c_i	Re	α_i
1.433	0.074	1	0.074	80,568.5	7.5
		1.400	0.053	57,548.9	8.5
		1.431	0.051	56,302.2	8.5
		1.428	0.052	56,420.5	8.5

La cuerda resultante de la primera sección es de 0.052 metros con un angulo de ataque de 8.5 grados.

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados para todas las secciones así como el angulo de calado Ec. 4.5i de las palas del rotor.

Tabla 4.9: Cuerda y ángulo de calado para el álabe del rotor

Sección	Cuerda	Ángulo de ataque	Ángulo de calado
	c_i	α_i	β_i
1	0.052	8.5	43.96
2	0.082	7	38.46
3	0.095	6.5	32.85
4	0.096	6.5	27.72
5	0.095	6	24
6	0.09	6	20.53
7	0.083	6	17.69
8	0.078	6	15.33
9	0.072	6	13.37
10	0.067	6	11.71
11	0.062	6	10.29
12	0.06	5.5	9.58
13	0.056	5.5	8.52
14	0.053	5.5	7.60
15	0.05	5.5	6.79
16	0.047	5.5	6.07
17	0.045	5.5	5.42
18	0.043	5.5	4.85
19	0.041	5.5	4.33
20	0.039	5.5	3.86

Para determinar la potencia local en la sección, se emplean las ecuaciones correspondientes [33]. La ecuación (4.5j) se usa para el cálculo de la potencia, mientras que la ecuación (4.5k) se aplica para el momento par.

Los resultados obtenidos del cálculo del rotor se presentan gráficamente en la Fig.4.16. En la Fig.4.16(a), se observa que la cuerda experimenta un aumento cerca de la raíz y disminuye progresivamente hacia la punta del álabe. De manera similar, el ángulo de calado, representado en la Fig. 4.16(b), muestra un comportamiento estable, aunque se aproxima a valores cercanos a cero en el extremo del álabe.

La Fig.4.16(c) ilustra la potencia transmitida por el álabe en cada sección, alcanzando un total de 722.875 W. Por otro lado, la Fig.4.16(d) representa el momento par generado en cada sección del álabe, sumando un total de 51.9 N·m.

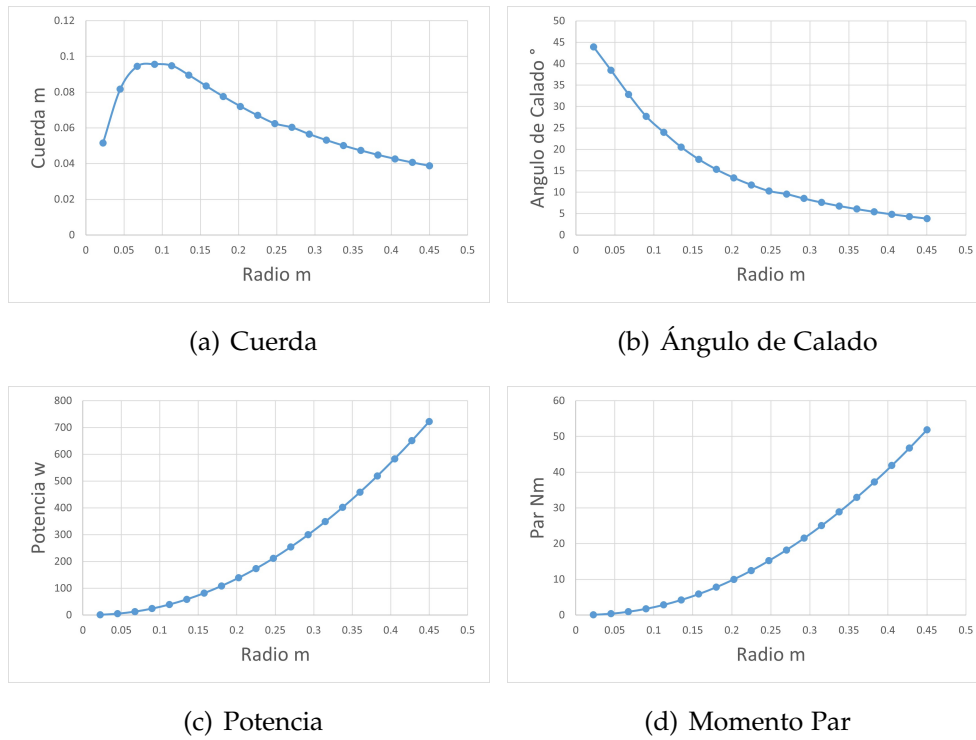
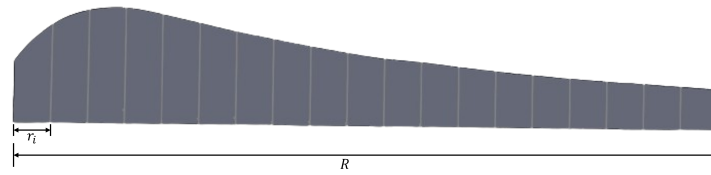
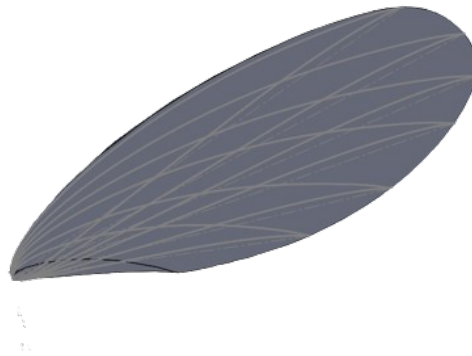


Figura 4.16: Resultado de los parámetros del rotor

Para finalizar, en la Fig. 4.17 se muestra el modelo completo del rotor terminado en dos vistas.



(a) Cuerda



(b) Ángulo de Calado

Figura 4.17: Sección y ángulo del aspa

En la Tabla 4.10 se presentan los resultados del cálculo del rotor.

Tabla 4.10: Cálculo finales del rotor.

Potencia Mecánica	C_p	Potencia ideal	Par
W	-	W	N-m
722.875	0.584	1284.374	51.907482

4.2. Conversión de la Energía Mecánica a Energía Eléctrica

Un generador eléctrico síncrono de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés) es altamente recomendado para el acoplamiento directo al rotor debido a su diseño y fabricación simple. Este tipo de generador opera de manera silenciosa, puede generar electricidad a bajas velocidades, y, además, no requiere un sistema de excitación

externo, como se menciona en diversas investigaciones [34, 35]. Estudios sobre el diseño de generadores de imanes permanentes han demostrado que es viable producir energía a bajas revoluciones [36]. En el marco de nuestro estudio, nuestra prioridad será alcanzar la velocidad de rotación óptima para seleccionar el generador que mejor se ajuste a nuestras necesidades energéticas.

4.2.1. Selección del multiplicador de velocidades

Dado que la velocidad actual del rotor es de 132.98 rpm, que resulta ser muy baja para operar un generador eléctrico, es necesario implementar un sistema de multiplicador de revoluciones usando engranajes cónicos helicoidales. Este sistema no solo aumentará la velocidad del rotor, sino que también permitirá repositionar el generador fuera del agua, facilitando así su mantenimiento y operación. La relación de transmisión de los engranajes, ilustrada en la figura Fig. 4.18, es esencial para asegurar que el movimiento generado sea eficiente y que los engranajes soporten adecuadamente el par de torsión, previniendo fallos en el sistema. Esta relación se calcula utilizando la ecuación 4.6, donde ω_s representa la velocidad de salida necesaria y ω_e es la velocidad obtenida.

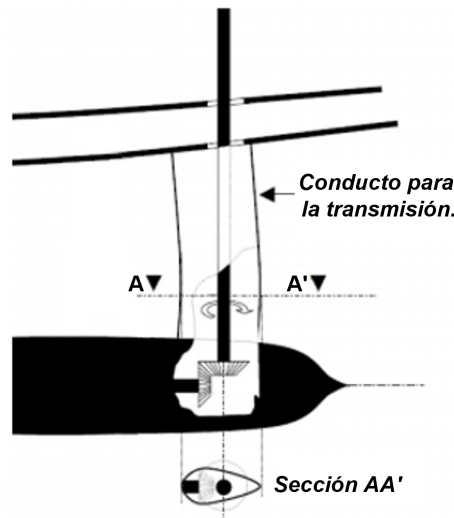


Figura 4.18: Transmisión por engranajes cónicos helicoidales

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{600}{132,98} = \frac{4,512}{1} \quad (4.6)$$

El diseño contempla una relación de transmisión de 1 a 4.5, lo que permitirá que el generador funcione a 600 rpm, una velocidad más adecuada para su operación efectiva. Con respecto a la eficiencia, los engranajes cónicos bien lubricados alcanzan aproximadamente un 98.5 % [45]. Así, se anticipa que el sistema será capaz de extraer alrededor de 712.03 W del rotor, optimizando así la conversión de energía en el proceso.

4.2.2. Selección del generador eléctrico

La eficiencia de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) se sitúa ligeramente por encima de la de los generadores asíncronos, que típicamente presentan una eficiencia alrededor del 95 % [46]. Esta superioridad en la eficiencia por parte de los PMSG puede atribuirse a su diseño y funcionamiento, que eliminan la necesidad de un sistema de excitación externo y reducen las pérdidas asociadas al calentamiento debido a la fricción en los componentes mecánicos.

Es importante destacar que un generador eléctrico trifásico PMSG sin escobillas, como el que se ilustra en la Fig. 4.19, ofrece varias ventajas en términos de rendimiento y mantenimiento. Este tipo de generador no solo mejora la eficiencia energética, sino que también minimiza la necesidad de intervenciones frecuentes, gracias a su construcción robusta y a la ausencia de escobillas, lo que reduce el desgaste mecánico.

Las características específicas de este generador comercial se detallan en la Tabla 4.11, donde se incluyen parámetros clave como la potencia nominal, la velocidad de operación, y otros aspectos técnicos que son fundamentales para evaluar su aplicabilidad en sistemas de generación de energía. Esta información es crucial para seleccionar un generador que se ajuste a las necesidades particulares de un proyecto, asegurando así un funcionamiento óptimo y eficiente.



Figura 4.19: Generador Eléctrico PMSG

Tabla 4.11: Características del generador síncrono de imanes Permanentes (PMSG)

Potencia:	1000 W
Voltaje:	12/24 V
Revoluciones:	600 rpm
Eficiencia:	>95 %
Modelo:	PMSG-1KW
Sistema de control:	electromagnetismo
Peso:	3 kg
Corriente de Salida:	AC
Momento máximo de resistencia de arranque:	0.35 N-m

Con la potencia entregada por la multiplicadora de velocidad, al ingresar al generador eléctrico con una eficiencia del 95 %, la turbina puede generar 676.43 W de potencia eléctrica.

Capítulo 5

Discusión

En este capítulo se analizan los principales hallazgos de la investigación, comparándolos con estudios previos y evaluando su impacto en la viabilidad de la generación hidrocínética en canales de riego. Se discuten las ventajas y limitaciones del diseño propuesto, así como sus implicaciones para el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles en zonas rurales.

5.1. Energía obtenida

En la Fig. 5.1 puedes observar los procesos estudiados de la conversión de energía. Desde el estudio del recurso hídrico que se tiene disponible se diseñar una turbina hidrocínética y se obtiene que con solo 9 meses de trabajo del total de un año se puede extraer la mayor cantidad de energía, esto equivale a un total de 4,444.15 kWh de los 5,659.18 kWh que se tienen disponibles en el canal.

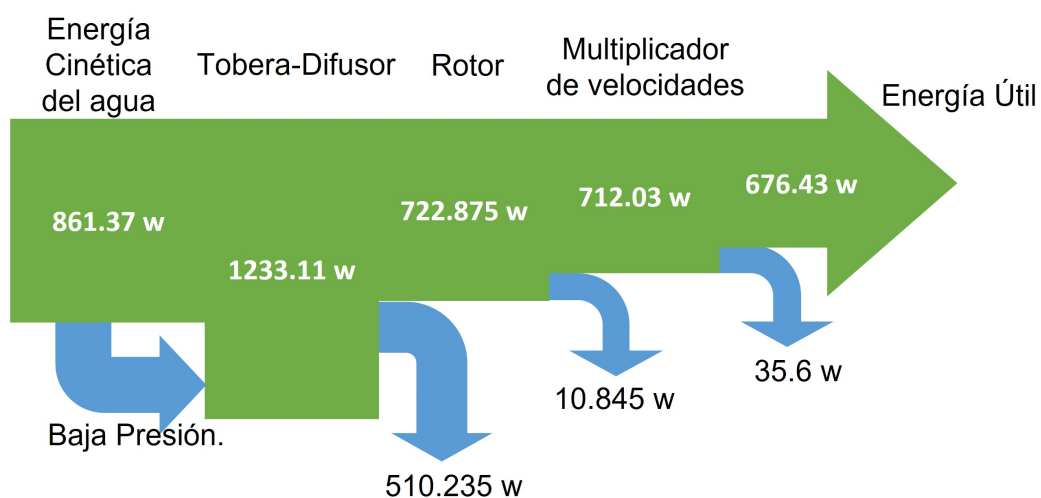


Figura 5.1: Diagrama de Sankey.

5.2. Comparación con otros trabajos

Un estudio previo realizado por [47] muestra que la optimización numérica de la forma del difusor puede aumentar el coeficiente de potencia C_p en un 118 %, pero no evalúa la conversión de energía de forma directa. Otro estudio de [48] analizó la transferencia de energía en un canal de flujo con una turbina helicoidal ductada, utilizando CFD y pruebas experimentales, alcanzando un C_p máximo de 0.45. También [49] estudió alcanzó un C_p superior a 0.9, modificando parámetros del difusor, pero sin considerar las aspas del rotor.

5.3. Limitaciones del Estudio

Una de ellas se refiere a la optimización del diseño del ducto. Aunque el uso de la tobera-difusor logró aumentar la velocidad del flujo, se detectaron zonas de recirculación y vórtices en la salida del ducto, lo que podría comprometer tanto la estabilidad del flujo como la eficiencia en la extracción de energía. Por ello, se sugiere llevar a cabo simulaciones adicionales que permitan optimizar la geometría del carenado y mitigar estos efectos.

En cuanto a la evaluación en condiciones reales, las pruebas experimentales se realizaron en un entorno controlado en el laboratorio con un modelo a escala. Aunque se utilizó la similitud dinámica a través del número de Froude, es fundamental validar el rendimiento de la turbina en un contexto real, considerando las variaciones en el caudal del canal y las condiciones ambientales.

Por último, para maximizar el aprovechamiento de la energía generada, resulta esencial evaluar la integración con sistemas de almacenamiento, como baterías, especialmente en comunidades donde el consumo eléctrico es variable.

5.4. Trabajos futuros

Los resultados obtenidos en este estudio abren nuevas líneas de investigación para la mejora y aplicación de la tecnología hidrocínética en canales de riego.

Primero comenzar con la optimización aerodinámica en el difusor mediante análisis computacional validando el modelo de turbulencia. En la Fig. 5.2 se muestra un acercamiento utilizando el modelo de turbulencia $k - \epsilon$.

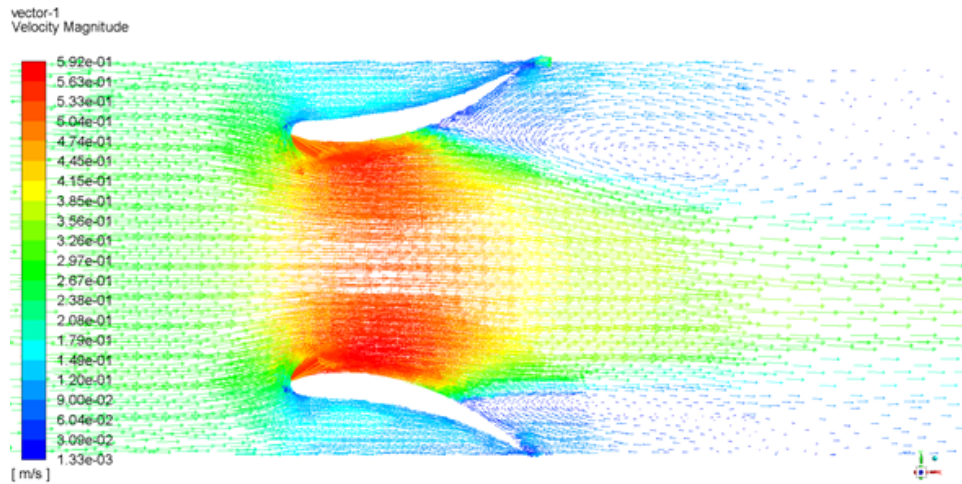


Figura 5.2: Análisis computacional de velocidades.

Hay que validar cuantitativa mente el modelo utilizado antes de proceder a la optimización.

Otro trabajo a realizar es la validación matemática con la construcción de la turbina. En la Fig. 5.3 se muestran pruebas de medición de caudales disponibles en el laboratorio de hidráulica para satisfacer un prototipo del canal y de la turbina para realizar esta validación.



Figura 5.3: Medición de caudal disponible en laboratorio

La generacion electrica mediante turbinas hidrocineticas tiene un gran potencial para futuras investigaciones, en este ámbito está en pleno auge, explorando mejoras en

la eficiencia de las turbinas, la durabilidad de los materiales y la integración de estas tecnologías en microredes energéticas. Se están llevando a cabo diversos estudios que abordan no solo el rendimiento técnico, sino también la viabilidad económica y social de la implementación de esos sistemas, especialmente en comunidades rurales.

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo ha presentado diversas etapas en el diseño de una turbina hidrocínética destinada a extraer energía de un canal de riego, abordando aspectos fundamentales para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico. A continuación, se detallan los hallazgos más relevantes:

- El análisis de la curva de duración del flujo y las características geométricas del canal revela que, con un caudal de $6.803 \text{ m}^3/\text{s}$, se dispone de $5,659.18 \text{ kWh}$ de energía anual. Dado que el objetivo es maximizar la utilización de este recurso, este caudal se considera como el caudal de diseño.
- La utilización de una tobera-difusor se justifica por su capacidad para incrementar la energía hidráulica disponible al aumentar la velocidad del fluido. Las mediciones en un modelo físico reducido muestran un incremento en la velocidad del fluido, pasando de 0.98 m/s a 1.57 m/s . Aunque esto reduce el área de barrido del rotor, se estima que se puede generar una energía eléctrica de $8,101.6 \text{ kWh}$ al año, lo que representa un aumento del 43 % en la energía disponible para ser convertida en energía útil.
- El estudio del comportamiento de las líneas de corriente en la tobera-difusor indica que su geometría actual no es óptima, ya que genera vórtices a la salida del ducto. En investigaciones futuras, se propone optimizar el perfil de la tobera para minimizar o eliminar estas zonas de recirculación, que podrían afectar el flujo aguas abajo.
- En esta investigación, no se consideró el fenómeno de cavitación en la turbina, dado que la velocidad del fluido no provoca que la presión en el ducto alcance el punto de vaporización del agua.
- La aplicación de la teoría del Método de Elementos de Cuerpo (BEM) proporciona una aproximación efectiva para diseñar un rotor que maximice la captura de ener-

gía del fluido. Con esta teoría, se diseñó un rotor capaz de extraer 722.875 W de los 1,233.11 W disponibles en ese momento, generando un torque de 51.9 N·m.

- Se aumentó la revolución del rotor de 132.98 rpm a 600 rpm mediante un sistema multiplicador de revoluciones, que utiliza engranajes cónicos helicoidales. Este sistema no solo incrementa la velocidad del rotor, sino que también permite ubicar el generador fuera del agua. La relación de transmisión propuesta es de 1 a 4.5, lo que resulta adecuado para operar el generador.
- Se optó por un generador de imanes permanentes, que funciona eficazmente a 600 rpm, siendo una opción preferible por su bajo requerimiento de mantenimiento y mayor eficiencia.

En conclusión, la eficiencia total alcanzada por esta turbina es del 78.53 %. Es importante señalar que este estudio se centra en una sección específica del canal, el cual tiene la capacidad de colocar dos turbinas, lo que podría aumentar aún más la extracción de energía.

La metodología propuesta para el diseño de la turbina hidrocínética es transferible a varios tipos de canales, ofreciendo un valioso recurso para que las comunidades cercanas a estas fuentes hídricas puedan acceder a energía útil y limpia, ya sea para sus cultivos o para usos generales.

Este análisis identifica una tecnología prometedora que puede ser empleada para suministrar energía eléctrica a zonas con fuentes hídricas cercanas, sin requerir caídas de agua. Esto convierte la solución en una alternativa de bajo costo, estimada en alrededor de 250 dólares, que es accesible y de bajo mantenimiento, ideal para poblaciones ubicadas en áreas aisladas y con recursos económicos limitados.

Capítulo 7

Apéndice

7.1. Participación en congresos



XV Seminario Iberoamericano de Redes de Agua y Drenaje, SEREA2017

USE OF THE KINETIC ENERGY OF THE FLOW OF WATER, CASE SPECIFIC CHANNEL OF THE PRESA J. MUJICA.

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA CINÉTICA DEL FLUJO DE AGUA, CASO ESPECIFICO CANAL DE LA PRESA J. MUJICA

Sergio Ricardo Galván González¹, Gildardo Solorio Díaz², Constantino Domínguez Sánchez³, Eder Peralta Escobar⁴, María Reyna Espinosa Espinosa⁵, Daniel Rodríguez Licea^{6*}

¹⁻⁶Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Abstract

"Water is the driving force of all nature." With this phrase of Leonardo Da Vinci, it describes the behavior of the water, with this line it is reconsidered on the problem that at the moment one has; climate change the effects of non-renewable energies and now the Energy Reform that enters into force in Mexico, is a watershed that gives the opportunity to generate clean and renewable energy.

Keywords: Renewable energy, hydrokinetic turbine, irrigation canal

Resumen/Resumo

"El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza." Con esta frase de Leonardo Da Vinci, describe el comportamiento del agua, con esta línea se recapacita acerca del problema que en la actualidad se tiene; cambio climático los efectos que han provocado las energías no renovables y ahora la Reforma Energética que entra en vigor en México, es un parteaguas que da la oportunidad de generar energías limpias y renovables. Como es el caso de las turbinas hidrocineéticas, las cuales aprovecharán la energía del flujo de los canales de distribución para la generación de energía eléctrica.

Palabras clave: Energía renovable, turbina hidrocineética, canal de riego.

¹Dr. Sergio Ricardo Galván González, Correo electrónico: srgalvan@umich.mx

²Dr. Gildardo Solorio Díaz, Correo electrónico: gdiaz@umich.mx

³Dr. Constantino Domínguez Sánchez, Correo electrónico: constantinods@hotmail.com

⁴M.I. Eder Peralta Escobar, Correo electrónico: eder.peralta@hotmail.com

⁵P.I.C. María Reyna Espinosa Espinosa Correo electrónico: espinosamareyna@gmail.com

⁶P.I.C. Daniel Rodríguez Licea Correo electrónico: dannyrodriguez446@gmail.com

1. Introducción

La Presa “Centenario de la Revolución Francisco J. Mujica” bajo la supervisión de CONAGUA, SEMARNAT y la Dirección de Gestión Forestal, es una de las obras de riego más grande de los últimos 25 años, tiene una capacidad Máxima de 100 mm³, una altura de 90 m y una generación de energía eléctrica de 4.5 MW, suficiente para satisfacer las necesidades de 35000 habitantes, cuenta con canales de riego con los cuales se puede aprovechar la energía cinética, gracias a estos canales se abastece a las comunidades de la Huacana, Parácuaro y Mújica, con una riego de 500 Ha.

Tanto la presa como las canales se finalizaron en el año 2011, dicho evento ha generado que los ejidos aumenten la producción agrícola de manera satisfactoria. Mientras que un año después entra en operación Naranjo de Tziritizcuaro (planta generadora de energía y zona de riego). No obstante, la energía no solo se puede aprovechar mediante la presa, la literatura habla acerca de los nuevos aprovechamientos como es el caso de las energías a base de turbinas hidrocínética, las cuales funcionan mediante el movimiento del agua, es una energía limpia, renovable que no afecta a la función principal del canal.



Figura 1 Presa “Centenario de la Revolución Francisco J. Mujica”



Figura 2 Canal de suministro de agua

El inicio de las turbinas hidrocínética, comienza con Albert Betz quien planteo la ecuación para la obtención de energía cinética por parte del viento, para después Zulcly las denomina como “central hidráulica de baja caída con turbina hidráulica hidrocínética”, el cual ya lo hace aprovechable en canales, y es este quien las clasifica en dos tipos, los cuales son explicados adelante; turbinas de eje axial y vertical. Sin embargo en 1995 Alexandre Gorlov modifico los antiguos diseños e implemento las hélices en forma helicoidal, Este tipo de tecnologías han producido una energía estable desde su arranque, ya que pueden suministrar hasta 2 kW de potencia eléctrica [12]

2. Desarrollo

El funcionamiento de dicha turbina se resume en aprovechar el movimiento de las partículas de agua, para que se convierta a energía mecánica, para después otra máquina convertirla a energía eléctrica, se conocen también como energía hidrogenaría e hidroeléctrica respectivamente.

El uso de turbinas hidrocinetas no es nuevo, el hombre las ha producido antes con diferente nombre: norias, las cuales al igual que estas generan un movimiento mecánico que posteriormente se convertirá a energía eléctrica.

Las turbinas hidrocinéticas se clasifican en dos grandes grupos; con eje vertical y su eje de rotación perpendicular al flujo de agua y el segundo es la turbina axial con su eje de rotación en la dirección del flujo, de estas se desprenden otras más como lo muestra la Figura 3.

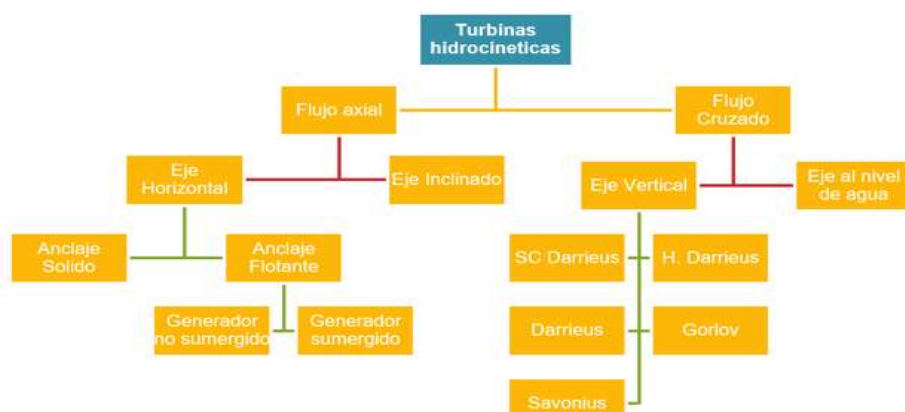


Figura 3 Tipos de turbinas

Algunas ventajas y desventajas de dichas turbinas se muestran a continuación, Tabla 1 donde se hace notar que las de flujo axial son las más adecuadas para este tipo de canal.

Tabla 1 Ventajas y desventajas

TURBINA	VENTAJAS	DESVENTAJA
DE EJE HORIZONTAL	Capacidad de autoarranque Posible eliminación de caja de velocidades mediante el uso de un conducto. Puede funcionar a velocidades lentas Menores costos de mantenimiento Densidad de alta potencia.	Es necesaria la inversión y rectificación de frecuencia durante a variación de la velocidad. Para obtener una frecuencia adecuada a baja velocidad, se requiere un gran número de polo y un aumento en el radio de la turbina.
DE EJE VERTICAL	Puede suministrar voltaje constante y frecuencia constante a velocidades variables. Alta fiabilidad. Diseño económico y simple.	Menor eficiencia en comparación con el generador si como de imanes permanentes. Necesita velocidades más rápidas que la velocidad síncrona. A bajas velocidades de flujo existe la necesidad de incrementar la velocidad.

Canal.

La energía almacenada en el canal de distribución también se puede aprovechar, en este caso las características del canal principal se muestran en la Tabla 2, cuyo canal principal tiene una distancia de 35.5km, con una capacidad de máxima de 12.5 m³/s, dicho canal cuenta con un sistema de control de niveles automatizado mediante ocho estructuras de control flúidico equipadas con compuertas.

Tabla 2 Datos

DATOS DEL CANAL	
Ancho de solera (b)	3 m
Talud (z)	1
Rugosidad (n)	0.014
Pendiente (S₀)	0.0002

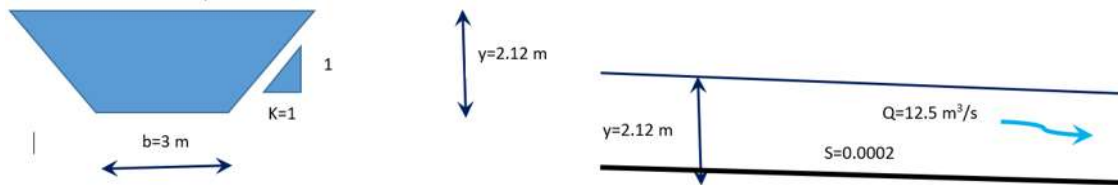


Figura 1 Sección trapezoidal y perfil del canal

Convertidor de energía cinética, el cual se encuentra en fase de diseño y que ayudara a las comunidades de la Huacana, Parácuaro y Mújica al abastecimiento de energía limpia y renovable, utilizando la teoría de conductos a presión, se pretende utilizar una turbina con difusores por CFD, como los de las siguientes imágenes.

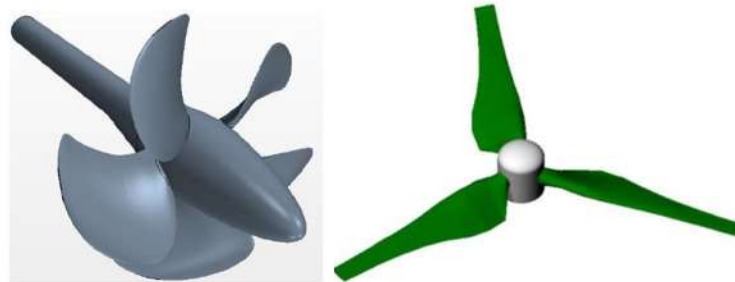


Figura 2 Rotor hidráulico.

De los estudios de planificación ergonómica de la implementación de los cultivos que serán regados, se adoptaron los módulos mensuales de riego a continuación mostrados, con estos datos se encontrara el funcionamiento eficiente de hidrocínética.

Tabla 3 Riego mensual

MÓDULOS MEDIOS MENSUALES DE RIEGO (m ³ /s)			
Enero	7.209	Julio	6.054
Febrero	8.109	Agosto	5.985
Marzo	8.982	Septiembre	5.535
Abril	9.255	Octubre	6.803
Mayo	9.751	Noviembre	7.756
Junio	7.542	Diciembre	7.377



3. Resultados.

Gracias a los caudales observados en la tabla anterior, se calculan las características hidráulicas del canal, así como le energía disponible

Tabla 4 Características y energía disponible del canal.

CAUDAL m ³ /s	VELOCIDAD (m/s)	TIRANTE (y)	ÁREA BARRIDO	POTENCIA (W)	% CAUDAL AL AÑO	SEG. TRABAJO (s)	E DISPONIBLE (GJ/Año)
9.751	1.0743	1.8655	2.7334	1694.3657	8.33	2628000	4.5
9.255	1.0595	1.8144	2.5855	1537.5831	16.67	5256000	8.1
8.982	1.0511	1.7856	2.5041	1454.0779	25.00	7884000	11.5
8.109	1.0228	1.6903	2.2439	1200.6174	33.33	10512000	12.6
7.756	1.0107	1.6502	2.1388	1104.1189	41.67	13140000	14.5
7.542	1.0031	1.6254	2.0751	1047.3326	50.00	15768000	16.5
7.377	0.9972	1.6061	2.0260	1004.4395	58.33	18396000	18.5
7.209	0.9910	1.5862	1.9760	961.5724	66.67	21024000	20.2
6.803	0.9756	1.5370	1.8554	861.3662	75.00	23652000	20.4
6.054	0.9451	1.4421	1.6333	689.3424	83.33	26280000	18.1
5.985	0.9421	1.4330	1.6129	674.3496	91.67	28908000	19.5
5.535	0.9221	1.3727	1.4800	580.1803	100.00	31536000	18.3

4. Conclusiones.

El estudio de la energía cinética del fluido es una rama poco estudiada en la actualidad, como lo son algunas energías renovables que no han impactado; se trata de una energía sustentable que a futuro se espera un aumento en la producción, el cual aportara beneficios en las localidades cercanas.

De acuerdo a las ventajas y desventajas de los tipos de turbinas se pretende la construcción de una turbina de flujo axial con eje horizontal, con un rotor de difusión, el funcionamiento de esta turbina se estima que durara 9 meses, para dar 3 meses de mantenimiento y así optimizar el comportamiento de esta, para satisfacer las necesidades de las comunidades cercanas; la Huacana, Mujica y Parácuaro, con el fin de su desarrollo.

Cabe mencionar que estos dispositivos no impactan a la fauna local, ya que solo necesitan el flujo del agua, por lo que se considera energía limpia.

5. Agradecimientos.

A todos los interesados en este proyecto en especial al M.I. Eder, y al Dr. Constantino que sin ellos no estaria aquí, a mi universidad la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que ha sido y sera “Cuna de Heroes, Crisol de Pensadores”.

6. Referencias

- [1] CONAGUA. (2007). MIA MODALIDAD REGIONAL. 2017, de GOBIERNO DEL ESTADO DE MICHOACÁN Sitio web: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/mich/estudios/2007/16MI2007H0006.pdf>
- [2] wordpress. (2015). Energía hidrocinética. 2017, de wordpress Sitio web: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:uX-bpkcqSicJ:https://faeingc.files.wordpress.com/2015/11/energ3ada-hidrocinetica.pptx+&cd=7&hl=es&ct=clnk&gl=mx>
- [3] Anyi, M., & Kirke, B. (2010). Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities. *Energy for Sustainable Development*, 14(2), 110-116.
- [4] Kirke, B. (2006). Developments in ducted water current turbines. *Tidal paper*, (25-04).
- [5] van Arkel, R., Owen, L., Allison, S., Tryfonas, T., Winter, A., Entwistle, R., ... & Parr, J. (2011, September). Design and preliminary testing of a novel concept low depth hydropower device. In *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA* (pp. 1-10). IEEE.
- [6] Birjandi, A. H., Woods, J., & Bibeau, E. L. (2012). Investigation of macro-turbulent flow structures interaction with a vertical hydrokinetic river turbine. *Renewable energy*, 48, 183-192.
- [7] Kirke, B. K. (2011). Tests on ducted and bare helical and straight blade Darrieus hydrokinetic turbines. *Renewable Energy*, 36(11), 3013-3022.
- [8] Vermaak, H. J., Kusakana, K., & Koko, S. P. (2014). Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: a review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 625-633.
- [9] Behrouzi, F., Maimun, A., & Nakisa, M. (2014). Review of Various Designs and Development in Hydropower Turbines. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 8, 2.
- [10] Máximo Villón Béjar (2007), *HIDRÁULICA DE CANALES*, 2da Edición, Editorial Villón, 667
- [11] Peña García, V. (2015). Diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos.
- [12] Rudi Henri van Els, Clovis de Oliveira, Antonio Manoel Dias y Luis F. Balduino. (2003). Turbina hidrocinética para poblaciones aisladas. *HIDRORED*, , 13-15.

**XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
MÉXICO, 15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021
EVENTO VIRTUAL**

**IMPLEMENTACIÓN DE TURBINAS HIDRO CINÉTICAS EN CANALES DE
RIEGO**

M.I. Eder Peralta Escobar¹, Dr. Sergio Ricardo Galván González²

*¹⁻²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Mecánica, Edificio W, Ciudad Universitaria,
C.P. 58030 Morelia, Michoacán, México.
eder.peralta@umich.mx¹, srgalvan@umich.mx²*

RESUMEN:

La energía hidroeléctrica a pequeña escala (Micro y Pico Hidroeléctricas) es considerada una de las tecnologías más económicas, con buena predictibilidad y respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, aún se encuentra en fase de desarrollo lo que ha provocado su falta de aplicación, especialmente en zonas rurales. Por esta razón, se evalúa, de manera experimental, la máxima energía hidráulica que el canal de riego de la presa "Centenario de la Revolución Francisco J. Mujica" ubicado en el estado de Michoacán, México, dispone a lo largo de un año para la conversión a energía eléctrica mediante el uso de turbinas hidro cinéticas. Se construyó, a una escala 14:1, un modelo del canal en el laboratorio de termo fluidos de la UMSNH para conocer el comportamiento real de la velocidad utilizando el método PIV (Velocimetría de Imágenes de Partículas) ya que no perturba el movimiento natural del fluido. Además, como las turbinas hidro cinéticas aprovechan la energía de velocidad del agua, se propone utilizar una tobera-difusor con perfil aerodinámico NACA10510 que aumente la energía cinética disponible del canal. Con este proceso se logra obtener la velocidad dentro del difusor para diseñar una turbina hidro cinética capaz de extraer una cantidad de energía considerable que pueda ser utilizada en zonas rurales o para el bombeo en la agricultura.

ABSTRACT:

Small-scale hydroelectric power (Micro and Pico Hydro) is considered one of the most economical, predictable and environmentally friendly technologies. However, it is still in the development stage, which has led to its lack of application, especially in rural areas. For this reason, the maximum hydraulic energy that the irrigation canal of the "Centenario de la Revolución Francisco J. Mujica" dam located in the state of Michoacán, Mexico, has available over a year for conversion to electrical energy through the use of hydrokinetic turbines is evaluated experimentally. A 14:1 scale model of the channel was built in the thermo fluid laboratory of the UMSNH to know the real behavior of the velocity using the PIV method (Particle Image Velocimetry) since it does not disturb the natural movement of the fluid. In addition, as hydrokinetic turbines take advantage of the velocity energy of the water, it is proposed to use a nozzle-diffuser with NACA10510 airfoil that increases the available kinetic energy of the channel. With this process it is possible to obtain the velocity inside the diffuser to design a hydrokinetic turbine capable of extracting a considerable amount of energy that can be used in rural areas or for pumping in agriculture.

PALABRAS CLAVES: *Hidro cinética, energía, canales, zonas rurales.*

INTRODUCCIÓN

En México existen muchos recursos hídricos que no se aprovechan por que se consideran que no son económicamente factibles por la baja cantidad de energía que se puede obtener de ellos, sin embargo, existen recursos que no se han estudiado a fondo como son los canales de riego.

La energía hidroeléctrica a pequeña escala es una de las tecnologías más económicas y respetuosas con el medio ambiente que deben considerarse para proyectos de electrificación rural ya que produce electricidad durante 24 horas al día, siempre y cuando el agua corriente está disponible. Las desventajas del uso de la hidroeléctrica convencional es que las centrales hidroeléctricas de gran escala están equipadas con grandes presas y grandes depósitos de agua recibiendo críticas considerables debido a su impacto ambiental negativo y las de pequeña escala, en la mayoría de los casos, carecen de la capacidad del yacimiento para almacenar agua.

En los canales de riego existe una cantidad de energía que puede ser aprovechada por las turbinas hidro cinéticas. Las nuevas tecnologías hidro cinéticas son una nueva categoría de energía hidroeléctrica que genera electricidad mediante la extracción de energía cinética del agua que fluye en lugar de energía potencial de la caída de agua. Comparte gran cantidad de similitudes con los sistemas de turbinas eólicas en términos de los principios físicos de operación, hardware eléctrico y capacidad de velocidad variable para la extracción óptima de energía. La velocidad de la corriente de agua en un canal de riego es baja, por lo que se piensa que la energía cinética que puede aportar también lo es, pero investigadores han puesto en manifiesto que con el uso de una tobera difusor esa cantidad de energía puede aumentar considerablemente, aun así, el agua es casi 800 veces más densa que el aire, por lo que las turbinas hidro cinéticas extraen suficiente energía incluso a baja velocidad, genera electricidad sin necesidad de construir represas y otros costosos proyectos.

Con el fin de ayudar con más desarrollo de esta tecnología se toma la iniciativa de desarrollar un prototipo que demuestre de forma experimental el aporte de energía eléctrica a zonas rurales del estado de Michoacán en México.

Los canales de riego tienen la función de conducir el agua desde la presa hasta el campo o huerta donde será aplicado a los cultivos. La Presa “Centenario de la Revolución Francisco J. Mujica” bajo la supervisión de CONAGUA, SEMARNAT y la Dirección de Gestión Forestal, es una de las obras de riego más grande de los últimos 25 años, junto con un canal de conducción de 35.15 kilómetros de longitud (Fig. 1), solucionan el suministro de agua en 12,200 hectáreas beneficiando a las comunidades de la Huacana, Parácuaro y Mújica.



Figura 1.- Longitud del canal.

Con un recurso como este a la mano y del cual podemos aprovechar la corriente del agua, surge la inquietud de investigar qué cantidad de energía eléctrica se puede obtener de un canal de riego sin tener que modificar sus características ni su función principal evitando impactos al medio ambiente.

METODOLOGIA

En la figura 2 se puede comprender más claramente los distintos procesos de transformación que sufre la energía manipulada en una turbina hidro cinética y un esquema de sus componentes vitales.

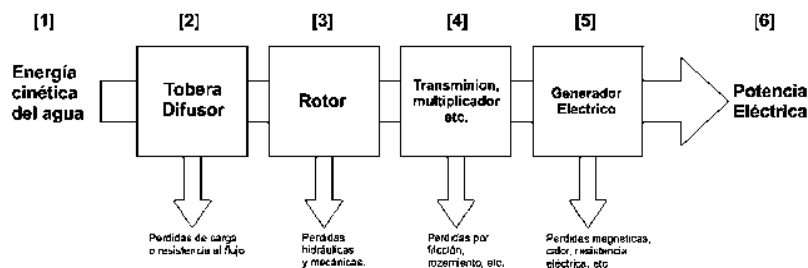


Figura 2.- Proceso de transformación de la energía.

En el paso 1 la energía es capturada en su forma primitiva como energía cinética del agua, en el paso 2 se utiliza una tobera-difusor ya que estos podrían aumentar la eficiencia de la turbina en un 65% o más, en el paso 3 se calcula el rotor, en el paso 4 se selecciona un sistema de transmisión multiplicador de revoluciones, en el paso 5 se selecciona el generador adecuado y en el paso 6 se obtiene la potencia eléctrica generada.

1.- ENERGIA CINETICA DEL AGUA

Un aspecto convincente de la generación de energía a partir de la tecnología hidrocinética es la previsibilidad del recurso. Datos estadísticos recabados por el CONAGUA nos muestran los estudios previos realizados en la medición de caudales requeridos en cultivos.

De los estudios de planificación ergonómica de la implementación de los cultivos que serán regados, se obtuvieron los módulos mensuales de riego que servirán para comenzar el estudio de la cantidad de energía que se tiene disponible al año, estos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.- Módulos medios mensuales de riego (m³/s)

Enero	7.209
Febrero	8.109
Marzo	8.982
Abril	9.255
Mayo	9.751
Junio	7.542
Julio	6.054
Agosto	5.985
Septiembre	5.535
Octubre	6.803
Noviembre	7.756
Diciembre	7.377

Al variar la cantidad de agua en el canal, también varía la profundidad del mismo, a raíz de esto, mediante el procedimiento de la Flow Duration Curve (Curva de duración de flujo), se estima el porcentaje de caudal disponible que se tiene a lo largo del año dividido en meses con la finalidad de seleccionar el caudal de diseño que más energía pueda aportar a la turbina en todo el año y así encontrar el diámetro de nuestra turbina.

El aprovechamiento de la energía por parte de la turbina está basado a un área circular, sabiendo que el rotor debe estar completamente sumergido se considera el diámetro del área barrida como la profundidad del agua, esta profundidad varía al variar el caudal de agua que lleva el canal.

El que canal en cuestión cuenta con una sección trapezoidal donde sus elementos geométricos y propiedades geométricas son muy importantes para el cálculo de la profundidad y de la velocidad. Figura 3.

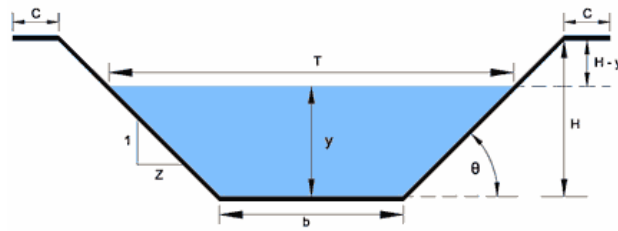


Figura 3.- Propiedades geométricas.

Área (A). Es el área mojada o área de la sección transversal del flujo, perpendicular a la dirección de flujo.

$$A = (b + Zy)y \quad [1]$$

Perímetro mojado (P). Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.

$$P = b + 2y\sqrt{1 + Z^2} \quad [2]$$

Radio hidráulico (R). Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b+Zy)y}{b+2y\sqrt{1+Z^2}} \quad [3]$$

Ancho superficial (T). Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

$$T = b + 2Zy \quad [4]$$

Profundidad hidráulica (D). Es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie. Indica a que altura el flujo es crítico

$$D = \frac{A}{T} = \frac{(b+Zy)y}{b+2Zy} \quad [5]$$

Tirante (y). Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.

Chezy y Manning propusieron una ecuación que sirve para determinar la velocidad del flujo uniforme se expresa en la ecuación 6.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} \quad [6]$$

Con las ecuaciones de potencia del agua en conjunto con las ecuaciones que definen las características geométricas de un canal trapezoidal se resuelve el sistema de ecuaciones para encontrar el diámetro y la velocidad de cada caudal mostrando los resultados en la tabla 2

Tabla 2.- Calculo de la potencia al año

No. Meses	Caudal [m³/s]	Velocidad [m/s]	Profundidad m	Potencia [W]	No. Horas	Potencia al año [KWh]
1	9.751	1.07	1.87	1694.37	730	1236.89
2	9.255	1.06	1.81	1537.58	1460	2244.87
3	8.982	1.05	1.79	1454.08	2190	3184.43
4	8.109	1.02	1.69	1200.62	2920	3505.80
5	7.756	1.01	1.65	1104.12	3650	4030.03
6	7.542	1.00	1.63	1047.33	4380	4587.32
7	7.377	1.00	1.61	1004.44	5110	5132.69
8	7.209	0.99	1.59	961.57	5840	5615.58
9	6.803	0.98	1.54	861.37	6570	5659.18
10	6.054	0.95	1.44	689.34	7300	5032.20
11	5.985	0.94	1.43	674.35	8030	5415.03
12	5.535	0.92	1.37	580.18	8760	5082.38

Los resultados obtenidos matemáticamente muestran que a un caudal de $6.803 \text{ m}^3/\text{s}$ donde la profundidad es de 1.537 metros tenemos la mayor energía en kWh durante un año,

2.- TOBERA DIFUSOR

Con el uso de una tobera-difusor se podría aumentar la eficiencia de la turbina en un 65% o más y así aprovechar más energía de la corriente del agua y para medir el incremento de la velocidad se construye un modelo a escala del canal y de una tobera difusor fabricada a partir de un perfil aerodinámico NACA 10510 rotado 360° para formar el cono, en la figura 4 se puede apreciar la mitad de dicho elemento.

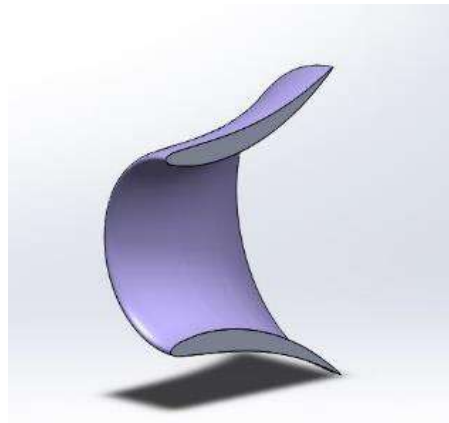


Figura 4.- Tubo-Difusor perfil NACA10510

Aplicando las técnicas de similitud y manteniendo números adimensional para garantizar las mismas condiciones se construye un canal para realizar las mediciones correspondientes utilizando PIV. Figura 5



Figura 5.- Modelo del canal

La técnica de velocimetría de imágenes por partículas (PIV) consiste en sembrar pequeñas partículas trazadoras con propiedades físicas similares a las del agua con el fin de que sigan fielmente la dinámica del fluido. Las partículas trazadoras son iluminadas por un plano láser en la sección de interés y son capturadas por una serie de imágenes tomadas con cámara de alta velocidad, es una técnica óptica de medición ya que no interfiere con el flujo natural del agua.

Con la cámara de alta velocidad se tomaron 500 imágenes en 0.667 segundos, al ser analizadas con el software llamado PIVLAP obtenemos que la velocidad media obtenida en el centro de nuestro modelo de tobera difusor es de 0.415 m/s incrementando en poco más del 60% de la velocidad del agua en el canal, los perfiles de velocidades los podemos observar en la figura 6.

Esta velocidad obtenida corresponde a nuestro modelo a escala por lo que al escalarla a tamaño real significa que la velocidad es de 1.567 m/s , también podemos decir que el área aprovechada se reduce dando como resultado una profundidad útil de 0.9 metros.

A partir de este resultado, sin difusor tenemos una potencia disponible de 861.37 w y con el difusor de 1233.11 w logramos un incremento en la energía cinética disponible de 371.74 w que equivale al 43.15% más de energía que la que se tiene sin difusor

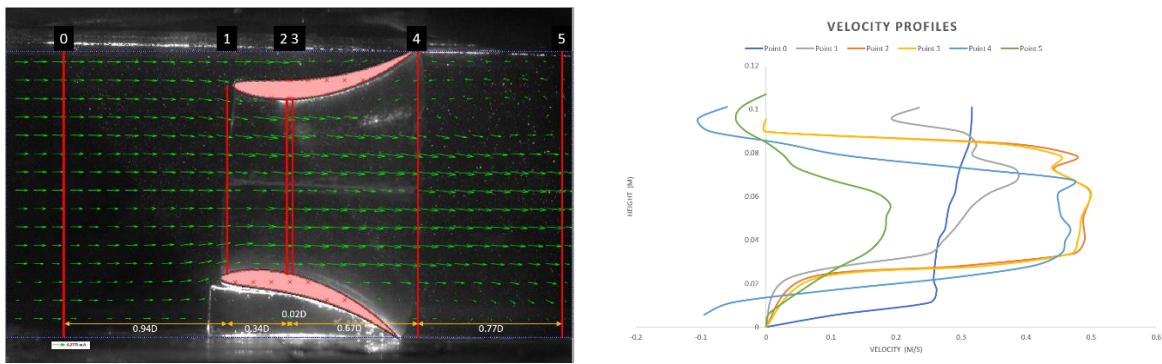


Figura 6.- Medicion del perfil de velocidades

3.- CALCULO DEL ROTOR

La teoría BEM al ser una combinación de dos teorías nos aporta una buena aproximación a la geometría del rotor capaz de aprovechar al máximo las velocidades a lo largo del diámetro del rotor y depende del perfil aerodinámico de las hélices.

Los criterios y consideraciones que se utilizaron para la selección de un perfil fueron los siguientes:

- Alto valor en la relación existente entre el cociente del coeficiente de sustentación y arrastre CL/CD , ya que esto permite que el coeficiente de potencia aumente y a su vez el radio de la turbina disminuya.
- Como es similar a un aerogenerador pequeño, unas características buenas a Reynolds bajos tendrán mucha importancia.

Al analizar los perfiles NACA 0012, 2415, 4412, 6412, NREL S833 y SG6043 se observa que el perfil que mayor relación de CL/CD es el SG6043 por lo que será el perfil seleccionado para nuestra turbina.

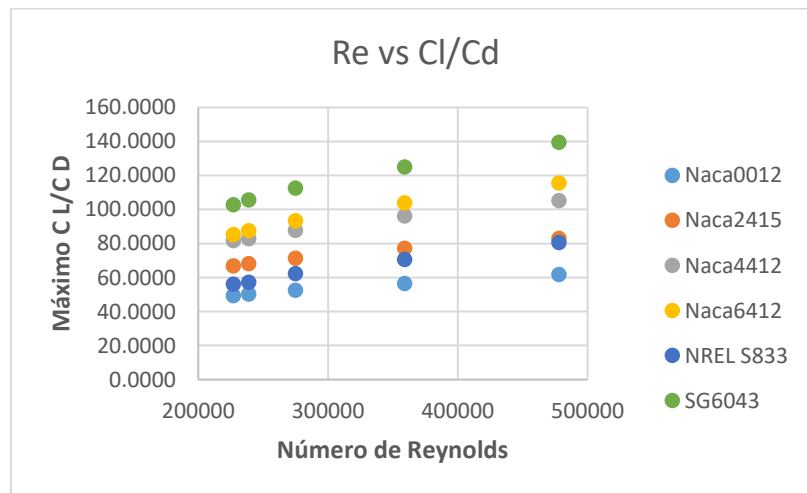


Figura 7.- Análisis de perfiles aerodinámicos

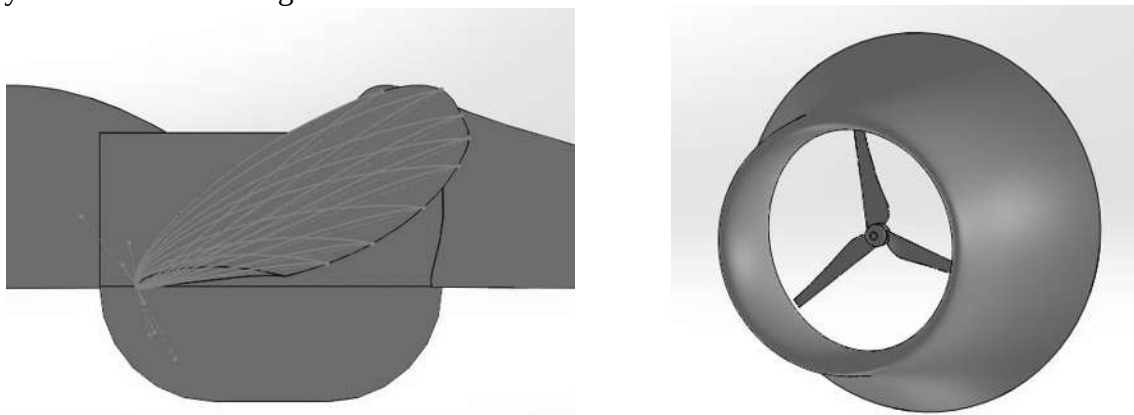
Aplicando el procedimiento de la teoría, se divide el radio del rotor en 20 partes iguales y se procede a realizar el cálculo para cada parte con el procedo indicado. Los resultados se muestran en la tabla 3 y corresponden a las características para la construcción de la hélice.

Matemáticamente con este procedimiento podemos obtener **722.875 watts** de potencia con el diseño de este rotor y un par de 51,907 Nm

Tabla 3.- Calculo de la potencia al año

Numero de Partes	radio	Cuerda (c)	Angulo de Ataque (α)	Angulo de Calado (β)
1	0,023	0,052	8,500	43,960
2	0,045	0,082	7,000	38,466
3	0,068	0,095	6,500	32,857
4	0,090	0,096	6,500	27,727
5	0,113	0,095	6,000	24,000
6	0,135	0,090	6,000	20,537
7	0,158	0,083	6,000	17,692
8	0,180	0,078	6,000	15,337
9	0,203	0,072	6,000	13,370
10	0,225	0,067	6,000	11,710
11	0,248	0,062	6,000	10,296
12	0,270	0,060	5,500	9,580
13	0,293	0,056	5,500	8,525
14	0,315	0,053	5,500	7,603
15	0,338	0,050	5,500	6,790
16	0,360	0,047	5,500	6,069
17	0,383	0,045	5,500	5,426
18	0,405	0,043	5,500	4,849
19	0,428	0,041	5,500	4,329
20	0,450	0,039	5,500	3,857

Con estos datos se procede con el bosquejo en CAD del rotor y a su vez la inclusión con la tobera difusor y se muestran en la figura 8.

**Figura 8.-** Dibujo en CAD del rotor

4.- MULTIPLICADOR DE VELOCIDADES

Las revoluciones del rotor son de 132,98 rpm las cuales son muy pequeñas para hacer funcionar un generador eléctrico por lo que se selecciona un sistema de multiplicador de revoluciones con engranajes cónico helicoidales que también servirán para cambiar el eje y poder colocar el generador fuera del agua.

La relación de transmisión de engranajes es fundamental para que se pueda generar el movimiento y el engranaje pueda soportar el par sin dar error, se calcula dividiendo la velocidad de salida por la velocidad de entrada, Estos engranes tendrán una relación de transmisión de 1 a 4.5 para hacer funcionar el generador.

5.- GENERADOR ELECTRICO

Actualmente en el mercado se encuentran gran cantidad de generadores de entre los que destacan los generadores de imanes permanentes, para esta turbina se hará la selección de un generador que cumpla con las condiciones de funcionamiento, aunque se está trabajando en la propuesta de realizar una metodología de diseño de generadores que sean capas de trabajar con las condiciones que el rotor puede entregar.

Algunos parámetros que actualmente existen en el mercado son los mostrados en la tabla 4

Tabla 4.- Características de generadores de imanes permanentes

Modelo	300 W	400 W	600 W	800 W
Potencia nominal (w)	300 W	400 W	600 W	800 W
Potencia máxima (w)	350 w	450 w	650 w	850 w
Voltaje nominal (v)	12 V/24 v/48 v	12 V/24 v/48 v	12 V/24 v/48 v	24 v/48 v
Velocidad rotada nominal (r/m)	650r/m	600r/m	600r/m	500r/m
Peso neto superior (kg)	4 kg	4,5 kg	7,5 kg	8 kg
Corriente de salida	AC	AC	AC	AC
Generador	Generador de imanes permanentes de 3 fases			
La vida de servicio	Más de 20 años			
La eficiencia	> 90%			
Material del eje	DE ACERO INOXIDABLE			
Material de la carcasa	De aleación de aluminio			
Imán permanente Material	De la tierra rara NdFeb			
Clase de protección	IP54			
Lubricación	Lubricación de grasa			
Temperatura de trabajo	-40C-80C			

Un parámetro a considerar es la Velocidad Angular nominal de trabajo, este generador otorga la potencia máxima a 600 rpm y debido a que nuestro rotor gira a 132.98 rpm es necesario el uso de un sistema amplificador de revoluciones.

CONCLUSIONES

Con esta metodología se logró obtener el diseño de una turbina hidro cinética para un canal de riego que puede extraer un total de 631.07 w de los 861.37 w disponibles que se tienen al instante sumando un total de energía extraída al año de 4,146.13 KWh mostrando las perdidas en la figura 9.

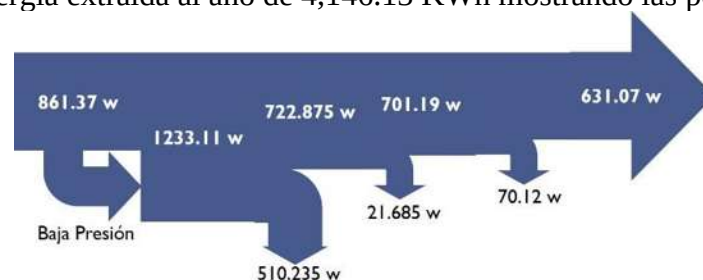


Figura 9.- Diagrama de Sankey

La turbina tiene una eficiencia del 73.26% y con la geometría de este canal se pueden colocar 2 turbinas en una sola sección, un resultado final se puede mostrar en la figura 10.

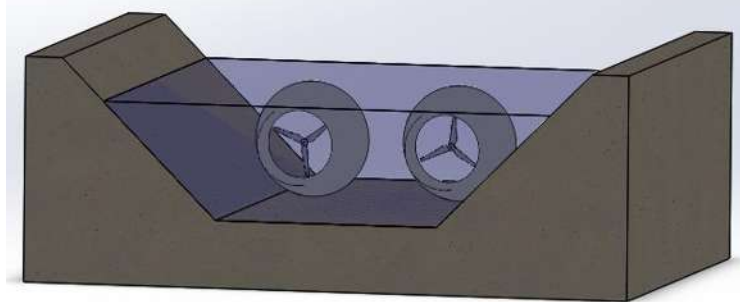


Figura 10.- Turbinas sumergidas en el canal

Finalmente podemos concluir que se puede aplicar la metodología a cualquier tipo de canal y que puede ser de gran aporte considerando las grandes longitudes de un canal de riego.

TRABAJOS FUTUROS

Actualmente se está trabajando en el estudio del comportamiento del agua del canal aguas arriba, se está investigando sobre los aspectos que puede causar alguna perjudicarían al medio ambiente o a la perturbación del movimiento del agua.

En estos momentos no podemos asegurar que exista algún estancamiento provocado por la colocación de la turbina ya que aun no se concluye con el estudio, solo tenemos la hipótesis que al aplicar el principio de conservación de energía al flujo del agua no debe existir algún estancamiento, sin embargo, se está trabajando en el estudio correspondiente.

Otros de los trabajos próximos a realizar es el rediseño del rotor para mejorar la transferencia de energía utilizando el perfil de velocidades real obtenido ya que este estudio se realizó utilizando una velocidad promedio.

BIBLIOGRAFIA

- Kuschke, M., & Strunz, K.** (2011, July). Modeling of tidal energy conversion systems for smart grid operation. In Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE (pp. 1-3). IEEE.
- CONAGUA** Proyecto hidroagrícola de Michoacán, Construcción y operación de la presa “Francisco J. Mujica”.
- Peña García, V.** (2015). Diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos.
- Anyi, M., & Kirke, B.** (2010). Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities. *Energy for Sustainable Development*, 14(2), 110-116.
- Francisco Maldonado, Q.** (2005). Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán-Región Loreto. Peru, Lima.
- Máximo Villón Béjar** (2007), *HIDRÁULICA DE CANALES*, 2da Edición, Editorial Villón, 667
- Wilson, R. E., Lissaman, P. B., & Walker, S. N.** (1976). Aerodynamic performance of wind turbines (pp. 1-164). Corvallis, Oregon: Oregon State University.
- Sanderse, B.** (2009). Aerodynamics of wind turbine wakes. Petten: ECN.
- Mikkelsen, R.** (2003). Actuator disc methods applied to wind turbines (Doctoral dissertation, PhD thesis, Technical University of Denmark).
- Ivanell, S., Sørensen, J. N., & Henningson, D.** (2007). Numerical computations of wind turbine wakes. In *Wind Energy* (pp. 259-263). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Alvaro, A. J.** (2007). CARACTERIZACIÓN NUMÉRICA DE LA TURBULENCIA EN LA ESTELA DE UNA AEROTURBINA MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE GRANDES ESCALAS (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).

DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRO CINÉTICA PARA EL APROVECHAMIENTO DE UN CANAL DE RIEGO EN EL ESTADO DE MICHOACAN

M.I. Eder Peralta Escobar¹, Dr. Sergio Ricardo Galván González².

*¹Instituto Tecnológico de Morelia, Ciencias Básicas, C.P. 58120 Morelia, Michoacán,
México.*

*²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica,
Edificio W, Ciudad Universitaria, C.P. 58030 Morelia, Michoacán, México.*

eder.pe@morelia.tecnm.mx¹, srgalvan@umich.mx²

RESUMEN: La energía hidroeléctrica a pequeña escala (Micro y Pico Hidroeléctricas) es considerada una de las tecnologías más económicas, con buena predictibilidad y respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, aún se encuentra en fase de desarrollo lo que ha provocado su falta de aplicación, especialmente en zonas rurales. Por esta razón, se evalúa, de manera experimental, la máxima energía hidráulica que el canal de riego de la presa “Centenario de la Revolución Francisco J. Mujica” ubicado en el estado de Michoacán, México, dispone a lo largo de un año para la conversión a energía eléctrica mediante el uso de turbinas hidro cinéticas. Se construyó, a una escala 14:1, un modelo del canal en el laboratorio de termo fluidos de la UMSNH para conocer el comportamiento real de la velocidad utilizando el método PIV (Velocimetría de Imágenes de Partículas) ya que no perturba el movimiento natural del fluido. Además, como las turbinas hidro cinéticas aprovechan la energía de velocidad del agua, se propone utilizar una tobera-difusor con perfil aerodinámico NACA10510 que aumente la energía cinética disponible del canal. Con este proceso se logra obtener la velocidad dentro del difusor para diseñar una turbina hidro cinética capaz de extraer una cantidad de energía considerable que pueda ser utilizada en zonas rurales o para el bombeo en la agricultura.

PALABRAS CLAVES: Hidro cinética, energía, canales, zonas rurales.

1. INTRODUCCION

La energía hidroeléctrica a pequeña escala es una de las tecnologías más económicas y respetuosas con el medio ambiente que deben considerarse para proyectos de electrificación rural ya que produce electricidad durante 24 horas al día, siempre y cuando el agua corriente está disponible. Las desventajas del uso de la hidroeléctrica convencional es que las centrales hidroeléctricas de gran escala están equipadas con grandes presas y grandes depósitos de agua recibiendo críticas considerables debido a su impacto ambiental negativo y las de pequeña escala, en la mayoría de los casos, carecen de la capacidad del yacimiento para almacenar agua.

Los canales de riego existentes en México pueden ser considerados como recursos energéticos que no han sido estudiados a fondo debido a que se considera que no son económicamente factibles por la baja cantidad de energía que se puede obtener de ellos, sin embargo, las nuevas tecnologías hidro cinéticas son una nueva categoría de energía hidroeléctrica que genera electricidad mediante la extracción de energía cinética del agua que

fluye en lugar de energía potencial de la caída de agua. Comparte gran cantidad de similitudes con los sistemas de turbinas eólicas en términos de los principios físicos de operación, hardware eléctrico y capacidad de velocidad variable para la extracción óptima de energía. La velocidad de la corriente de agua en un canal de riego es baja, por lo que se piensa que la energía cinética que puede aportar también lo es, pero investigadores han puesto en manifiesto que con el uso de una tobera difusor esa cantidad de energía puede aumentar considerablemente, aun así, el agua es casi 800 veces más densa que el aire, por lo que las turbinas hidro cinéticas extraen suficiente energía incluso a baja velocidad, genera electricidad sin necesidad de construir represas y otros costosos proyectos.

La Presa “Centenario de la Revolución Francisco J. Mujica” bajo la supervisión de CONAGUA, SEMARNAT y la Dirección de Gestión Forestal, es una de las obras de riego más grande de los últimos 25 años, junto con un canal de conducción de 35.15 kilómetros de longitud (Fig. 1), solucionan el suministro de agua en 12,200 hectáreas beneficiando a las comunidades de la Huacana, Parácuaro y Mújica.



Figura 1.- Longitud del canal.

Con un recurso como este, surge la inquietud de investigar la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener de un canal de riego sin tener que modificar sus características ni su función principal evitando impactos al medio ambiente.

2. METODOLOGIA

En la figura 2 se puede comprender más claramente los distintos procesos de transformación que sufre la energía manipulada en una turbina hidro cinética y un esquema de sus componentes vitales.

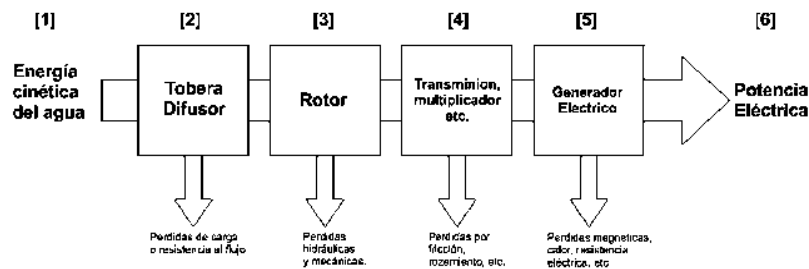


Figura 2.- Proceso de transformación de la energía.

En el paso 1 la energía es capturada en su forma primitiva como energía cinética del agua, en el paso 2 se utiliza una tobera-difusor ya que estos podrían aumentar la eficiencia de la turbina, en el paso 3 se calcula el rotor, en el paso 4 se selecciona un sistema de transmisión multiplicador de revoluciones, en el paso 5 se selecciona el generador adecuado y en el paso 6 se obtiene la potencia eléctrica generada.

3. RESULTADOS

3.1.- ENERGIA CINETICA DEL AGUA

Un aspecto convincente de la generación de energía a partir de la tecnología hidrocínética es la previsibilidad del recurso. Datos estadísticos recabados por el CONAGUA nos muestran los estudios previos realizados en la medición de caudales requeridos en cultivos.

De los estudios de planificación ergonómica de la implementación de los cultivos que serán regados, se obtuvieron los módulos mensuales de riego que servirán para comenzar el estudio de la cantidad de energía que se tiene disponible al año, estos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.- Módulos medios mensuales de riego (m^3/s)

Enero	7.209
Febrero	8.109
Marzo	8.982
Abril	9.255
Mayo	9.751
Junio	7.542
Julio	6.054
Agosto	5.985
Septiembre	5.535
Octubre	6.803
Noviembre	7.756
Diciembre	7.377

Al variar la cantidad de agua en el canal, también varía la profundidad del mismo, a raíz de esto, mediante el procedimiento de la Flow Duration Curve (Curva de duración de flujo), se estima el porcentaje de caudal disponible que se tiene a lo largo del año dividido en meses

con la finalidad de seleccionar el caudal de diseño que más energía pueda aportar a la turbina en todo el año y así encontrar el diámetro de nuestra turbina.

El aprovechamiento de la energía por parte de la turbina está basado a un área circular, sabiendo que el rotor debe estar completamente sumergido se considera el diámetro del área barrida como la profundidad del agua, esta profundidad varia al variar el caudal de agua que lleva el canal.

El canal cuenta con una sección trapezoidal donde sus elementos geométricos y propiedades geométricas son muy importantes para el cálculo de la profundidad y de la velocidad. Figura 3.

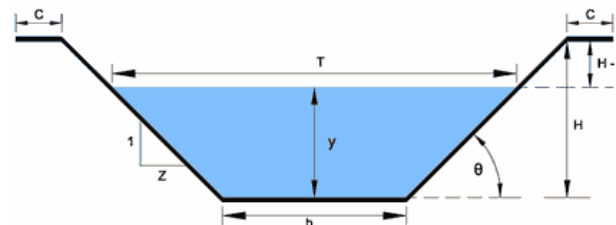


Figura 3.- Propiedades geométricas.

Con las ecuaciones de potencia del agua en conjunto con las ecuaciones que definen las características geométricas de un canal trapezoidal se resuelve el sistema de ecuaciones para encontrar matemáticamente el diámetro y la velocidad de cada caudal mostrando los resultados en la tabla 2

Tabla 2.- Calculo de la potencia al año

No. Meses	Caudal [m ³ /s]	Velocidad [m/s]	Profundidad [m]	Potencia [W]	Horas disponibles	Potencia al año [KWh]
1	9.751	1.07	1.87	1694.37	730	1236.89
2	9.255	1.06	1.81	1537.58	1460	2244.87
3	8.982	1.05	1.79	1454.08	2190	3184.43
4	8.109	1.02	1.69	1200.62	2920	3505.80
5	7.756	1.01	1.65	1104.12	3650	4030.03
6	7.542	1.00	1.63	1047.33	4380	4587.32
7	7.377	1.00	1.61	1004.44	5110	5132.69
8	7.209	0.99	1.59	961.57	5840	5615.58
9	6.803	0.98	1.54	861.37	6570	5659.18
10	6.054	0.95	1.44	689.34	7300	5032.20
11	5.985	0.94	1.43	674.35	8030	5415.03
12	5.535	0.92	1.37	580.18	8760	5082.38

Los resultados obtenidos matemáticamente muestran que a un caudal de 6.803 m³/s donde la profundidad es de 1.537 metros tenemos la mayor energía en kWh durante un año,

3.2.- TOBERA DIFUSOR

Con el uso de una tobera-difusor se podría aumentar la eficiencia de la turbina en un 65% o más y así aprovechar más energía de la corriente del agua y para medir el incremento de la velocidad se construye un modelo a escala del canal y de una tobera difusor fabricada a partir de un perfil aerodinámico NACA 10510 rotado 360° para formar el cono, en la figura 4 se puede apreciar la mitad de dicho elemento.

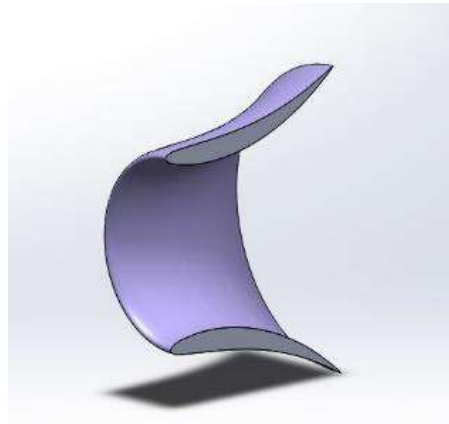


Figura 4.- Tubo-Difusor perfil NACA10510

Aplicando las técnicas de similitud y manteniendo números adimensional para garantizar las mismas condiciones se construye un canal para realizar las mediciones correspondientes utilizando PIV. Figura 5



Figura 5.- Modelo del canal

La técnica de velocimetría de imágenes por partículas (PIV) consiste en sembrar pequeñas partículas trazadoras con propiedades físicas similares a las del agua con el fin de que sigan fielmente la dinámica del fluido. Las partículas trazadoras son iluminadas por un plano láser en la sección de interés y son capturadas por una serie de imágenes tomadas con cámara de alta velocidad, es una técnica óptica de medición ya que no interfiere con el flujo natural del agua.

Con la cámara de alta velocidad se tomaron 500 imágenes en 0.667 segundos, al ser analizadas con el software llamado PIVLAP obtenemos que la velocidad media obtenida en el centro de nuestro modelo de tobera difusor es de 0.415 m/s incrementando en poco más del 60% de la velocidad del agua en el canal, los perfimes de velocidades los podemos observar en la figura 6.

Esta velocidad obtenida corresponde a nuestro modelo a escala por lo que al escalarla a tamaño real significa que la velocidad es de 1.567 m/s, también podemos decir que el área aprovechada se reduce dando como resultado una profundidad útil de 0.9 metros.

A partir de este resultado, sin difusor tenemos una potencia disponible de 861.37 w y con el difusor de 1233.11 w logramos un incremento en la energía cinética disponible de 371.74 w que equivale al 43.15% más de energía que la que se tiene sin difusor

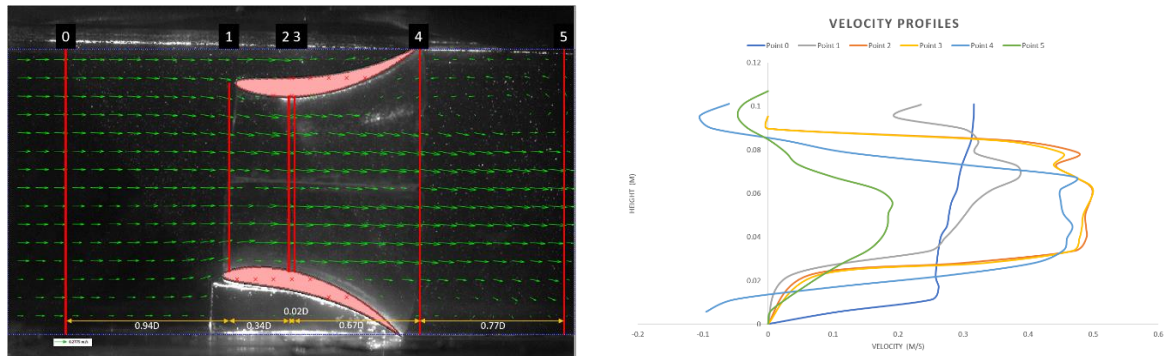


Figura 6.- Medición del perfil de velocidades

3.3.- CALCULO DEL ROTOR

La teoría BEM al ser una combinación de teorías nos aporta una buena aproximación a la geometría del rotor capaz de aprovechar al máximo las velocidades a lo largo del diámetro del rotor y depende del perfil aerodinámico de las hélices.

Al analizar distintos perfiles aerodinámicos, se observa que el perfil que mayor relación de CL/CD es el SG6043 por lo que será el perfil seleccionado para nuestra turbina.

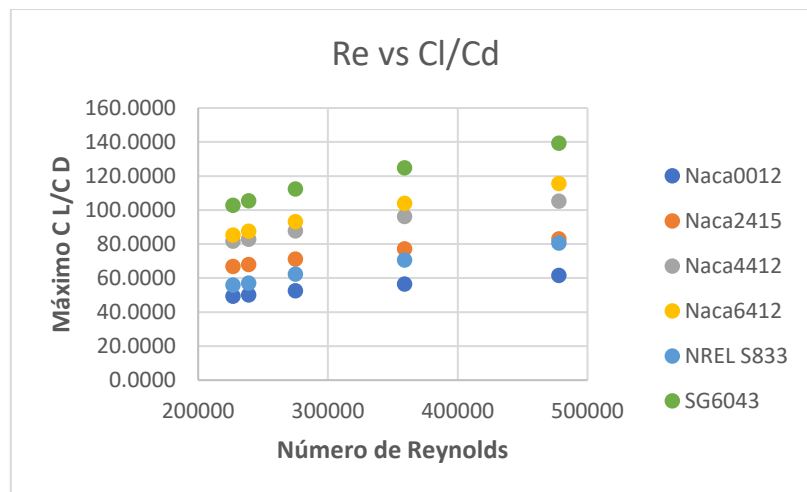


Figura 7.- Análisis de perfiles aerodinámicos

Aplicando el procedimiento de la teoría, se divide el radio del rotor en 20 partes iguales y se procede a realizar el cálculo para cada parte con el procedo indicado. Con estos datos se

procede con el bosquejo en CAD del rotor y a su vez la inclusión con la tobera difusor y se muestran en la figura 8.

Matemáticamente con este procedimiento podemos obtener **722.875 watts** de potencia con el diseño de este rotor y un par de 51,907 Nm

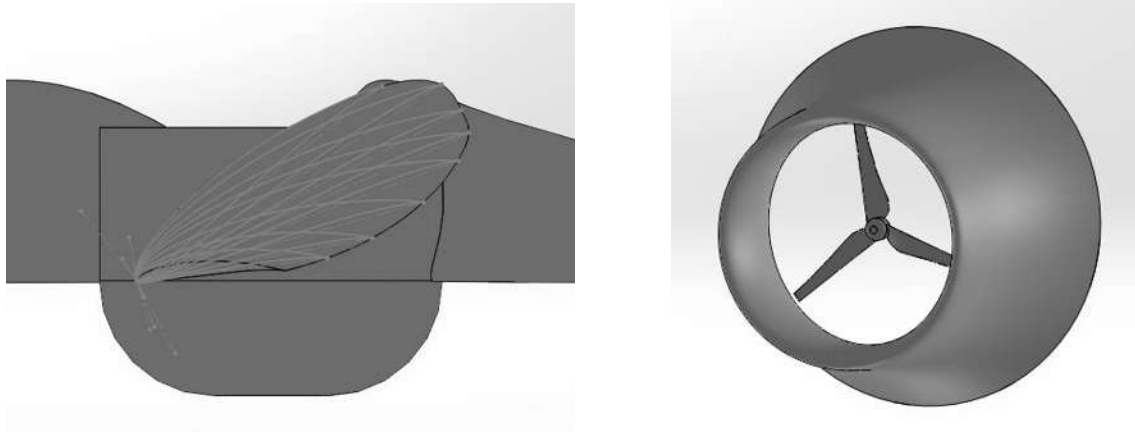


Figura 8.- Dibujo en CAD del rotor

3.4.- MULTIPLICADOR DE VELOCIDADES

Las revoluciones del rotor son de 132,98 rpm las cuales son muy pequeñas para hacer funcionar un generador eléctrico por lo que se selecciona un sistema de multiplicador de revoluciones con engranajes cónico helicoidales que también servirán para cambiar el eje y poder colocar el generador fuera del agua.

La relación de transmisión de engranajes es fundamental para que se pueda generar el movimiento y el engranaje pueda soportar el par sin dar error, se calcula dividiendo la velocidad de salida por la velocidad de entrada, Estos engranes tendrán una relación de transmisión de 1 a 4.5 para hacer funcionar el generador.

3.5.- GENERADOR ELECTRICO

Actualmente en el mercado se encuentran gran cantidad de generadores de entre los que destacan los generadores de imanes permanentes, para esta turbina se hará la selección de un generador que cumpla con las condiciones de funcionamiento, aunque se está trabajando en la propuesta de realizar una metodología de diseño de generadores que sean capaces de trabajar con las condiciones que el rotor puede entregar.

Un parámetro a considerar es la Velocidad Angular nominal de trabajo, este generador otorga la potencia máxima a 600 rpm y debido a que nuestro rotor gira a 132.98 rpm es necesario el uso de un sistema amplificador de revoluciones.

5. CONCLUSIONES

Con esta metodología se logró obtener el diseño de una turbina hidro cinética para un canal de riego que puede extraer un total de 631.07 w de los 861.37 w disponibles que se tienen al instante sumando un total de energía extraída al año de 4,146.13 KWh mostrando las perdidas en la figura 9.

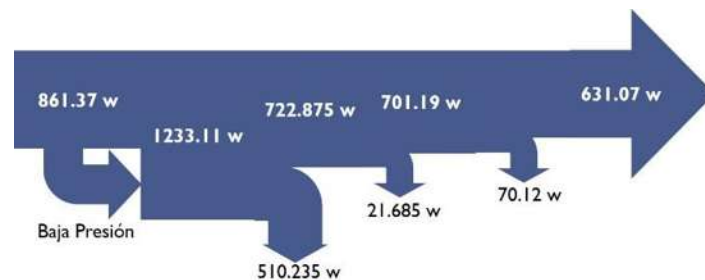


Figura 9.- Diagrama de Sankey

La turbina tiene una eficiencia del 73.26% y con la geometría de este canal se pueden colocar 2 turbinas en una sola sección, un resultado final se puede mostrar en la figura 10.

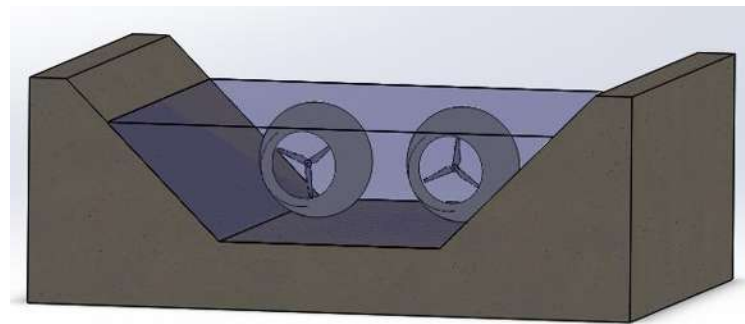


Figura 10.- Turbinas sumergidas en el canal

Finalmente podemos concluir que se puede aplicar la metodología a cualquier tipo de canal y que puede ser de gran aporte considerando las grandes longitudes de un canal de riego.

Como trabajos futuros, actualmente se está trabajando en el estudio del comportamiento del agua del canal aguas arriba, se está investigando sobre los aspectos que puede causar alguna perjudicarían al medio ambiente o a la perturbación del movimiento del agua.

En estos momentos no podemos asegurar que exista algún estancamiento provocado por la colocación de la turbina ya que aún no se concluye con el estudio, solo tenemos la hipótesis que al aplicar el principio de conservación se energía al flujo del agua no debe existir algún estancamiento, sin embargo, se está trabajando en el estudio correspondiente.

Otros de los trabajos próximos a realizar es el rediseño del rotor para mejorar la transferencia de energía utilizando el perfil de velocidades real obtenido ya que este estudio se realizó utilizando una velocidad promedio.

6. REFERENCIAS

Kuschke, M., & Strunz, K. (2011, July). Modeling of tidal energy conversion systems for smart grid operation. In Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE (pp. 1-3). IEEE.

CONAGUA Proyecto hidroagícola de Michoacán, Construcción y operación de la presa “Francisco J. Mujica”.

Peña García, V. (2015). Diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos.

Anyi, M., & Kirke, B. (2010). Evaluation of small axial flow hydrokinetic turbines for remote communities. *Energy for Sustainable Development*, 14(2), 110-116.

Francisco Maldonado, Q. (2005). Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán-Región Loreto. Peru, Lima.

Máximo Villón Béjar (2007), HIDRÁULICA DE CANALES, 2da Edición, Editorial Villón, 667

Wilson, R. E., Lissaman, P. B., & Walker, S. N. (1976). Aerodynamic performance of wind turbines (pp. 1-164). Corvallis, Oregon: Oregon State University.

Sanderse, B. (2009). Aerodynamics of wind turbine wakes. Petten: ECN.

Mikkelsen, R. (2003). Actuator disc methods applied to wind turbines (Doctoral dissertation, PhD thesis, Technical University of Denmark).

Ivanell, S., Sørensen, J. N., & Henningson, D. (2007). Numerical computations of wind turbine wakes. In *Wind Energy* (pp. 259-263). Springer, Berlin, Heidelberg.

Alvaro, A. J. (2007). CARACTERIZACIÓN NUMÉRICA DE LA TURBULENCIA EN LA ESTELA DE UNA AEROTURBINA MEDIANTE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE GRANDES ESCALAS (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).

7.2. Artículos Publicados en revistas JCR

Estimation of the Electrical Energy Provided by an Irrigation Canal with the Design of a Hydrokinetic Turbine

Eder Peralta Escobar , Sergio Ricardo Galván-González , Gildardo Solorio Díaz , Nicolás David Herrera Sandoval , and Daniel Cahue Díaz 

Abstract—Small-scale hydropower is considered one of the most economical, predictable, and environmentally friendly technologies available today. However, it is still under development, which has resulted in its limited application, especially in hydraulic resources with low head and fluid velocity. An example of this is the irrigation canal of the 'Centenario de la Revolución Francisco J. Múgica' dam, located in a rural area of the state of Michoacán, Mexico. To estimate the actual energy that this hydraulic resource can provide, we proposed an energy conversion methodology consisting of three main steps: the evaluation of the hydraulic energy using the annual Flow Duration Curve of the canal, the numerical design of the ducted hydrokinetic turbine based on experimental measurements and the careful selection of a low-velocity electrical generator. The designed hydrokinetic turbine was able to convert 78.53% of the available hydraulic energy into useful energy, which can be utilized directly by agriculture in rural areas.

Link to graphical and video abstracts, and to code:
<https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/9144>

Index Terms—clean energy, energy, hydrokinetic, irrigation channels, rural zones.

I. INTRODUCCIÓN

LA energía hidroeléctrica a pequeña escala es una de las tecnologías más económicas y respetuosas con el medio ambiente que deben considerarse para proyectos de electrificación rural. En México existen recursos hídricos, como los canales de riego, que no han sido evaluados a fondo por considerarlos poco factibles para este tipo de electrificación, [1]. Ya que en el estado mexicano de Michoacán la agricultura es una de las más importantes actividades y en la cual se utilizan canales de riego, existe energía disponible que podría ser aprovechada a través del uso de turbinas hidrocinéticas para suministrar energía a las comunidades instaladas cerca de estos canales, así también para la acción del bombeo del agua hasta los centros de cultivo.

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was José Miguel Sosa (*Corresponding author: Sergio Galvan-González*).

E. P. Escobar, S. R. Galván-González, and G. S. Díaz, are with the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Ingeniería Mecánica, Edificio W, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México (e-mails: eder.peralta@umich.mx, srgalvan@umich.mx, and gdiaz@umich.mx).

N. D. H. Sandoval, and D. C. Díaz are with the Instituto Tecnológico de Morelia, departamento de ingeniería mecánica, Morelia, Michoacán, México (e-mails: nicolas.hs@morelia.tecnm.mx, and daniel.cd@morelia.tecnm.mx).

Las turbinas hidrocinéticas son dispositivos que convierten, a través de sus aspas, la energía cinética del agua en un par mecánico en una flecha para posteriormente ser convertido en energía eléctrica por un generador acoplado a ella o mover el impulsor de la bomba de riego. De los diferentes tipos de turbinas hidrocinéticas presentadas en [2], la turbina de eje horizontal comparte gran similitud con los sistemas de turbinas eólicas en términos de los principios físicos y de operación considerando que solo cambia la densidad del fluido, [3].

La velocidad de la corriente de agua en un canal de riego puede ser baja, por lo que se piensa que la energía disponible podría ser poca. Sin embargo, las turbinas hidrocinéticas de eje horizontal podrían generar energía eléctrica de manera constante siempre y cuando la corriente de agua, aunque de baja velocidad, esté disponible. Ejemplo de ello son otros recursos hídricos como las mareas de la costa patagónica de Argentina donde [4] demostró que tienen un gran potencial energético que puede ser aprovechado por las turbinas hidrocinéticas para la generación de electricidad.

En estos canales se han adaptado turbinas abiertas (eólicas convencionales) que extraen energía del fluido con un cierto límite de Betz [5]. Esto sucede debido a que, reduciendo la velocidad del flujo sin reducir la presión, las líneas de corriente se deben expandir para mantener la continuidad.

En este artículo se diseña de manera experimental una turbina hidrocinética a través de cuatro etapas; recurso hídrico disponible, uso de una tobera difusor, diseño del rotor y cálculo del mecanismo de transmisión para la selección del generador eléctrico, capaz de aprovechar la energía que el canal de riego de la presa "Centenario de la Revolución Francisco J. Múgica" ubicado en el estado de Michoacán, México, podría disponer.

Los resultados muestran que es posible convertir la energía hidráulica disponible del canal en energía útil con el diseño eficiente de este tipo de turbinas. A pesar de la poca cantidad de energía extraída por una turbina, la instalación de un número considerable de estas turbinas a lo largo del canal podría incrementar la cantidad de energía disponible de tal forma que podría ser utilizada para bombeo en la agricultura y la misma electrificación de estas zonas rurales. Se espera entonces que con estos dispositivos las turbinas hidrocinéticas puedan extraer energía útil incluso a baja velocidad, [6] para generar electricidad sin necesidad de construir represas y otros costosos proyectos, [7].

II. METODOLOGÍA PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA

La Fig. 1 muestra los distintos procesos de transformación de energía que se pretenden implementar para extraer la energía del canal de riego.

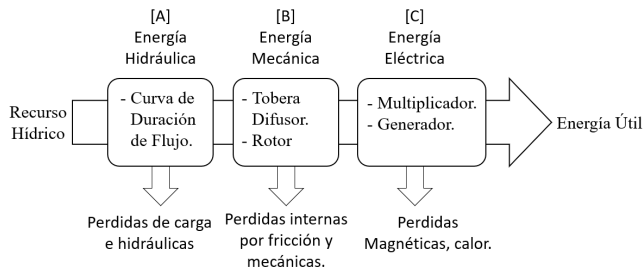


Fig. 1. Proceso de transformación de la energía.

Con el recurso hídrico definido a través del año, se estima la energía hidráulica disponible en el punto A. En el punto B se calcula la energía mecánica extraída por medio del rotor utilizando la tobera-difusor ya que este aditamento deberá aumentar la eficiencia de la turbina incrementando la energía cinética del agua [8]. Las características del álabe del rotor se estiman utilizando la teoría Blade Element Momentum (BEM) [9]. En el punto C se selecciona un generador de imanes permanentes adecuado para turbinas de bajas revoluciones y finalmente se obtendrá la energía eléctrica extraída por la turbina.

III. RECURSO HÍDRICO

La Presa “Centenario de la Revolución Francisco J. Múgica” que se encuentra bajo la supervisión de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y que pertenece a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Dirección de Gestión Forestal, es una de las obras de riego más grande de los últimos 25 años en el estado mexicano de Michoacán. Adicionalmente, un canal de conducción de 35.15 kilómetros de longitud, Fig. 2(a), solucionan el suministro de agua en 12,200 hectáreas, principalmente por gravedad beneficiando a las comunidades de la Huacana, Parácuaro y Múgica, [10]. Sin embargo, con un recurso hídrico de esta magnitud surge la inquietud de investigar qué cantidad de energía eléctrica se puede extraer de la estructura del canal, Fig. 2(b), sin tener que modificar las características ni la función principal del canal, evitando así impactos negativos al medio ambiente.

Las centrales hidroeléctricas de gran escala están equipadas con grandes presas y grandes depósitos de agua que proporcionan energía y potencia, pero reciben críticas considerables debido a su impacto ambiental negativo. La energía hidroeléctrica a pequeña escala, en la mayoría de los casos carecen de la capacidad de almacenamiento, [11] por ende de la energía potencial del agua. Entonces solo disponen de su energía cinética. Así con el fin de avanzar en el desarrollo de esta tecnología se diseñará una turbina hidrocinética que demuestre el aporte de energía eléctrica que podría suministrar a las zonas rurales cercanas al recurso hídrico en estado de Michoacán en México.

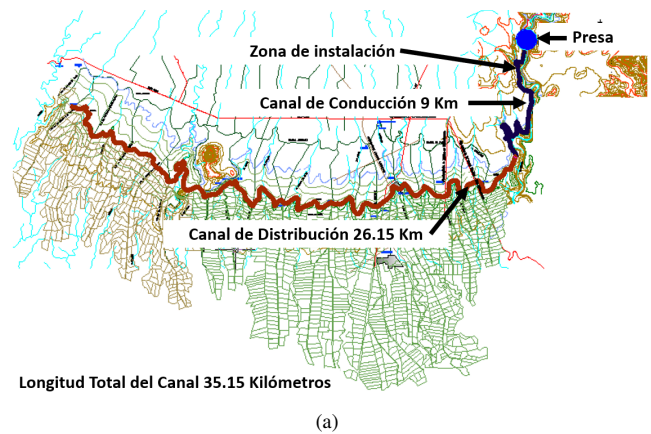


Fig. 2. Definición del recurso hídrico evaluado. a) Definición de la zona de instalación de la turbina en el mapa. b) Vista localizada en el canal de la zona de instalación de la turbina.

IV. PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ENERGÍA

A. Estimación de la Energía Hidráulica

Un aspecto convincente de la generación de energía a partir de la tecnología hidrocinética es el de predecir el recurso. De los estudios de planificación ergonómica de los cultivos que serán regados [12], se obtuvieron los módulos mensuales de riego que servirán para analizar la cantidad de energía hidráulica que se tiene disponible al año.

Al variar el caudal en el canal, cambia la profundidad del mismo y la velocidad del fluido. A raíz de esto, mediante el procedimiento de la Curva de Duración de Flujo [13] calculada con los caudales de riego proporcionados por personal de la presa J. Múgica, se puede estimar la energía hidráulica anual que puede ser aprovechada por la turbina ya que nos permite ver el total de horas en las que se encuentra disponible cada caudal a lo largo del año. La Fig. 3 muestra en el punto 1 que sólo el 8.3% del año, lo que corresponde a 730 hrs, se dispondrá del máximo caudal en el canal. El punto No 12 nos indica que el canal de irrigación tendrá un caudal disponible de $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ el 100% del año, lo que corresponde a 8760 hrs.

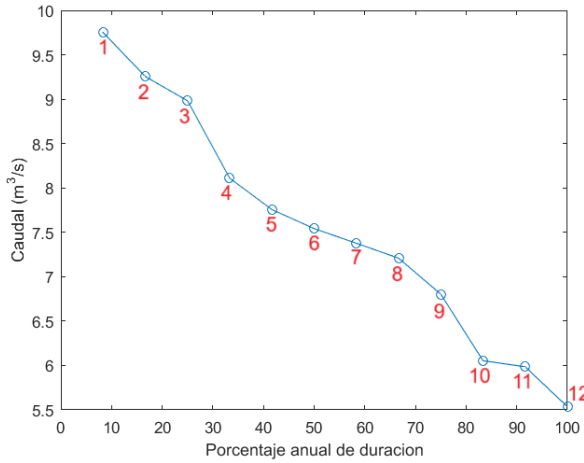


Fig. 3. Curva de Duración de Flujo (FDC).

El canal en estudio cuenta con una sección trapezoidal como el mostrado en la Fig. 4 donde la definición de los elementos y propiedades geométricas son muy importantes para el cálculo de la profundidad y de la velocidad, [14].

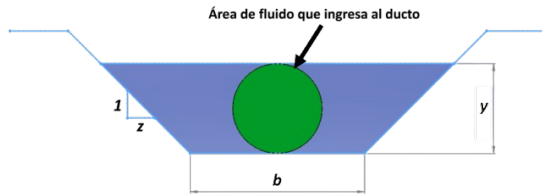


Fig. 4. Propiedades geométricas del canal.

Donde la profundidad del canal se define por el Tirante (y) que es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre. El Talud (Z) representa el grado de inclinación de los lados que forman la caja del canal con respecto a la horizontal. La Base (b) representa la longitud de la base del canal o también se conoce como ancho de solera. La zona circular en verde representa el área barrida por la turbina que se calcula considerando el diámetro como el tirante y . Ya que el caudal cambia durante el transcurso del año, es necesario hacer un análisis utilizando la Curva de Duración de Flujo para obtener los parámetros que nos permitirán estimar la energía total dada por cada caudal.

Por la información proporcionada por personal de la presa, se sabe que la base del canal b es de 3 metros de longitud, el talud Z es igual a 1, la rugosidad del material n es igual a 0.014, S_0 es la pendiente de la línea de energía y equivale a 0.0002 y por los módulos de riego se conoce el caudal Q .

Con las ecuaciones características para diseñar un canal trapezoidal y las utilizadas para el cálculo del caudal, [14], se construye un sistema de ecuaciones acopladas, 1.

$$A = (b + Zy)y \quad (1a)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + Z^2} \quad (1b)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b + Zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + Z^2}} \quad (1c)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (1d)$$

$$Q = A \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (1e)$$

Donde R es el radio hidráulico, P es el Perímetro mojado y A es el área de la sección transversal perpendicular a la dirección de flujo. Resolviendo el sistema de ecuaciones por el método no lineal *Generalized Reduced Gradient* (GRG) [15], se presentan en el Tabla I la profundidad y la velocidad que el flujo alcanza en el canal para cada caudal.

TABLE I
VELOCIDAD Y PROFUNDIDAD EN EL CANAL PARA CADA CAUDAL

No.	Caudal Q m^3/s	velocidad V m/s	Tirante y m
1	9.751	1.07	1.87
2	9.255	1.06	1.81
3	8.982	1.05	1.79
4	8.109	1.02	1.69
5	7.756	1.01	1.65
6	7.542	1.00	1.63
7	7.377	1.00	1.61
8	7.209	0.99	1.59
9	6.803	0.98	1.54
10	6.054	0.95	1.44
11	5.985	0.94	1.43
12	5.535	0.92	1.37

La potencia de una turbina hidrocínica completamente sumergida se calcula con la Ec. (2), [16]. Sin embargo, en nuestro caso en la turbina será adicionado un carenaje en una configuración de tobera-difusor. Así para estimar la potencia hidráulica disponible, el diámetro del área de barrido será considerado como el diámetro mayor del difusor, siendo la profundidad del canal.

$$P = \frac{1}{8} \pi \rho D^2 V^3 \quad (2)$$

Así, de acuerdo con [17], se calcula la energía hidráulica anual que cada profundidad puede tener a lo largo del año y se muestra en el Tabla II en kWh. Esta es la energía disponible que puede ser aprovechada por la turbina hidrocínica para generar energía eléctrica.

La Tabla II muestra que en el punto 9 se proporciona la mayor energía hidráulica disponible, 5659.18 kWh. Esto sucede con la disponibilidad del caudal el 75% del año, es decir, 6570 hrs.

B. Extracción de la Energía Mecánica.

De acuerdo con [8], la utilización de una tobera-difusor puede aumentar la eficiencia de la turbina hasta en un 65% o más, al incrementar la energía cinética del agua. Este incremento de energía puede ser aprovechado por el rotor el cual será diseñado utilizando la teoría *Blade Element Momentum* (BEM), [9].

TABLE II
ENERGÍA HIDRÁULICA ANUAL DISPONIBLE PARA EL CAUDAL

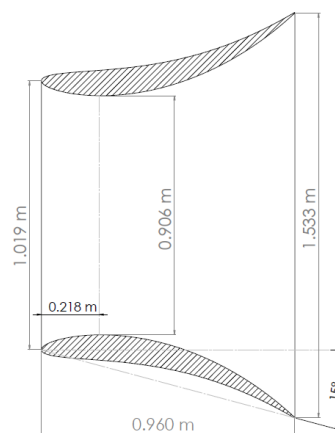
No.	Energía unitaria Wh	Disponibilidad del caudal hr	Energía hidráulica anual kWh
1	1694.37	730	1236.89
2	1537.58	1460	2244.87
3	1454.08	2190	3184.43
4	1200.62	2920	3505.80
5	1104.12	3650	4030.03
6	1047.33	4380	4587.32
7	1004.44	5110	5132.69
8	961.57	5840	5615.58
9	861.37	6570	5659.18
10	689.34	7300	5032.20
11	674.35	8030	5415.03
12	580.18	8760	5082.38

1) *Tobera-difusor*: En los canales se han adaptado turbinas abiertas (eólicas convencionales) que extraen energía del fluido con un cierto límite (Betz). Esto sucede debido a que, reduciendo la velocidad del flujo sin reducir la presión, las líneas de corriente se deben expandir para mantener la continuidad. Pero si un carenaje en configuración de tobera-difusor es colocado en el rotor, las fronteras del flujo serán bien definidas y la expansión del flujo será limitada. Así la energía es extraída por la caída de presión y por lo tanto la turbina se comporta más como una turbina de bajo salto más que como una turbina eólica convencional, [18]. Sin embargo, el uso de un ducto provocará ciertos fenómenos hidrodinámicos dentro del dispositivo los cuales deberán cambiar la configuración del perfil de velocidades. Así, para definir de manera más exacta la energía hidráulica disponible que deberá ser aprovechada por el rotor, se desarrollará la medición experimental de la velocidad del flujo dentro de la tobera-difusor.

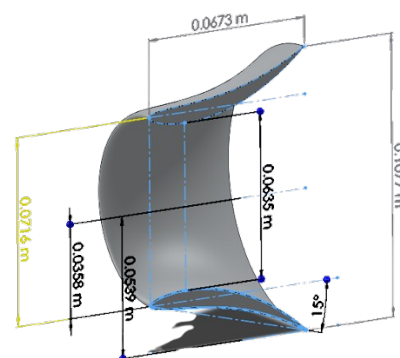
La tobera-difusor propuesta Fig. 5(a), de acuerdo con [19], utiliza un perfil aerodinámico NACA 10510 inclinando la cuerda 15° respecto a la horizontal y se rota 360° para formar el cono con diámetro de entrada de 1.019 m y de salida de 1.533 m quedando totalmente sumergida ya que el tirante del punto 9 seleccionado en la Tabla I es de 1.54 m.

Para evaluar el incremento de la velocidad real que se tiene dentro de la tobera-difusor se utiliza la técnica de medición conocida como *Velocimetría de Imágenes por Partículas* (VIP). Esta es una técnica óptica de medición que no interfiere con el flujo natural del agua y consiste en sembrar pequeñas partículas trazadoras con propiedades físicas similares a las del agua con el fin de que sigan fielmente la dinámica del fluido, [20]. Las partículas trazadoras son iluminadas por un plano láser en la sección de interés y son capturadas por una serie de imágenes tomadas con una cámara de alta velocidad. Utilizando la similitud dinámica a través del número de Froude ($Fr=0.2907$) se obtuvo la similitud geométrica con $\lambda = 14.28$.

Como resultado, en la Fig. 5(b) se muestra la mitad del modelo utilizado para la experimentación con sus dimensiones. Así mismo, en la Tabla III se presenta la similitud entre el canal en tamaño real y el modelo reducido calculado.



(a)



(b)

Fig. 5. Carenaje de la turbina en forma de tobera-difusor con perfil aerodinámico NACA 10510. a) Vista del perfil y dimensiones de la tobera-difusor b) Corte del modelo en 3D.

TABLE III
COMPARACIÓN ENTRE EL CANAL REAL Y EL MODELO

	Solera (b) λ m	Caudal $\lambda^{(5/2)}$ m^3/s	Velocidad $\lambda^{(1/2)}$ m/s	Tirante (y) λ m
Real	3	6.803	0.98	1.54
Modelo	0.21	0.0089	0.2584	0.1078

El modelo del canal se construyó con material de acrílico y se imprimió en 3D un molde para fabricar en dos partes el difusor también en acrílico ya que es un material transparente óptimo para tomar las mediciones. En la Fig. 6(a) se aprecia el armado del modelo del canal en conjunto con el equipo de medición. En la Fig. 6(b) se muestra la tobera-difusor totalmente inmersa en el canal con el plano iluminado en donde se efectuaron las mediciones del flujo a través de ella.

Con la cámara de alta velocidad se tomaron 500 imágenes en 0.667 segundos que posteriormente fueron analizadas con el software PIVLAP [21] para obtener la velocidad media en

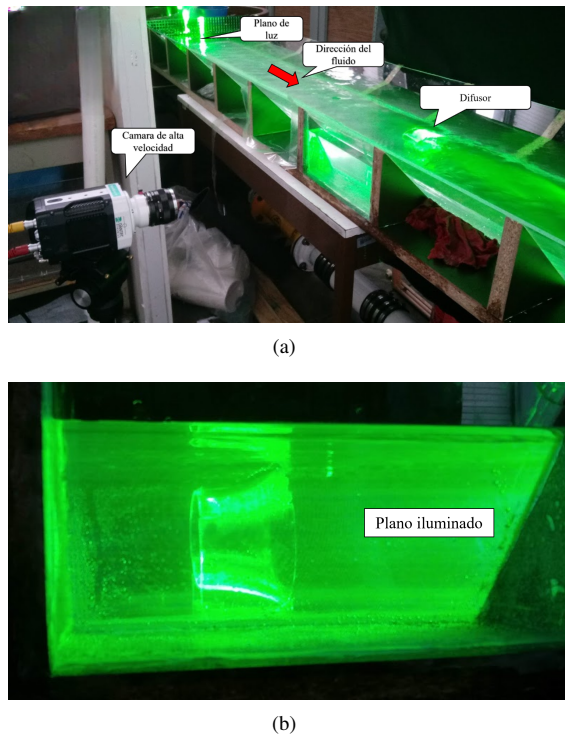


Fig. 6. Modelo experimental del canal. (a) Vista longitudinal del modelo del canal mostrando el PIV, (b) Vista lateral del con la Tobera-Difusor dentro del canal.

el plano central de la tobera-difusor del modelo.

Como resultado de la medición experimental, el incremento en la velocidad del fluido se puede apreciar con los contornos de velocidad en la Fig. 7(a). Esta velocidad se incrementó de 0.2584 m/s en el canal a 0.415 m/s en la tobera-difusor lo que indica un incremento en poco más del 60% de la velocidad del agua en el canal. La Fig. 7(b) muestra a través de las líneas de corriente como la tobera-difusor impide la expansión del flujo. La Fig. 7(c) muestra la comparación de los perfiles de velocidades en el canal (azul) y dentro de la tobera-difusor (naranja).

Este incremento de velocidad cambiaría la energía hidráulica disponible. En la Tabla IV se muestran la estimación de los incrementos alcanzados tanto en la velocidad así como en la energía hidráulica disponible. Se puede notar que ésta se incrementa en un aproximado de 43.15% aunque el área de barrido disminuya, y podrá ser aprovechada por el rotor de la turbina hidrocínética.

TABLE IV
EFECTO DE LA TOBERA-DIFUSOR EN LA ENERGÍA HIDRÁULICA

	Velocidad m/s	Area barrida m ²	Potencia W	Energía Anual kWh
Sin ducto	0.98	1.86	861.37	5659.18
Con ducto	1.567	0.6413	1233.11	8101.6

2) *Diseño del álabe del rotor*: El cálculo de rotor está basado en la aplicación de diferentes teorías que nos permitan

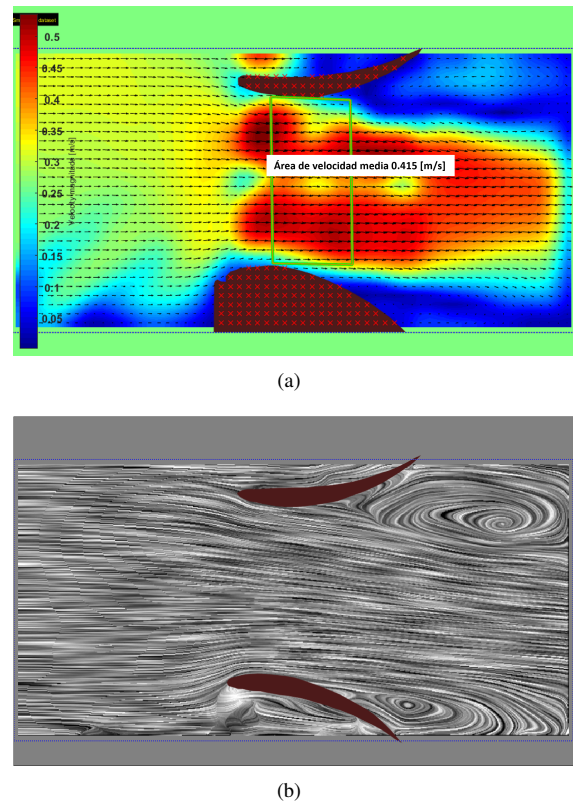


Fig. 7. Diferentes representaciones de la velocidad en el canal y en la tobera-difusor. (a) Vectores y contornos de velocidad, (b) Líneas de corriente, (c) Perfiles de velocidades.

interpretar la captación de potencia del agua a través del rotor. Así, se utilizará la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y el Límite de Betz, que nos permitirá plantear el balance general de fuerzas sobre el rotor utilizando el concepto de disco poroso, proporcionando el límite superior de extracción de energía de la corriente. También se utilizará la teoría del momento cinético, para poder tener en cuenta el intercambio de momento entre el flujo de agua y el rotor, junto a esta última. Se empleará la teoría turbillonaria en torno al rotor, permitiéndonos deducir el conjunto de velocidades y finalmente la teoría del elemento de pala, que hará posible

incluir los parámetros geométricos de la pala en el proceso de captación de energía, [22].

Los criterios para la selección de un perfil aerodinámico del álabe del rotor es buscar un alto valor en la relación existente entre el cociente del coeficiente de sustentación y el de arrastre CL/CD , ya que esto permite que el coeficiente de potencia aumente, [23]. Los perfiles más utilizados en el diseño de turbinas hidrocínéticas son el NACA 0012, 2415, 4412, 6412, NREL S833 y SG6043. Al analizarlos, se observa en la Fig. 8 que el perfil con mayor relación de CL/CD a diferentes Reynolds es el SG6043 por lo que será el perfil seleccionado para diseñar las aspas del rotor.

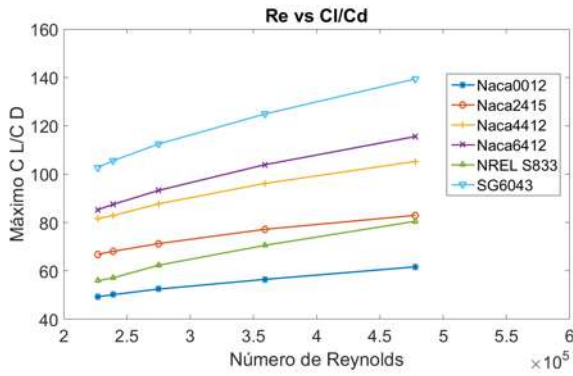


Fig. 8. Análisis de perfiles aerodinámicos.

El método de cantidad de movimiento del elemento de pala (BEM), implica dividir el aspa en varias partes y determinar la geometría del aspa en relación a la potencia. Los datos para el cálculo del rotor se resumen en la Tabla V.

TABLE V
DATOS PARA EL CÁLCULO DEL ROTOR

Variable	Valor
Velocidad (v)	1.567 m/s
Radio (r)	0.45 m
Viscosidad Cinemática (ν)	1.31×10^{-6}
Número de palas (B)	3
Velocidad Específica (λ)	4

Conociendo entonces la velocidad media del agua en el interior del difusor se realizó el proceso del diseño de los parámetros del álabe el cual, de acuerdo a [24] se debe dividir en diferentes secciones, en nuestro caso desde $i=1$ que es la raíz hasta $i=20$ que es el extremo del álabe, como se muestra en la Fig. 9 y así efectuar el proceso de diseño en cada sección de acuerdo al sistema de ecuaciones acopladas 3:

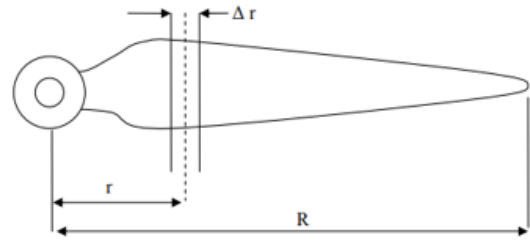


Fig. 9. División del álabe, $i = 1.....n = 20$.

$$\lambda_i = \frac{\omega r_i}{v} = \frac{\pi n r_i}{30v} \quad (3a)$$

$$a_i = \sqrt{\lambda_i^2 + 1} \cos \left(\frac{1}{3} \arctan(\lambda_i) + \frac{\pi}{3} \right) \quad (3b)$$

$$h_i = \sqrt{1 + \frac{1 - a_i^2}{\lambda_i^2}} \quad (3c)$$

$$\theta_i = \arctan \left(\lambda_i \frac{1 + h_i}{1 + a_i} \right) \quad (3d)$$

$$Q_i = \frac{8\pi r_i (1 - a_i) \sin^2 \theta_i}{B(1 + a_i) \cos \theta_i} \quad (3e)$$

$$c_i = \frac{Q_i}{C_L} \quad (3f)$$

$$Re = \frac{w_i c}{\nu} \quad (3g)$$

$$w = \frac{v(1 + a_i)}{2 \sin a_i} \quad (3h)$$

$$\beta_i = \theta_i - \alpha_i \quad (3i)$$

$$dP = \rho \pi v \omega^2 r_i^3 dr (1 - a_i)(h_i - 1) \quad (3j)$$

$$dM = \frac{dP}{\omega} \quad (3k)$$

$$C_p = \frac{\omega^2 r^2}{v^2} (1 - a_i)(h_i - 1) \quad (3l)$$

Donde:

r_i radio de la sección genérica,

λ_i velocidad específica en cada sección del álabe,

a_i factor de inducción axial a lo largo del álabe,

h_i coeficiente de rotación inducida,

θ_i ángulo de inclinación para cada sección del álabe,

Q_i coeficiente,

c Longitud de la cuerda,

α_i ángulo de ataque,

w es la velocidad relativa en la sección del álabe,

β_i el ángulo de calado en cada sección del álabe,

C_p Coeficiente de Potencia

dP Diferencial de Potencia.

Para calcular la longitud de la cuerda Ec. 3f, se asigna un valor inicial al coeficiente de sustentación $C_L = 1$, después se determina el número de Reynolds, Ec. 3g, y el resultado se ingresa al software QBlade [25], para obtener un nuevo valor de C_L . Este proceso se repite hasta que el valor de la cuerda ya no cambia. Se repite el procedimiento para las 20 secciones del álabe. Al tener el valor de la cuerda, el mismo software QBlade nos da como resultado el ángulo de ataque en cada sección. Para determinar la potencia local en la sección se utiliza la Ec. (3j), [22] y para el momento por la Ec. (3k).

Los resultados del cálculo del rotor se muestran en la Fig. 10. En la Fig. 10(a), se puede observar que la cuerda sufre un incremento cerca de la raíz para reducirse conforme se acerca al extremo del álabe. El ángulo de calado, Fig. 10(b), por su parte es muy similar. Sin embargo, ya llegando casi al extremo del álabe se pueden observar ángulos cercanos a cero. La Fig. 10(c) muestra la potencia transmitida por el álabe en cada sección dando un total de 722.875 W. La Fig. 10(d) muestra el momento par generado por el álabe en cada sección dando un total de 51.9 N-m.

Finalmente, la Fig. 11 presenta el modelo sólido del álabe en donde se puede observar la forma final del alabe.

La Tabla VI presenta los resultados del cálculo del rotor.

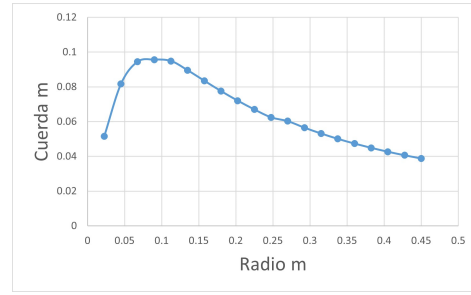
TABLE VI
CÁLCULO DEL ROTOR

P Mecánica W	C_p -	P ideal W	Par N-m
722.875	0.584	1284.374	51.907482

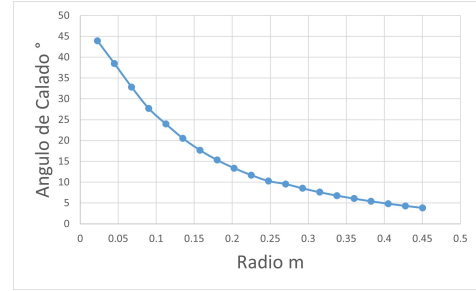
Comparando resultados, [26] muestra que a través de la optimización numérica de la forma del difusor es posible incrementar el CP en un 118%. Sin embargo, no evalúa la conversión de energía en él. [27] analiza la transferencia de energía en un recurso hídrico con una turbina helicoidal ductada utilizando Dinámica de Fluidos Computacional y mediciones experimentales. El máximo valor alcanzado por el C_p fue de 0.45. [28] obtiene un C_p arriba 0.9 modificando diferentes parámetros de forma del ducto sin considerar las aspas del rotor.

C. Conversión en Energía Eléctrica

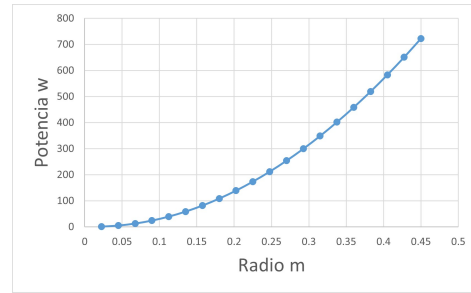
Un generador eléctrico síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) es un excelente candidato para el acoplamiento directo al rotor ya que son de diseño y manufactura simple, operan de manera silenciosa, generan electricidad a bajas velocidades y no necesitan un sistema de excitación externo, [29], [30]. Estudios en el diseño de generadores de imanes permanentes muestran que es posible generar energía a bajas revoluciones, [31], por lo que para nuestro estudio se buscará primero alcanzar esta velocidad de rotación y poder seleccionar en el mercado el que mejor se adapte a nuestra evaluación de energía.



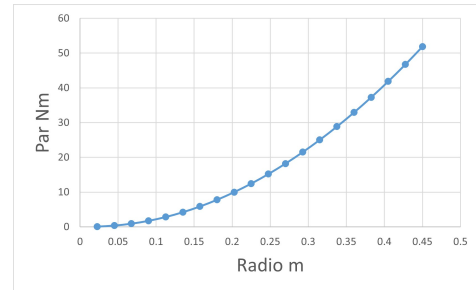
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10. Resultado de los parámetros del rotor. (a) Gráfica de la Cuerda, (b) Gráfica del Ángulo de Calado, (c) Gráfica de la Potencia y (d) Gráfica del Momento Par.

1) *Multiplicador de velocidades:* Ya que las revoluciones del rotor son de 132.98 rpm las cuales con muy pequeñas para hacer funcionar un generador eléctrico se debe adaptar un sistema de multiplicador de revoluciones con engranajes cónico helicoidales. Este sistema también servirá para cambiar el eje y poder colocar el generador fuera del agua. La relación de transmisión de engranajes, Fig. 12, es fundamental para generar el movimiento y el engranaje pueda soportar el par

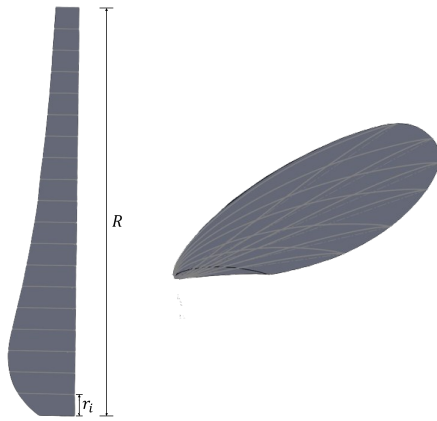


Fig. 11. División de la aspa, $i = 1.....n = 20$. Izquierda longitud de la cuerda y derecha Ángulo de Calado.

sin dar error y se calcula de acuerdo a la Ec. 4.

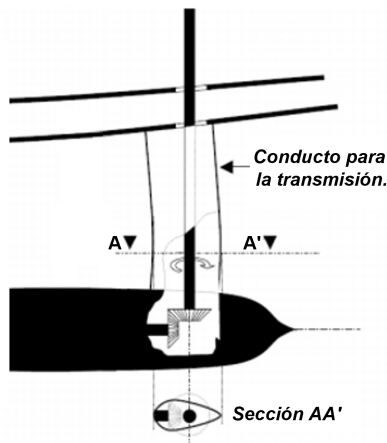


Fig. 12. Transmisión por engranajes cónicos helicoidales

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{600}{132.98} = \frac{4.512}{1} \quad (4)$$

Donde ω_s es la velocidad necesaria de salida y ω_e la velocidad obtenida. Así los engranes tendrán una relación de transmisión de 1 a 4.5 para hacer funcionar el generador a 600 rpm.

La eficiencia de los engranajes cónicos con buena lubricación se encuentra alrededor del 98.5% [32] logrando extraer 712.03 W del rotor.

2) *Generador Eléctrico*: La eficiencia de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) es ligeramente más alta que los generadores asíncronos de los cuales su eficiencia ronda en un 95%. [33]. Debido a que el diseño del generador esta fuera del alcance de esta investigación, se selecciona un generador comercial trifásico PMSG sin escobillas para obtener la potencia eléctrica, Fig. 13, el cual cuenta con las características mostradas en la Tabla VII.



Fig. 13. Generador Eléctrico PMSG

TABLE VII
CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR ELÉCTRICO

Potencia nominal:	1000 W
Voltaje nominal:	12/24 V
Velocidad de rotación:	600 rpm
Eficiencia:	>95%
Motor:	corriente trifásica PMSG
Sistema de control:	electromagnetismo
Peso:	2.8 kg
Corriente de Salida:	AC
Momento máximo de resistencia de arranque:	0.35 N-m

De acuerdo con [34] un generador de imanes permanentes puede mantener la máxima eficiencia sin importar las revoluciones por minuto, el generador seleccionado para este trabajo alcanza una eficiencia del 95% de acuerdo al fabricante.

Así, ya que la potencia entregada por el multiplicador de velocidad es de 712.03 W, el generador eléctrico seleccionado convertirá 676.43 W a potencia eléctrica.

V. ENERGÍA ÚTIL OBTENIDA

Todos los procesos de conversión de energía se muestran en la Fig. 14. Al diseñar una turbina hidrocinética partiendo del recurso hídrico disponible, con solo 9 meses de trabajo al año se puede extraer la mayor cantidad de energía lo que equivale a un total de 4,444.15 kWh de los 5,659.18 kWh que se tienen disponibles del agua.

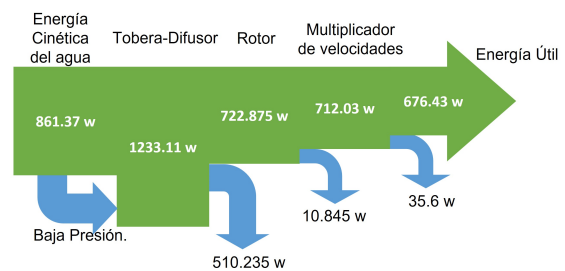


Fig. 14. Diagrama de Sankey mostrando la transformación de la potencia

VI. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó las diferentes etapas en el diseño de una turbina hidrocinética para extraer energía de un canal de riego:

- El estudio de la curva de duración de flujo y las características geométricas del canal muestran que con el caudal de $6.803 \text{ m}^3/\text{s}$ dispone de 5659.18 kWh de energía al año siendo esta la mayor cantidad de energía que se tiene disponible y como el objetivo es aprovechar al máximo el recurso hídrico se toma como caudal de diseño.
- El objetivo de incluir un carenaje en configuración de tobera-difusor ha sido el de incrementar la energía hidráulica disponible al aumentar la velocidad del fluido. Con mediciones en un modelo físico reducido se determinó que la velocidad del fluido se incrementa de 0.98 m/s hasta 1.57 m/s. Aunque se reduce el área de barrido del rotor obtenemos una energía eléctrica de 8101.6 kWh al año logrando un incremento de 43% de energía disponible para ser convertida a energía útil.
- El comportamiento de las líneas de corriente en la tobera-difusor nos muestran que su geometría no es la más adecuada ya que genera vórtices a la salida del ducto. En trabajos futuros se buscaría optimizar el perfil de la tobera para evitar o reducir estas zonas de recirculación que seguramente afectarían el comportamiento del flujo aguas abajo.
- En este estudio no se consideró el fenómeno de cavitación en la turbina debido a que debido a la velocidad alcanzada por el fluido no provoca que la disminución de presión dentro del ducto alcance la presión de vaporización del agua.
- La teoría BEM nos aporta una buena aproximación para diseñar el rotor capaz de aprovechar al máximo la velocidad del fluido. Con esta teoría se obtuvo un rotor capaz de extraer 722.875 W de los 1233.11 W que se tienen al instante con un torque de 51.9 N-m.
- La revolución del rotor se aumentó de 132.98 rpm a 600 rpm a través de un sistema multiplicador de revoluciones con engranajes cónico helicoidales que también servirán para cambiar el eje y poder colocar el generador fuera del agua. Estos engranes tendrán una relación de transmisión de 1 a 4.5 para hacer funcionar el generador.
- Un generador de imanes permanentes funciona con 600 rpm y la mejor opción de generador por el bajo mantenimiento que tienen y además aportan mayor eficiencia.

Finalmente, la eficiencia total alcanzada por el proceso es del 78.53%. Cabe destacar que este estudio es solo para una sección de todo el canal. Para este caso la geometría de este canal tiene la capacidad para albergar 2 turbinas en una sola sección lo que se cree que aumenta la extracción de energía.

Si consideramos que la metodología propuesta para el diseño de una turbina hidrocínética se puede aplicar a cualquier tipo de canal, esta puede ser un gran aporte para que las comunidades cercanas a estos canales puedan tener energía útil ya sea para sus cultivos o para su uso en general.

Con este estudio se identificó una tecnología atractiva por explorar la cual puede ser utilizada para abastecer energía eléctrica a aquellas zonas que cuenten con fuentes hídricas cercanas, sin necesidad de caídas o alturas de agua. Esto la convierte en una alternativa de baja inversión monetaria rondando los 250 dólares, asequible y de poco mantenimiento para poblaciones que por lo general se encuentran en zonas

aisladas y no cuentan con muchos ingresos económicos ni una adecuada calidad de vida.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) de México y a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por su apoyo para la realización de este proyecto.

REFERENCES

- [1] M. Anyi, B. Kirke, and S. Ali, "Remote community electrification in sarawak, malaysia," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 1609–1613, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.005>.
- [2] N. D. Laws and B. P. Epps, "Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1245–1259, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.189>.
- [3] H. Zhou, *Maximum power point tracking control of hydrokinetic turbine and low-speed high-thrust permanent magnet generator design*. Masters theses, Scholars Mine, Spring 2012. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5207.
- [4] L. Bindelli, M. Re, and L. D. Kazimierski, "Hydrokinetic energy potential in argentine estuaries with high tidal ranges," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 9, pp. 1049–1055, 2023. <https://doi.org/10.1109/TLA.2023.10251812>.
- [5] L. A. Gallo, E. L. Chica, and E. Florez, "Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad," *Ingeniería*, vol. 27, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.14483/23448393.18127>.
- [6] M. Kuschke and K. Strunz, "Modeling of tidal energy conversion systems for smart grid operation," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–3, IEEE, 2011. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039114>.
- [7] R. Van Arkel, L. Owen, S. Allison, T. Tryfonas, A. Winter, R. Entwistle, E. Keane, and J. Parr, "Design and preliminary testing of a novel concept low depth hydropower device," in *OCEANS '11 MTS/IEEE KONA*, pp. 1–10, IEEE, 2011. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6107051>.
- [8] G. Lilley and W. Rainbird, *A preliminary report on the design and performance of ducted windmills*. Report, College of Aeronautics, Cranfield, April 1956. <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7971>.
- [9] M. Suau de Castro, *Diseño y construcción de una mini-turbina eólica*. Tesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Enero 2014. <https://oa.upm.es/36428/>.
- [10] J. Martínez-Cruz, M. Méndez-Toribio, J. Cortés-Flores, P. Coba-Pérez, G. Cornejo-Tenorio, and G. Ibarra-Manríquez, "Estructura y diversidad de los bosques estacionales desaparecidos por la construcción de la presa gral. francisco j. mújica, en la depresión del balsas, michoacán, México," *Revista mexicana de biodiversidad*, vol. 84, no. 4, pp. 1216–1234, 2013. <https://doi.org/10.7550/rmb.33799>.
- [11] O. Paish, "Small hydro power: technology and current status," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 6, no. 6, pp. 537–556, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00006-0).
- [12] Semarnat, "Construcción y operación de la Presa General Francisco J. Mújica," 2007. <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/mich/estudios/2007/16MI2007H0006.pdf>.
- [13] J. K. Searcy, *Flow-duration curves*. No. 1542, US Government Printing Office, 1959.
- [14] M. V. Béjar, *Hidráulica de canales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008.
- [15] L. S. Lasdon, A. D. Waren, A. Jain, and M. Ratner, "Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming," *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, vol. 4, no. 1, pp. 34–50, 1978. <https://doi.org/10.1145/355769.355773>.
- [16] M. Anyi and B. Kirke, "Hydrokinetic turbine blades: Design and local construction techniques for remote communities," *Energy for Sustainable Development*, vol. 15, no. 3, pp. 223–230, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.06.003>.
- [17] P. Guzman-Avalos, D. Molinero-Hernández, S. Galván-González, N. Herrera-Sandoval, G. Solorio-Díaz, and C. Rubio-Maya, "Numerical design and optimization of a hydraulic micro-turbine adapted to a wastewater treatment plant," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 62, pp. 555–565, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.07.004>.

- [18] E. Chica, F. Perez, A. Rubio-Clemente, and S. Agudelo, "Design of a hydrokinetic turbine," *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 195, pp. 137–148, 2015.
- [19] C. GÁES, *Análisis Hidrodinámico de una Turbina Hidrocinética con difusor mediante herramientas numéricas*. Tesis, Universidad Austral de Chile, 2015. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2015/bmfca769a/doc/bmfca769a.pdf>.
- [20] R. J. Adrian and J. Westerweel, *Particle image velocimetry*. No. 30, Cambridge university press, 2011.
- [21] M. Ochowiak, S. Włodarczak, A. Krupińska, and M. Matuszak, "Particle image velocimetry based on matlab and pivlab for testing flow disturbing elements," in *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*, pp. 268–276, Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_27.
- [22] D. Torroglosa Giner *et al.*, *Diseño de un aerogenerador de 1.8 Mw*. Tesis, Universidad Politécnica de Cartagena, Octubre 2013. <https://www.academia.edu/download/52214973/AEROGENERADOR.pdf>.
- [23] J. E. M. Ferri, *Análisis del comportamiento aerodinámico de perfiles*. Masters theses, Universitat Politècnica de València, octubre 2012.
- [24] E. Navarrete-Duarte, E. Peralta-Escobar, and S. Galván-González, "Determinación de la potencia en una turbina hidrocinética utilizando diferentes perfiles de velocidades," https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A4_104.pdf.
- [25] D. Marten, J. Wendler, G. Pechlivanoglou, C. N. Nayeri, and C. O. Paschereit, "Qblade: an open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 264–269, 2013.
- [26] T. Rezek, R. Camacho, N. Manzaneres Filho, and E. Limacher, "Design of a hydrokinetic turbine diffuser based on optimization and computational fluid dynamics," *Applied Ocean Research*, vol. 107, p. 102484, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102484>.
- [27] S. Phommachanh, O. Shinnosuke, P. Sutikno, and A. Soewono, "Simulation and piv experiment of the ducted water current turbine and extremely low head helical turbine," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 54–69, 2013. <https://doi.org/10.11113/aej.v3.15391>.
- [28] M. Shives and C. Crawford, "Developing an empirical model for ducted tidal turbine performance using numerical simulation results," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 226, no. 1, pp. 112–125, 2012. <https://doi.org/10.1177/0957650911417958>.
- [29] I. H. Al-Bahady, *Wind turbines*. BoD–Books on Demand, 2011.
- [30] R. I. Putri, M. Rifa'i, L. Jasa, A. Priyadi, P. Margo, and H. P. Mauridhi, "Modeling and control of permanent magnet synchronous generator variable speed wind turbine," in *2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, pp. 16–20, IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICSGTEIS.2016.7885759>.
- [31] C. Claudio-Medina, A. Mayorga-Pardo, *et al.*, "Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica," *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 19, pp. 19–28, 2018. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.02>.
- [32] S. Padmanabhan, V. Srinivasa Raman, P. Asokan, S. Arunachalam, and T. Page, "Design optimisation of bevel gear pair," *International Journal of Design Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 364–393, 2011. <https://doi.org/10.1504/IJDE.2011.048133>.
- [33] P. Brooking and M. Mueller, "Power conditioning of the output from a linear vernier hybrid permanent magnet generator for use in direct drive wave energy converters," *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 152, no. 5, pp. 673–681, 2005. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20045134>.
- [34] L. Wei, T. Nakamura, and K. Imai, "Development and optimization of low-speed and high-efficiency permanent magnet generator for micro hydro-electrical generation system," *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 1653–1662, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.049>.



Eder Peralta Escobar Doctoral student at Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Graduated from the Instituto Tecnológico de Morelia as Mechanical Engineer in 2011. He got his master's degree in mechanical engineering at the same institution in 2015. His main research interests are the design, fabrication and installation of hydrokinetic turbines to existing water resources.



Sergio-Ricardo Galván-González Professor and Researcher at the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo managing as research lines the Refurbishment of Small Hydroelectric Power Plant. Graduated as a Mechanical Engineer at the Instituto Tecnológico de CD Madero. He completed his M. Sc. in Mechanical Engineering at the Instituto Politécnico Nacional at the LABINTHAP in ESIME Zacatenco. He got the Ph.D. degree by the École Polytechnic de Montreal in Canada, in the Department of Numerical Aero-thermal Engineering. He

worked at Comisión Federal de Electricidad in the Grijalva Hydroelectric Complex in the maintenance, reparation and put in service of the hydraulic turbines.



Gildardo Solorio Díaz Graduated from the Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo as Mechanical Engineer. He completed his Master's degree in Metallurgy and Materials Science at the Metallurgical Research Institute of the Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, as well as the Doctorate in Sciences with a Specialty in Metallurgy and Materials at the National Polytechnic Institute at the Higher School of Chemical Engineering and Extractive Industries. During his Postgraduate studies, he investigated the Control of Turbulence and Flow of Liquid Steel in a Continuous Casting Distributor Using the Feed ladle shroud. His field of study is transport phenomena in steel processes through numerical and experimental simulation.



Nicolás David Herrera Sandoval He got his BSc. and MSc. in Mechanical Design Engineering at the Instituto Tecnológico de Morelia. Later, he got his DSc in Mechanical Engineering at the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. His main fields of study are fluid dynamics, computational modeling and optimization. He served as the Coordinator of the Mechanical Engineering program from 2018 to 2021 in the Instituto Tecnológico de Morelia in Morelia Michoacan, and is currently the Department Head of that program. Also, he has taught classes in Fluid Mechanics and Computational Modeling in the same department since 2017. He has two publications in turbomachinery optimization through genetic algorithms and a chapter book on high performance computing.



Daniel Cahue Díaz Professor and Researcher in the Department of Mechanical Engineering at Tecnológico Nacional de México campus Morelia. He is a member of the National System of Researchers and is a reviewer of journal articles for Thermal Applied Engineering and Experimental thermal and fluid science. He has specialized in the field of thermal dissipation of semiconductor devices and in the design and development of heat pipes known as Heat Pipe.

Bibliografía

- [1] Redalyc. Impacto de la generación de electricidad en la contaminación ambiental. *Revista de Estudios Ambientales*, 10:15–25, 2018. URL <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329127739003.pdf>.
- [2] Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA). Estudio sobre el impacto ambiental del mix eléctrico en España. *APPA Publicaciones*, 2019. URL https://www.appa.es/wp-content/uploads/2019/10/Estudio_Impactos_MA_mix_electrico_APPA.pdf.
- [3] I Ball, L Berg, M Buiting, D Courret, D Laurent, M Dewitte, A Henke, W Janicki, C Munch-Alligne, L Lorezno Papetti, et al. Tecnologías de pequeña energía hidroeléctrica-innovaciones europeas de vanguardia. *Munich, Alemania: WIP Renewable Energies*, 2020.
- [4] Scielo México. Estudio y desarrollo de turbinas hidrocínéticas en canales de riego. *Revista Mexicana de Energía Renovable*, 5:120–130, 2018. URL https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222018000300180&script=sci_arttext.
- [5] Cordis. Aprovechamiento de la energía cinética en corrientes de agua. *European Research Publications*, 2019. URL <https://cordis.europa.eu/article/id/422058-go-with-the-flow-harnessing-the-energy-of-moving-water-to-generate-electricity>.
- [6] Martin Anyi, Brian Kirke, and Sam Ali. Remote community electrification in Sarawak, Malaysia. *Renewable Energy*, 35(7):1609–1613, 2010.
- [7] Nicholas D Laws and Brenden P Epps. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57:1245–1259, 2016.
- [8] Hailong Zhou. Maximum power point tracking control of hydrokinetic turbine and low-speed high-thrust permanent magnet generator design. 2012.
- [9] Lucas Bindelli, Mariano Re, and Leandro David Kazimierski. Hydrokinetic energy potential in Argentine estuaries with high tidal ranges. *IEEE Latin America Transactions*, 21(9):1049–1055, 2023.

- [10] Luis A Gallo, Edwin L Chica, and Elkin Florez. Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad. *Ingeniería*, 27(1), 2022.
- [11] Cristian Cardona-Mancilla, Jorge Sierra del Río, Edwin Chica-Arrieta, and Diego Hincapié-Zuluaga. Turbinas hidrocínéticas de eje horizontal: una revisión de la literatura. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(3):180–197, 2018.
- [12] Fredys Romero Menco, Ainhoa Rubio Clemente, and Edwin Chica Arrieta. Turbinas hidrocínéticas tipo propela: una alternativa para la generación de energía eléctrica. *Revista UIS ingenierías*, 21(3):111–134, 2022.
- [13] José Alejandro Pérez Martínez, Elizenia Sánchez Valdés, Pablo Sánchez Yañez, and Ariel Santos Fuentesfría. Estimación de energía de un parque hidrocínético: caso de estudio bahía de banes. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(1):81–94, 2021.
- [14] CAA GÁES. Análisis hidrodinámico de una turbina hidrocínética con difusor mediante herramientas numéricas. 2015.
- [15] Albert Betz. Die windmühlen im lichte neuerer forschung. *Naturwissenschaften*, 15 (46):905–914, 1927.
- [16] David Escánez Busquets. Diseño y fabricación de los álabes de un micro-aerogenerador de baja potencia. 2013.
- [17] David F. Thompson William J. Mouton, Jr. Turbine wheel with catenary blades, 1976.
- [18] BK Kirke and Leo Lazauskas. Limitations of fixed pitch darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch. *Renewable Energy*, 36(3):893–897, 2011.
- [19] AS Bahaj, AF Molland, JR Chaplin, and WMJ Batten. Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank. *Renewable energy*, 32(3):407–426, 2007.
- [20] Gerard JW Van Bussel. The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and theory revisited. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 75, page 012010. IOP Publishing, 2007.
- [21] M. S. Khalid, T. Zahid, A. B. Awan, and S. Rehman. Numerical and experimental study of hydrokinetic turbines for irrigation canals. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 11(4):043301, 2019.
- [22] WMJ Batten, AS Bahaj, AF Molland, and JR Chaplin. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines. *Renewable energy*, 33(5):1085–1096, 2008.

- [23] Glenn Cada, James Ahlgrimm, Michael Bahleda, Tom Bigford, Stefanie Damiani Stavrakas, Douglas Hall, Russell Moursund, and Michael Sale. Potential impacts of hydrokinetic and wave energy conversion technologies on aquatic environments. *Fisheries*, 32(4):174–181, 2007.
- [24] GM Lilley and WJ Rainbird. A preliminary report on the design and performance of ducted windmills. 1956.
- [25] Miguel Suau de Castro. Diseño y construcción de una mini-turbina eólica. 2014.
- [26] Juan Martínez-Cruz, Moisés Méndez-Toribio, Jorge Cortés-Flores, Paz Coba-Pérez, Guadalupe Cornejo-Tenorio, and Guillermo Ibarra-Manríquez. Estructura y diversidad de los bosques estacionales desaparecidos por la construcción de la presa gral. francisco j. mística, en la depresión del balsas, michoacán, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 84(4):1216–1234, 2013.
- [27] Oliver Paish. Small hydro power: technology and current status. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(6):537–556, 2002.
- [28] Semarnat. Construcción y operación de la Presa General Francisco J. Mística, 2007. URL <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/mich/estudios/2007/16MI2007H0006.pdf>.
- [29] James Kincheon Searcy. *Flow-duration curves*. Number 1542. US Government Printing Office, 1959.
- [30] Máximo Villón Béjar. *Hidráulica de canales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008.
- [31] E Chica, F Perez, A Rubio-Clemente, and S Agudelo. Design of a hydrokinetic turbine. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 195:137–148, 2015.
- [32] Ronald J Adrian and Jerry Westerweel. *Particle image velocimetry*. Number 30. Cambridge university press, 2011.
- [33] Daniel Torroglosa Giner et al. Diseño de un aerogenerador de 1.8 mw. 2013.
- [34] Ibrahim H Al-Bahadly. *Wind turbines*. BoD–Books on Demand, 2011.
- [35] Ratna Ika Putri, M Rifa'i, Lie Jasa, Ardyono Priyadi, P Margo, and Hery P Mauridhi. Modeling and control of permanent magnet synchronous generator variable speed wind turbine. In *2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, pages 16–20. IEEE, 2016.
- [36] Cristian Claudio-Medina, Alex Mayorga-Pardo, et al. Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (19):19–28, 2018.

- [37] Leon S Lasdon, Allan D Waren, Arvind Jain, and Margery Ratner. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 4(1):34–50, 1978.
- [38] Martin Anyi and Brian Kirke. Hydrokinetic turbine blades: Design and local construction techniques for remote communities. *Energy for Sustainable Development*, 15(3):223–230, 2011.
- [39] Pablo Guzman-Avalos, Daniel Molinero-Hernández, Sergio Galván-González, Nicolas Herrera-Sandoval, Gildardo Solorio-Diaz, and Carlos Rubio-Maya. Numerical design and optimization of a hydraulic micro-turbine adapted to a wastewater treatment plant. *Alexandria Engineering Journal*, 62:555–565, 2023.
- [40] K Subramanya. *Flow in open channels*. Tata McGraw-Hill, 2009.
- [41] Marek Ochowiak, Sylwia Włodarczak, Andżelika Krupińska, and Magdalena Matuszak. Particle image velocimetry based on matlab and pivlab for testing flow disturbing elements. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*, pages 268–276. Springer, 2021.
- [42] Javier Enrique Martinez Ferri. Análisis del comportamiento aerodinámico de perfiles. *Universitat Politècnica de València*, 2012.
- [43] Emireth Navarrete-Duarte, Eder Peralta-Escobar, and Sergio. Galván-González. Determinación de la potencia en una turbina hidrocínética utilizando diferentes perfiles de velocidades.
- [44] David Marten, Jan Wendler, Georgios Pechlivanoglou, Christian Navid Nayeri, and Christian Oliver Paschereit. Qblade: an open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3):264–269, 2013.
- [45] S Padmanabhan, V Srinivasa Raman, P Asokan, Subramaniam Arunachalam, and Tom Page. Design optimisation of bevel gear pair. *International Journal of Design Engineering*, 4(4):364–393, 2011.
- [46] PRM Brooking and MA Mueller. Power conditioning of the output from a linear vernier hybrid permanent magnet generator for use in direct drive wave energy converters. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 152(5):673–681, 2005.
- [47] TJ Rezek, RGR Camacho, N Manzanares Filho, and EJ Limacher. Design of a hydrokinetic turbine diffuser based on optimization and computational fluid dynamics. *Applied Ocean Research*, 107:102484, 2021.

- [48] Sounthisack Phommachanh, Obi Shinnosuke, Priyono Sutikno, and Aryadi Soewono. Simulation and piv experiment of the ducted water current turbine and extremely low head helical turbine. *ASEAN Engineering Journal*, 3(2):54–69, 2013.
- [49] Michael Shives and C Crawford. Developing an empirical model for ducted tidal turbine performance using numerical simulation results. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 226(1):112–125, 2012.

Anexos

Eder Peralta Escobar

DISEÑO DE UNA TURBINA MICRO HIDROKINÉTICA PARA CANALES DE RIEGO.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:435025395

Fecha de entrega

28 feb 2025, 2:17 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

28 feb 2025, 2:21 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

DISEÑO DE UNA TURBINA MICRO HIDROKINÉTICA PARA CANALES DE RIEGO.pdf

Tamaño de archivo

18.7 MB

77 Páginas

18,289 Palabras

92,902 Caracteres

31% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 30%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
20 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA	
Título del trabajo	DISEÑO DE UNA TURBINA MICRO HIDROCINÉTICA PARA CANALES DE RIEGO	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Eder Peralta Escobar	eder.peralta@umich.mx
Director	Dr. Sergio Ricardo Galván González	srgalvan@umich.mx
Codirector	Dr. Gildardo Solorio Díaz	gdiaz@umich.mx
Coordinador del programa	Dra. Georgina Carbajal de la Torre	georgina.carbajal@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Eder Peralta Escobar 
Lugar y fecha	Morelia Michoacan a 25 de febrero del 2025