

# 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 hidrocínicas 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 hidrocínicas 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 hidrocínicas 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 hidrocínicas 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 hidrocínicas 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 hidrocínica 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 hidrocínicas 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.

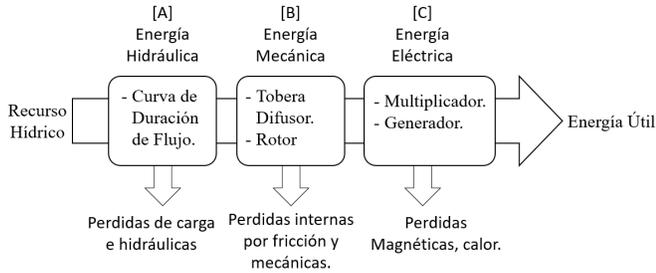


Fig. 1. Proceso de transformación de la energía.

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 hidrocínética que demuestre el aporte de energía eléctrica que podría suministrar a las zonas rurales cercanas al recurso hídrico en estado de Michoacán en México.



(a)



(b)

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 hidrocínética 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 m<sup>3</sup>/s el 100% del año, lo que corresponde a 8760 hrs.

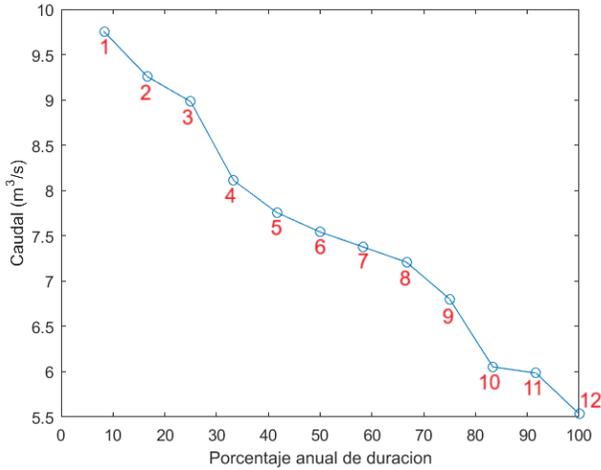


Fig. 3. Curva de Duración de Flujo (FDC).

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].

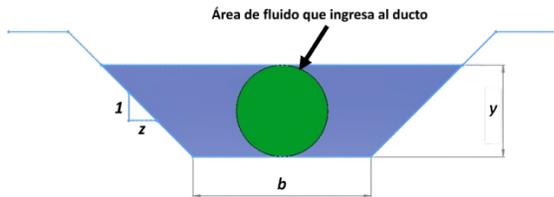


Fig. 4. Propiedades geométricas del canal.

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 hidrocínética 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 hidrocínética para generar energía eléctrica.

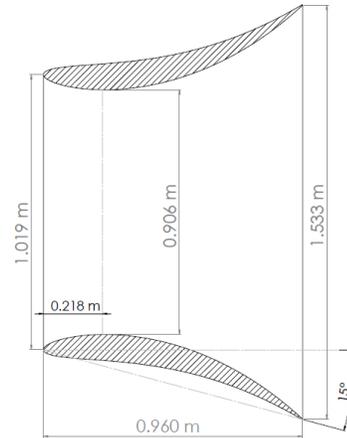
La Tabla II muestra que en el punto 9 se proporciona la mayor energía hidráulica disponible, 5659.18 kWh. Esto sucede con la disponibilidad del caudal el 75% del año, es decir, 6570 hrs.

### 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 uni- taria	Disponibilidad del caudal	Energía hidráulica anual
	<i>Wh</i>	<i>hr</i>	<i>kWh</i>
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.

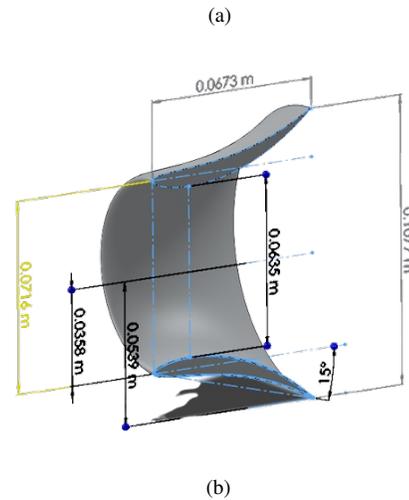


Fig. 5. Carenaje de la turbina en forma de tobera-difusor con perfil aerodinámico NACA 10510. a) Vista del perfil y dimensiones de la tobera-difusor b) Corte del modelo en 3D.

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.

TABLE III

COMPARACIÓN ENTRE EL CANAL REAL Y EL MODELO

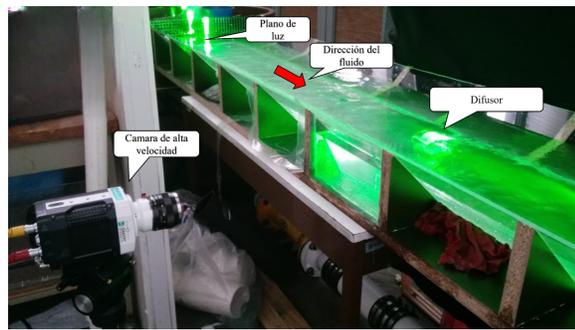
	Solera (b)	Caudal	Velocidad	Tirante (y)
	$\lambda$	$\lambda^{(5/2)}$	$\lambda^{(1/2)}$	$\lambda$
	m	$m^3/s$	m/s	m
Real	3	6.803	0.98	1.54
Modelo	0.21	0.0089	0.2584	0.1078

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  $\lambda = 14.28$ .

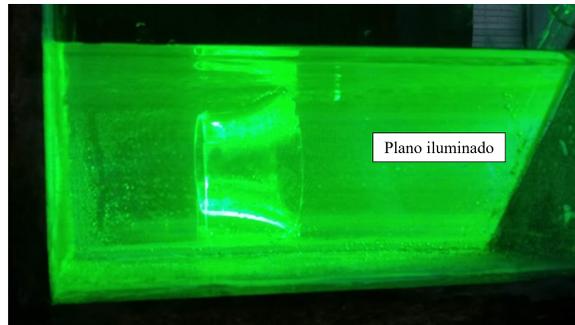
El modelo del canal se construyó con material de acrílico y se imprimió en 3D un molde para fabricar en dos partes el difusor también en acrílico ya que es un material transparente óptimo para tomar las mediciones. En la Fig. 6(a) se aprecia el armado del modelo del canal en conjunto con el equipo de 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.

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.

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



(a)



(b)

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.

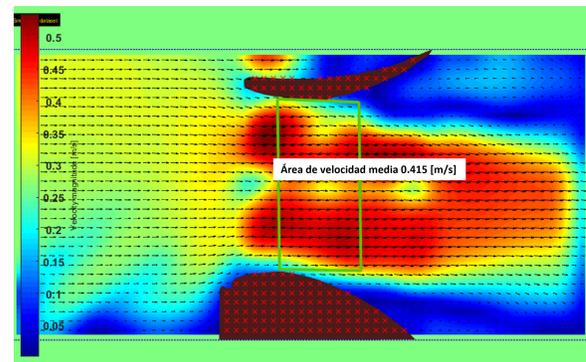
Como resultado de la medición experimental, el incremento en la velocidad del fluido se puede apreciar con los contornos de velocidad en la Fig. 7(a). Esta velocidad se incrementó de 0.2584 m/s en el canal a 0.415 m/s en la tobera-difusor lo que indica un incremento en poco más del 60% de la velocidad 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.

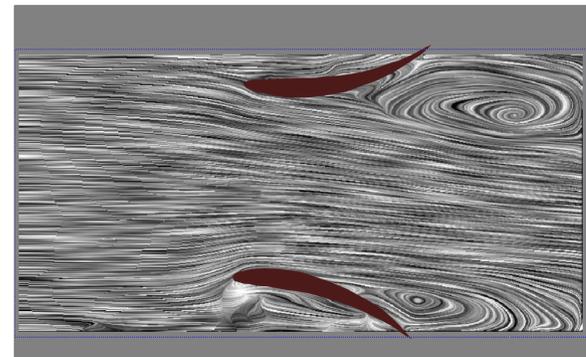
TABLE IV  
EFECTO DE LA TOBERA-DIFUSOR EN LA ENERGÍA  
HIDRÁULICA

	Velocidad m/s	Área barrida m <sup>2</sup>	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

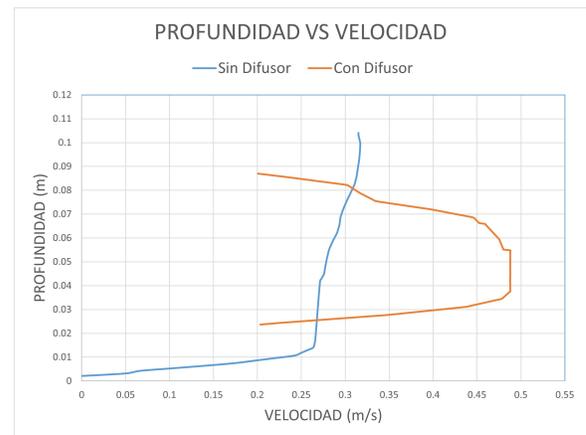
2) *Diseño del álabe del rotor*: El cálculo de rotor está basado en la aplicación de diferentes teorías que nos permitan



(a)



(b)



(c)

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 turbilionaria 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 hidrocinéticas 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.

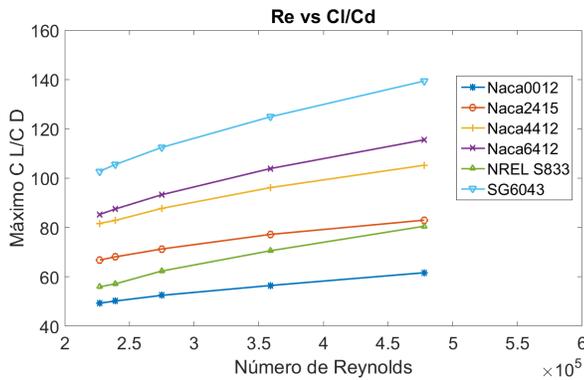


Fig. 8. Análisis de perfiles aerodinámicos.

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 ( $\nu$ )	$1.31 \times 10^{-6}$
Número de palas ( $B$ )	3
Velocidad Específica ( $\lambda$ )	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:

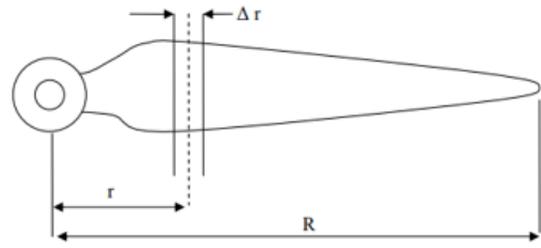


Fig. 9. División del álabe,  $i = 1 \dots \dots \dots n = 20$ .

$$\lambda_i = \frac{\omega r_i}{v} = \frac{\pi n r_i}{30 v} \tag{3a}$$

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

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

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

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

$$c_i = \frac{Q_i}{C_L} \tag{3f}$$

$$Re = \frac{w_i c}{\nu} \tag{3g}$$

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

$$\beta_i = \theta_i - \alpha_i \tag{3i}$$

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

$$dM = \frac{dP}{\omega} \tag{3k}$$

$$C_p = \frac{\omega^2 r^2}{v_1^2} (1 - a_i)(h_i - 1) \tag{3l}$$

Donde:

$r_i$  radio de la sección genérica,

$\lambda_i$  velocidad específica en cada sección del álabe,

$a_i$  factor de inducción axial a lo largo del álabe,

$h_i$  coeficiente de rotación inducida,

$\theta_i$  ángulo de inclinación para cada sección del álabe,

$Q_i$  coeficiente,

$c$  Longitud de la cuerda,

$\alpha_i$  ángulo de ataque,

$w$  = es la velocidad relativa en la sección del álabe,

$\beta_i$  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 de utiliza la Ec. (3j), [22] y para el momento par 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 álabe.

La Tabla VI presenta los resultados del cálculo del rotor.

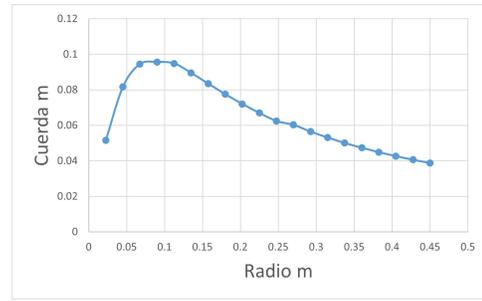
TABLE VI  
CÁLCULO DEL ROTOR

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

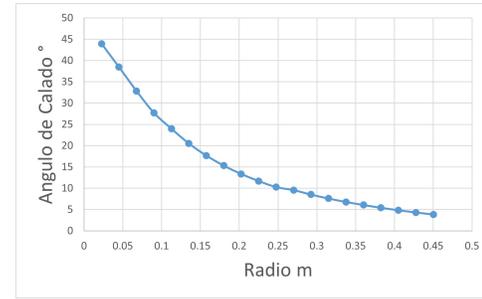
Comparando resultados, [26] muestra que a través de la optimización numérica de la forma del difusor es posible incrementar el CP en un 118%. Sin embargo, no evalúa la conversión de energía en él. [27] analiza la transferencia de energía en un recurso hídrico con una turbina helicoidal ductada utilizando 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

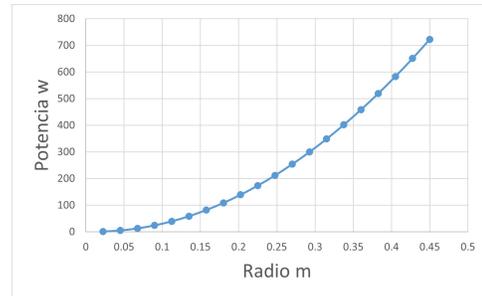
Un generador eléctrico síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) es un excelente candidato para el acoplamiento directo al rotor ya que son de diseño y manufactura simple, operan de manera silenciosa, generan electricidad a bajas velocidades y no necesitan un sistema 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.



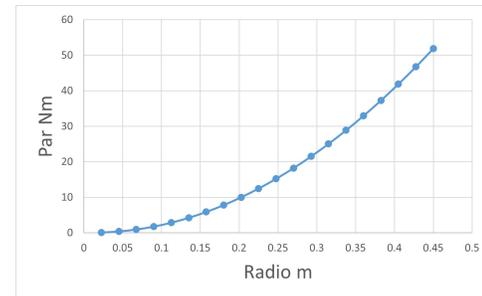
(a)



(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

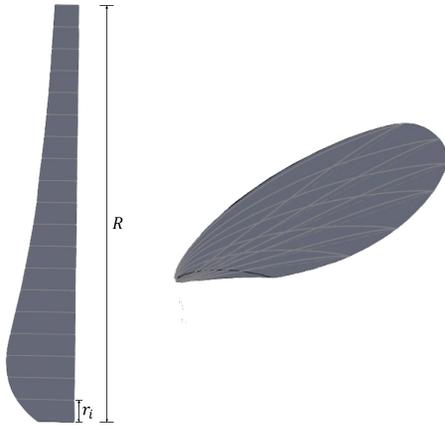


Fig. 11. División de la aspa,  $i = 1.....n = 20$ . Izquierda longitudud de la cuerda y derecha Ángulo de Calado.

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

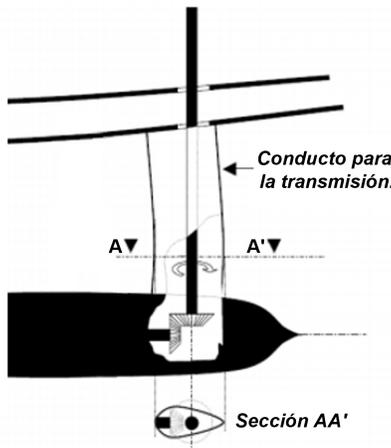


Fig. 12. Transmisión por engranajes cónicos helicoidales

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{600}{132.98} = \frac{4.512}{1} \tag{4}$$

Donde  $\omega_s$  es la velocidad necesaria de salida y  $\omega_e$  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.

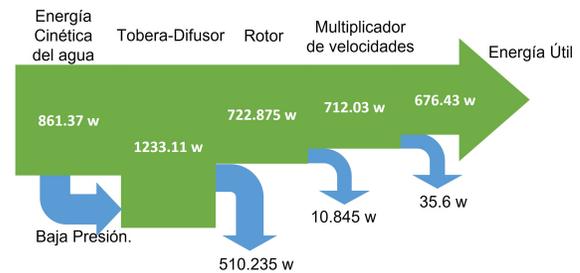


Fig. 14. Diagrama de Sankey mostrando la transformación de la potencia

### 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 hidrocíntrica 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 por 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](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. mística, 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. Mística," 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/bmficia769a/doc/bmficia769a.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](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](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. Manzanares 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-Bahadly, *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," *IEE 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.