

Análisis de la influencia del número de álabes en la hidrodinámica y potencia mecánica de un tornillo de Arquímedes empleando CFD

Influence analysis of blades number on the hydrodynamics and mechanical power of an Archimedes screw using CFD

Mohedano-Castillo, M.F. ; López-Rebollar, B. M. ¹; Díaz-Delgado, C. ¹;
Salinas-Tapia, H. ¹; Posadas-Bejarano, A. ¹

Recibido: 25 de octubre de 2022 – Aceptado: 22 de febrero de 2023

RESUMEN

Las centrales micro-hidroeléctricas se caracterizan por ser una tecnología de generación de energía renovable limpia, confiable y sostenible. En México, el 10.2% de la energía que se produjo en 2018 provenía de centrales hidroeléctricas y únicamente el 0.23% correspondía a micro centrales (Secretaría de energía, 2019). Este hecho fortalece la

necesidad de investigar e innovar acerca de dispositivos capaces de aprovechar el potencial hidroeléctrico disponible en el país para su explotación a microescala. Al respecto, el tornillo de Arquímedes es una tecnología con grandes ventajas al ser utilizada para la generación de electricidad. Sin embargo, se carecen de guías para su diseño e implementación.

¹ Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

Carretera Toluca-Atlacomulco km 14.5. C.P. 50295 Toluca, Estado de México.

Autores de correspondencia:

mfmc2409@gmail.com, bmllopezr@uaemex.mx, cdiazd@uaemex.mx



El objetivo del presente trabajo fue analizar la influencia del número de álabes del tornillo de Arquímedes en su hidrodinámica y generación de potencia mecánica empleando dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) con el fin de determinar las geometrías adecuadas para ser evaluadas en esquemas de simulación más complejos que contemplan el movimiento de rotación de la turbina.

Las principales fases del análisis fueron: 1) Diseño geométrico, tomando como base relaciones geométricas analizadas en literatura; 2) Simulación con CFD para la obtención de los campos de presión y velocidad además del torque en el tornillo; 3) Análisis de resultados para descartar geometrías y condiciones de operación no favorables.

Con el método empleado, se obtuvieron eficiencias superiores al 75% para un tornillo de Arquímedes con 6 álabes y potencia mecánica de 127.3 W. Por otra parte, los campos de velocidad y presión sugieren una buena transferencia de cantidad de movimiento en dispositivos con 2 y 3 álabes obteniendo potencias mecánicas de 37.7 y 57.2 W respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Tornillo de Arquímedes, CFD, microturbina hidráulica

ABSTRACT

Micro-hydroelectric plants are characterized by being a clean, reliable, and sustainable renewable energy generation technology. In Mexico, 10.2% of the energy produced in 2018

came from hydroelectric plants and only 0.23% corresponded to micro plants (Secretaría de Energía, 2019). This fact strengthens the need to investigate devices capable of taking advantage of the hydroelectric potential available in the country for its microscale exploitation. In this regard, the Archimedean screw is a technology with significant benefits when used to generate electricity. However, guidelines for its design and implementation are lacking.

This work aims to analyze the influence of the number of blades of the Archimedean screw on its hydrodynamics and mechanical power generation using CFD, to determine the appropriate geometries to be evaluated in more complex simulation schemes that contemplate the rotational movement of the turbine.

The main phases for this analysis consist of 1) Geometric design based on geometric relationships analyzed in the literature; 2) Simulation with CFD to obtain the pressure and velocity fields as well as the torque in the screw, and 3) Analysis of results to rule out unfavorable geometries and operating conditions. With the method employed, efficiencies greater than 75% were obtained for an Archimedean screw with six blades and mechanical power of 123 W. On the other hand, the velocity and pressure fields suggest a good momentum transfer in devices with 2 and 3 blades, obtaining mechanical powers of 37.7 and 57.2 W, respectively.

KEYWORDS: Archimedes screw, CFD, hydraulic microturbine

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un requerimiento esencial y su disponibilidad proporciona importantes beneficios a una nación. En efecto, estos beneficios se ven reflejados en mayor seguridad para la ciudadanía, incremento en la productividad, mejores servicios de salud, así como en la garantía de acceso adecuado a la información, educación y entretenimiento (Simmons & Lubitz, 2017). Sin embargo, existe una brecha cada vez mayor entre el suministro de energía y la creciente demanda. Tan sólo en México, se estima que alrededor de 1.8 millones de personas carecen de electricidad, las cuales en su mayoría habitan en comunidades rurales que se encuentran alejadas de la red eléctrica nacional (Secretaría de energía, 2020).

Las microcentrales hidroeléctricas (potencia menor a 1 MW) (Palacios et al., 2017) se han posicionado como una de las soluciones emergentes para la electrificación rural. Este tipo de infraestructura podría satisfacer la demanda energética de comunidades cercanas a pequeños ríos aprovechando el potencial hidroeléctrico disponible. A diferencia de las grandes centrales hidroeléctricas, las microcentrales no requieren de costosas construcciones, tampoco de grandes caídas de agua o de embalses para su funcionamiento. La generación hidroeléctrica es considerada como una de las energías renovables más eficientes, confiables y sostenibles por lo que es de las más utilizadas a nivel mundial (YoosefDoost & Lubitz, 2020).

Hoy en día, existen distintas turbinas que son capaces de generar hidroelectricidad. Sin embargo, no todas ellas son apropiadas para aprovechar el micro potencial hidroeléctrico disponible. En los últimos años se ha tenido especial interés en el dispositivo denominado tornillo de Arquímedes (Figura 1). Particularmente porque este dispositivo ofrece un conjunto de ventajas sociales, económicas y ambientales sobre otros dispositivos, como las que se presentan en la Tabla 1. Por otra parte, existen casos donde con el tornillo de Arquímedes se ha obtenido hasta un 15% más de energía anual en comparación con una turbina Kaplan para condiciones similares de operación (Adlard, 2011).

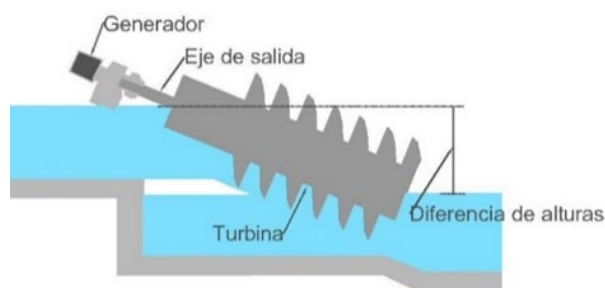


FIGURA 1.
TORNILLO DE ARQUÍMEDES COMO GENERADOR DE ELECTRICIDAD (ELABORACIÓN PROPIA).

TABLA 1.
VENTAJAS DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES (ELABORACIÓN PROPIA).

Tipo	Ventajas
Económicas	*Requiere de poco mantenimiento, lo que lo hace idóneo para países y regiones no desarrolladas *Se prevé que los costos generales de funcionamiento y mantenimiento sean inferiores a los de otras turbinas (Bennion, 2013) *Genera hasta un 15% más de energía anual que una turbina Kaplan (Adlard, 2011) *Permite la generación de electricidad en lugares donde no es posible construir grandes presas.
Sociales	*Fabricación local, lo que fomenta el empleo (Simmons & Lubitz, 2017). *Su uso podría contribuir a reducir la dependencia al diésel y queroseno para linternas y estufas disminuyendo el riesgo de incendios y contaminación del aire al interior de las viviendas.
Ambientales	*No obstruye la migración de peces ya que permite su paso a través de los álabes (Fishtek consulting, 2008) *Permite el paso de sedimentos y escombros flotantes (Rinaldi et al., 2013). *Se pueden utilizar para generar energía eléctrica a partir de aguas residuales no tratadas (International Water Power & Dam Construction, 2010)

El tornillo de Arquímedes es un dispositivo inventado por Arquímedes de Siracusa y desde hace miles de años es utilizado para bombeo. Sin embargo, una aplicación más reciente es como turbina para generar energía eléctrica (Lubitz et al., 2014).

Este dispositivo consta de un eje cilíndrico alrededor del cual se envuelven una o más superficies helicoidales denominadas álabes. El agua llega por la parte superior del tornillo formando prismas de agua que se trasladan por la longitud del tornillo, la presión hidrostática que ejerce el agua sobre el tornillo es lo que provoca que éste gire, por lo que al acoplarlo con un generador es posible producir energía eléctrica. Este artefacto es capaz de operar con alturas de caída de agua que van desde menos de 1 m hasta 10 m y con un rango de caudal de 10 l/s hasta 10 000 l/s dependiendo de las dimensiones del dispositivo (Shahverdi et al., 2020). Estas condiciones favorecen su implementación en pequeños cursos de agua que otras turbinas no son capaces de aprovechar. Las principales características geométricas del tornillo de Arquímedes se muestran en la Figura 2, las cuales incluyen el diámetro exterior (D_o), diámetro interior (D_i), paso (S), número de álabes (N), longitud (L) y ángulo de inclinación (β).

Este estudio tiene como objetivo el análisis y la revisión de la presencia de contaminantes, así como los cambios en la fisicoquímica de la calidad del agua derivado de la incorporación de contaminantes asociados a la infiltración del lixiviado de los rellenos sanitarios, así como su efecto a la salud y al ambiente.

Al ser el tornillo de Arquímedes relativamente una tecnología nueva para la generación de electricidad carece de guías de diseño, normas o reglas específicas para su diseño hidráulico óptimo. En este estudio se proponen una serie de pasos a seguir para analizar la influencia que tiene el número de álabes en estos dispositivos para la generación de potencia mecánica, así como

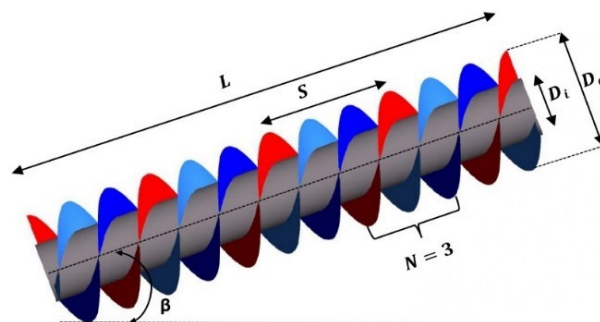


FIGURA 2.
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES (ELABORACIÓN PROPIA).

en su hidrodinámica. Su análisis se efectúa mediante el uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) pudiendo aplicar este método a tornillos con distintas características geométricas y condiciones de operación.

La CFD es una de las ramas de la mecánica de fluidos que predice el flujo de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados resolviendo las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos a través de la modelación numérica (Jeong & Seong, 2014). En efecto, el comportamiento de un flujo dentro de un medio se puede predecir mediante la solución aproximada de las ecuaciones diferenciales que describen la conservación de masa y momentum (López, 2015), las cuales generalmente no pueden ser resueltas analíticamente. Para obtener una solución numérica aproximada se ocupa el método de discretización del dominio. Este método aproxima las ecuaciones diferenciales a un sistema algebraico de ecuaciones que posteriormente pueden ser resueltas en un computador (Mata Cárdenas, 2017).

Una de las principales ventajas del uso de la CFD es que reduce el tiempo y gastos económicos que se llevan en la experimentación, permitiendo analizar una gama de condiciones y fenómenos específicos (Hu, 2012). Sin embargo, cabe resaltar, que el uso de la CFD y la experimentación son complementarios entre sí.

Para este trabajo, se utilizó Ansys Fluent siendo el software de simulación de fluidos líder en la industria y reconocido por sus capacidades avanzadas de modelado físico y precisión. Esta herramienta permite analizar una variedad de fenómenos de fluidos en una interfaz amigable e intuitiva lo que facilita su uso. La base de la simulación numérica es la solución aproximada e iterativa de las ecuaciones gobernantes de la mecánica de fluidos: conservación de masa, cantidad de movimiento y energía (Tu et al., 2013), así como modelos de turbulencia, multifásicos, entre otros.

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Ecuaciones de cantidad de movimiento (momentum):

$$M_x \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$M_y \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$M_z \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial z^2} \quad (4)$$

Ecuación de la energía:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

Donde: x, y, z son los ejes del sistema coordenado u, v, w son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad, ρ es la densidad del fluido, p es la presión absoluta, T es la cantidad de calor del fluido, C_p es el calor específico del fluido, λ es la conductividad térmica y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales acopladas no lineales y están dentro de las ecuaciones mejor conocidas y más difíciles de las ciencias de la ingeniería. A partir de estas ecuaciones, se pueden obtener ecuaciones para casos especiales (flujo estacionario, bidimensional) omitiendo los términos adecuados.

El uso de este software permitió innovar y optimar el diseño del tornillo de Arquímedes colaborando en la toma de decisiones para la mejora del dispositivo, reduciendo significativamente el tiempo de análisis que se llevaría en un proceso de experimentación física.

En este trabajo, es de interés conocer la influencia del número de álabes en el campo de velocidades y presión, siendo indicadores de la transferencia de energía entre el fluido y la turbina. Además, el software permitió la obtención del momento de torsión generado por los álabes en el eje de la turbina, siendo esta información de gran utilidad para la determinación de la potencia mecánica y la eficiencia de cada uno de los dispositivos.

METODOLOGÍA

En esta sección, se exponen cada una de las etapas propuestas y llevadas a cabo en el proceso de este trabajo de investigación. En la Figura 3 se presenta un esquema general del método de análisis propuesto:

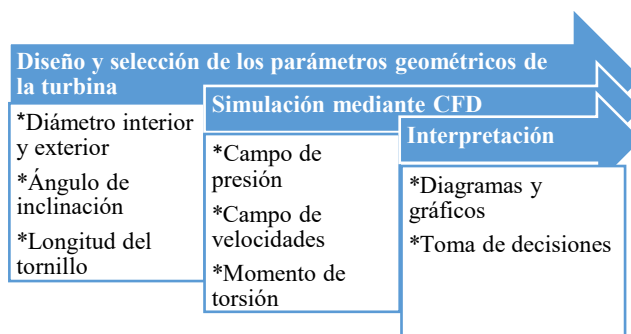


FIGURA 3.

DIAGRAMA GENERAL DEL MÉTODO DE ANÁLISIS PROPUESTO (ELABORACIÓN PROPIA).

Diseño y selección de los parámetros geométricos de la turbina.

Las dimensiones geométricas propuestas se encuentran asociadas con los dos objetivos siguientes:

- Diseñar un dispositivo con dimensiones físicas que sea fácil de transportar para su futura validación en campo.
- Considerar que las dimensiones del dispositivo permitan realizar pruebas experimentales en la infraestructura disponible del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) una vez que haya sido optimado el número de álabes mediante Ansys Fluent.

La

Tabla 2 resume las dimensiones de los 6 dispositivos seleccionados. Cabe mencionar que se ha realizado una recopilación de estudios tanto teóricos como experimentales que han permitido delimitar algunas relaciones geométricas de diseño óptimas del tornillo de Arquímedes (Lubitz et al., 2014), las cuales son utilizadas para el diseño propuesto: $\frac{D_i}{D_o} = 0.5$, $\frac{S}{D_o} = 1$ y $\frac{L}{D_o} = 4$.

TABLA 2.

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LAS TURBINAS EVALUADAS (ELABORACIÓN PROPIA)

Parámetro	Dimensión
Diámetro exterior (D_o)	494 mm
Diámetro interior (D_i)	247 mm
Paso (S)	494 mm
Longitud (L)	2000 mm
Ángulo de inclinación (β)	20°
Número de álabes (N)	1, 2, 3, 4, 5 y 6

Simulación mediante CFD.

La simulación mediante CFD se compone principalmente de 5 etapas, las cuales se muestran en la Figura 4.

1.- Modelo conceptual	*Geometría 3D
	*Generación del dominio de fluido
2.- Mallado	*Discretización del dominio
	*Análisis de sensibilidad de malla
3.- Set Up	*Modelo de turbulencia
	*Esquema de solución y estado del flujo
4.- Solución	*Variables de monitoreo
	*Iteraciones que garanticen convergencia
5.-Postproceso	*Gráficos, contornos, líneas de flujo, videos etc.

FIGURA 4.

ETAPAS PRINCIPALES PARA LA SIMULACIÓN MEDIANTE CFD (ELABORACIÓN PROPIA).

Modelo conceptual

En lo referente al modelo conceptual, se presenta un ejemplo en la Figura 5. En la que puede observarse el dominio de fluido, así como las fronteras y secciones de interés.

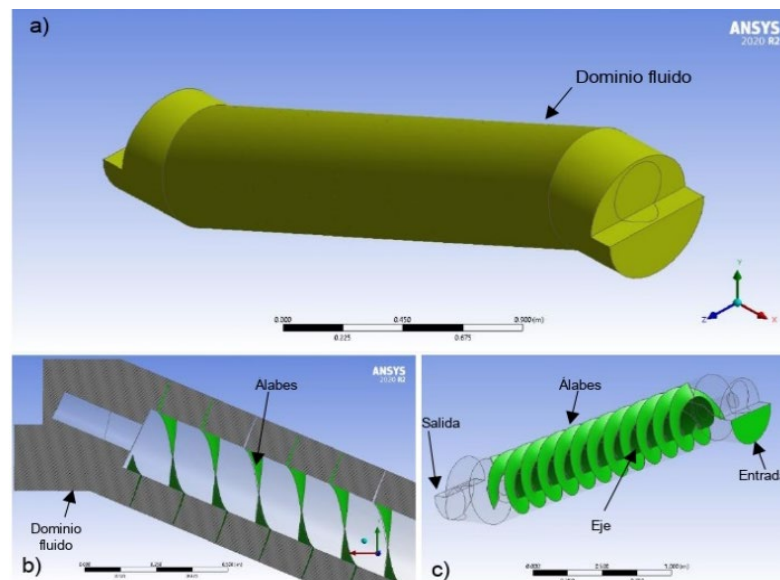


FIGURA 5.

MODELO GEOMÉTRICO A) DOMINIO DE FLUIDO, B) CORTE DEL DOMINIO DE FLUIDO, C) SUPERFICIES DE INTERÉS. (ELABORACIÓN PROPIA).

Malla

Esta etapa consiste en la discretización del dominio que se pretende modelar. Se utilizó una malla tetraédrica no estructurada debido a la adaptabilidad que presentan para geometrías complejas (Figura 6).

Previo a la selección del mallado adecuado, se realizó un análisis de sensibilidad de malla con el objetivo de garantizar la independencia de los resultados respecto a su tamaño. Con dicho análisis se logró determinar la malla adecuada para el caso de estudio, tomando en cuenta criterios como, calidad ortogonal de la malla, tiempo de simulación y convergencia de resultados. Se utilizó un tamaño de elemento de 15 mm obteniendo una calidad ortogonal mayor a 0.75 resultando en una muy buena calidad de malla de acuerdo con lo sugerido por ANSYS (Ahmad et al., 2013). El tiempo de simulación fue de 2 horas.

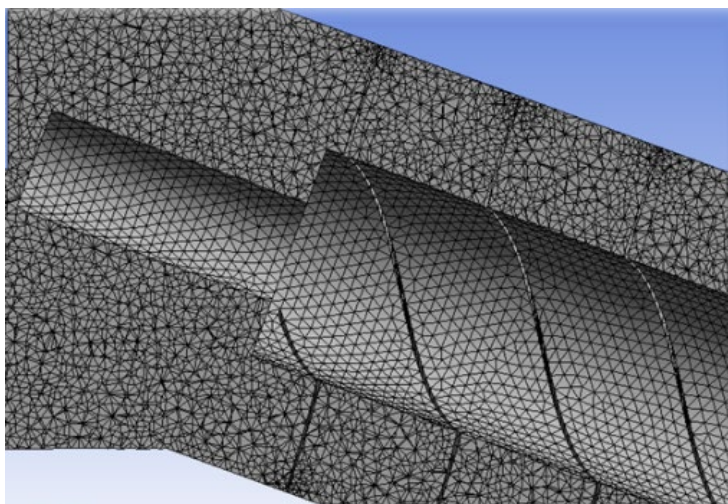


FIGURA 6.

DETALLE DE LA MALLA TETRAÉDRICA NO ESTRUCTURADA (ELABORACIÓN PROPIA).

Set Up

En esta etapa se seleccionó el agua como fluido de trabajo; el esquema de solución basado en la presión; el estado de flujo estacionario; el modelo de turbulencia SST k- ω (shear stress transport, por sus siglas en inglés) y la turbina en un esquema estático. Es de suma importancia resaltar que se utilizó un esquema de simulación con la turbina estática con la finalidad de comparar resultados con otros estudios que han empleado un método de análisis similar al desarrollado en este trabajo (Khan et al., 2019; Maulana, Syuhada, & Almas, 2018; Maulana, Syuhada, & Nawawi, 2018; Rosly et al., 2016).

Este tipo de simulación permite obtener una primera aproximación al torque generado por la turbina, así como su evaluación hidrodinámica.

Para la condición de frontera en la entrada se consideró una velocidad de flujo de 0.25 m/s la cual corresponde a un caudal de diseño de 24.5 l/s. En la salida se empleó la condición de presión atmosférica idealizando que el agua sigue su trayectoria a flujo libre.

Solución

En esta etapa, fue necesario verificar la convergencia de los resultados obtenidos, a través del monitoreo de las variables de interés que permitieron garantizar la solución numérica, entre ellos están los siguientes:

- Flujo másico en entrada y salida para garantizar continuidad.
- Velocidad del flujo en la salida y en el dominio de fluido para garantizar el estado final del flujo.
- Presión en el dominio de fluido y sobre los álabes.
- Momento de torsión o torque sobre los álabes de la turbina.

En la Figura 7 se muestra el resultado de convergencia del flujo másico para la turbina de 2 álabes. El número de iteraciones se estableció en 1000 y fueron suficientes para mantener un comportamiento estable en los resultados numéricos.

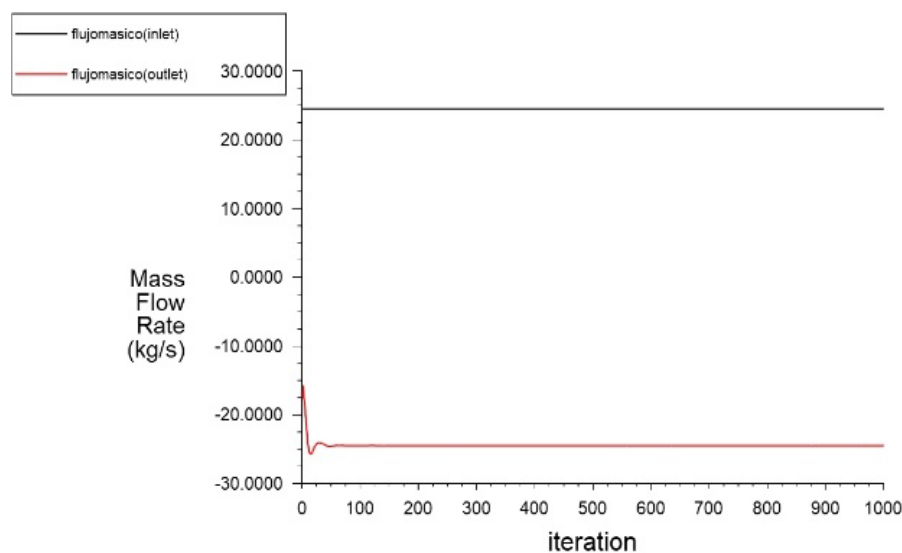


FIGURA 7.
MONITOR DE FLUJO MÁSIKO DE LA TURBINA DE 2 ÁLABES (ELABORACIÓN PROPIA).

Postproceso

En el postproceso se obtuvieron el campo de velocidades y presión en el dominio, así como el momento de torsión en cada una de las turbinas analizadas ya que este dato es indispensable para obtener la potencia mecánica generada mediante la siguiente expresión (Erinofardi et al., 2017):

$$P_{mecánica} = \omega T \quad (6)$$

Donde: $P_{mecánica}$ es la potencia mecánica de la turbina (W) ω es la velocidad de rotación angular de la turbina (rad/s) y T el torque (Nm).

Posteriormente, para el cálculo de la eficiencia es necesario conocer la potencia hidráulica y ésta se obtiene mediante la siguiente expresión (Lyons & Lubitz, 2013):

$$P_{hidráulica} = \rho g Q H \quad (7)$$

Donde $P_{hidráulica}$ es la potencia hidráulica (W), ρ es la densidad del agua (kg/m³), g la aceleración de la gravedad (m/s²), Q el caudal (m³/s) y H la carga neta disponible (m).

Finalmente para obtener la eficiencia de la turbina ($\eta_{turbina}$) (Erinofardi et al., 2017) se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta_{turbina} = \frac{P_{mecánica}}{P_{hidráulica}} \quad (8)$$

Interpretación

En la última etapa del estudio se evaluaron diferentes criterios de selección de la turbina ideal, los cuales se han empleado en otros trabajos de investigación. Por lo que, en este caso se realizó una recopilación de los criterios utilizados, para generar una evaluación e interpretación más completa.

Dentro de los rubros evaluados, se consideraron los siguientes: potencia mecánica, eficiencia y comportamiento de la presión y velocidad a lo largo del tornillo (Khan et al., 2019; Maulana, Syuhada, & Almas, 2018; Maulana, Syuhada, & Nawawi, 2018; Rosly et al., 2016).

RESULTADOS

En esta sección, se presentan y analizan los resultados obtenidos para las 6 turbinas estudiadas, con base en la metodología propuesta. Para ello, se inicia con el análisis de los campos de velocidad y presión seguido de la obtención del torque para obtener la eficiencia de los dispositivos; y se

finaliza con la selección de geometrías mejor evaluadas hidrodinámicamente. Cabe recordar que se evaluaron las turbinas con las características geométricas presentadas en la Tabla 2.

Campos de presión y velocidad

Una de las ventajas del uso de la CFD para el análisis de turbinas, es que permite obtener y observar los campos de presión y velocidad a lo largo del dispositivo, lo que facilita la toma de decisiones y mejoras en el diseño.

El campo de presión y velocidad, son de amplio interés para el análisis del tornillo de Arquímedes ya que esta turbina gira gracias a la presión hidrostática que genera el peso de agua a través de sus álabes, por lo que a lo largo del dispositivo se esperan cambios en estos parámetros. Siendo éstos los indicadores de la transferencia de cantidad de movimiento entre el agua y la turbina.

Al aumentar el número de álabes incrementa la presión ejercida sobre los álabes tal y como se aprecia en la Figura 8 ya que esto ocasiona mayor acumulación de flujo a la entrada de la turbina aumentando así la presión. Por otra parte, puede observarse el comportamiento de la presión a lo largo de los álabes de las turbinas identificándose las presiones más bajas en la turbina con 1 álabe y las más altas en la turbina con 6 álabes. Esta diferencia es más notoria a la entrada de los tornillos de Arquímedes.

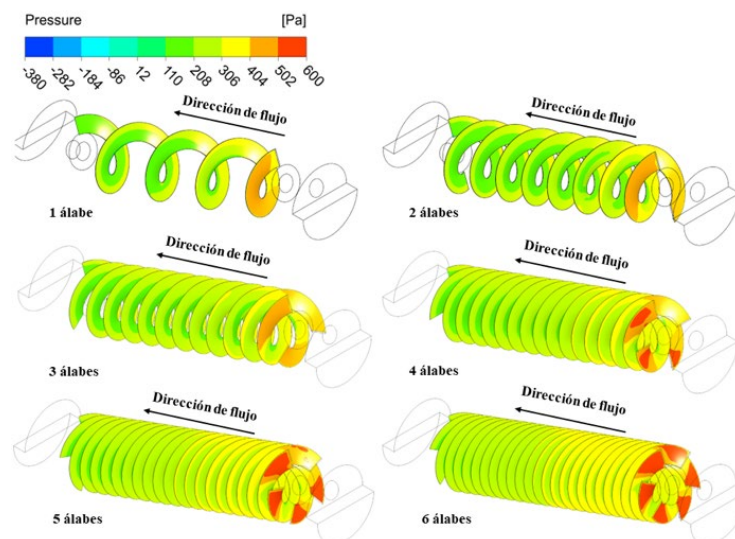


FIGURA 8.
CONTORNOS DE PRESIÓN SOBRE LOS ÁLABES DE LAS TURBINAS (ELABORACIÓN PROPIA).

Con el fin de observar la tendencia de los parámetros de presión y velocidad en distintos puntos de la turbina, se seleccionaron 3 planos de análisis (Figura 9):

- ✓ Plano 1: A la entrada de la turbina
- ✓ Plano 2: A la mitad de la turbina (1 m)
- ✓ Plano 3: A la salida de la turbina

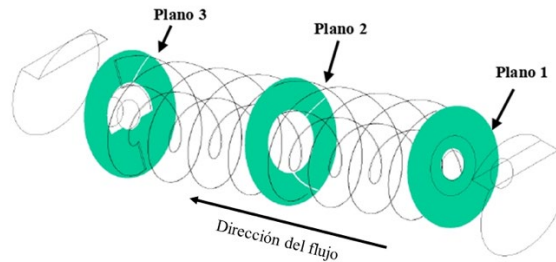


FIGURA 9.
PLANOS DE ANÁLISIS DE LAS TURBINAS (ELABORACIÓN PROPIA).

En la Figura 10 se expone la presión obtenida en cada uno de los planos de análisis. Coincidiendo con el análisis anterior, a mayor número de álabes mayor presión a la entrada de la turbina con el mismo caudal de llegada, ya que éstos ocasionan un frenado en el flujo aumentando de esta manera la presión. Por otra parte, en la salida del dispositivo se tienen presiones cercanas a 200 Pa, lo que implica la existencia de transferencia de momento.

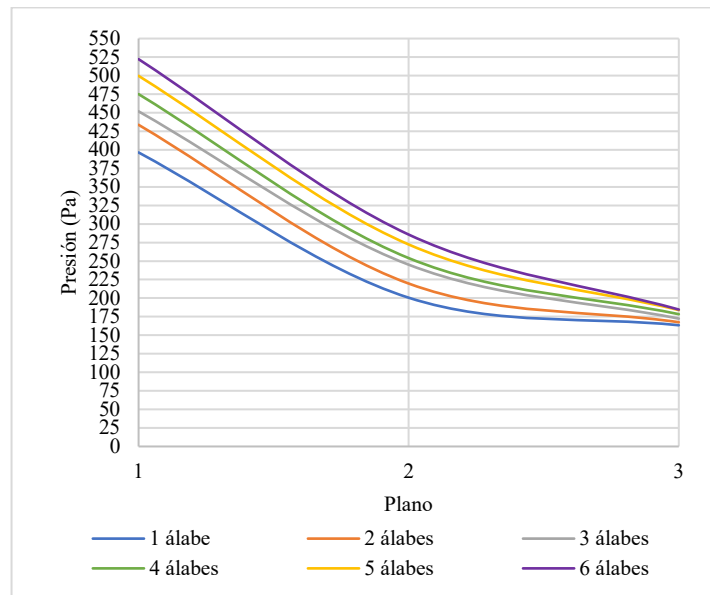


FIGURA 10.
COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN A LO LARGO DE LAS TURBINAS (ELABORACIÓN PROPIA).

El análisis de velocidad, resumido por la Figura 11 considera su evolución en los distintos planos seleccionados para las 6 turbinas.

Como se ha mencionado, se espera que la velocidad tenga un comportamiento inverso a la presión por lo que la velocidad aumentará a la salida de la turbina. Así, con base en la Figura 11 se puede notar que de acuerdo con este criterio se tiene una mayor transferencia de momento entre el plano 1 y 2 obteniendo los valores de velocidad más altos en las turbinas con 2 y 3 álabes.

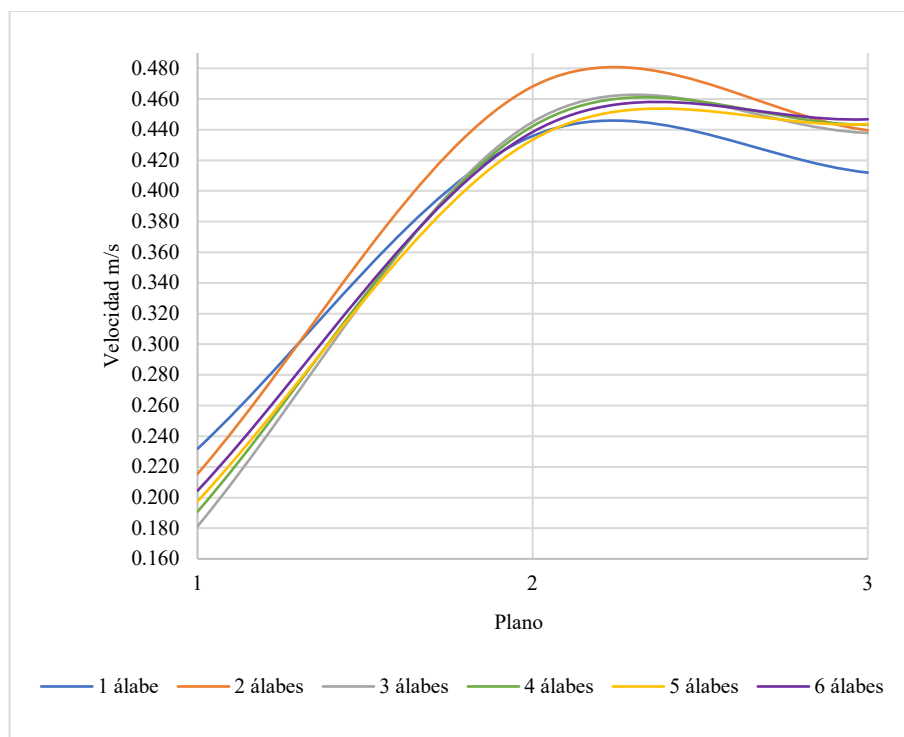


FIGURA 11.

DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD A LO LARGO DE LAS TURBINAS (ELABORACIÓN PROPIA).

Torque, potencia mecánica y eficiencia

Derivado del análisis fue posible obtener el momento de torsión en el tornillo de Arquímedes, siendo de utilidad para calcular la potencia mecánica generada por la turbina, tal y como se presentó en la sección de metodología. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos, considerando una potencia hidráulica de 164.30 W y una velocidad angular de 1.71 rad/s para todos los casos evaluados. Se presentó el mayor torque y eficiencia para la turbina de 6 álabes situación que era de esperarse ya que, al tener mayor área de contacto entre el fluido y la turbina, esta última experimenta mayor presión.

DISCUSIÓN

Una vez analizados los parámetros más relevantes del dispositivo, se identificó que la turbina con 6 álabes es la que presenta mayor presión a la entrada y en consecuencia mayor torque al contar con una mayor área de contacto entre el fluido y la superficie de la turbina. Esta turbina, presentó una eficiencia de 77% y potencia mecánica máxima de 127.3 W comparado con las otras

geometrías propuestas y que fueron evaluadas bajo las mismas condiciones de operación. Sin embargo, las simulaciones realizadas corresponden a un esquema de simulación con el tornillo estático, similar a lo realizado en otros estudios (Khan et al., 2019; Maulana et al., 2018; Rosly et al., 2016) con la finalidad de comparar las eficiencias y campos de flujo.

TABLA 3.
TORQUE, POTENCIA MECÁNICA Y EFICIENCIA DE LAS TURBINAS EVALUADAS (ELABORACIÓN PROPIA)

Turbina	Torque (Nm)	Potencia mecánica (W)	Eficiencia (%)
1 álabe	11.60	19.8	12%
2 álabes	22.07	37.7	23%
3 álabes	33.48	57.2	35%
4 álabes	45.85	78.4	48%
5 álabes	59.65	102.0	62%
6 álabes	74.45	127.3	77%

Se han reportado eficiencias del 87% en un tornillo de 5 álabes, 5.2 m de longitud y diámetro exterior de 1.6 m, con un caudal de operación de 820 l/s (Khan et al., 2019). Cabe mencionar que, para dispositivos de gran tamaño, las pérdidas por flujo de fuga (flujo entre la brecha del canal y la turbina) son menos significativas comparadas con turbinas más pequeñas, lo que incrementa su eficiencia, pero requieren un mayor suministro de agua, lo que dificulta su implementación en sitios con poca disponibilidad del recurso. La turbina analizada en esta investigación pretende trabajar con caudales menores a 100 l/s manteniendo una eficiencia superior al 75%. Con ello, este prototipo podrá ser utilizado en cauces que tengan poco caudal incluso en temporada de estiaje.

Por otra parte, han obtenido eficiencias hasta de un 81% para un tornillo de 3 álabes, diámetro exterior de 0.11 m y longitud de 1.14 m con una velocidad de flujo a la entrada de 2.4 m/s (Rosly et al., 2016). En este caso, para el cálculo de la eficiencia se emplearon la velocidad de flujo obtenida mediante CFD y un modelo matemático simplificado ocasionando una sobreestimación en la eficiencia. Para el caso de esta investigación el porcentaje de eficiencia del 77% se obtuvo a partir del torque calculado numéricamente, lo que garantiza una estimación de la eficiencia más confiable al no simplificarlo únicamente con el campo de velocidades.

En lo referente a los planos de presión observados a lo largo del tornillo de Arquímedes, es importante mencionar que no se obtuvieron picos de presión en ninguna de las 6 turbinas,

evitando el estancamiento de agua entre los álabes. Se observó una disminución uniforme de la presión y por ende un aumento de velocidad del flujo en la salida del tornillo que beneficia en su rotación y eficiencia. A diferencia de otro estudio (Maulana et al., 2018) en el cual los tornillos de Arquímedes resultaron tener picos de presión que podrían ocasionar inestabilidades en la generación del torque y estancamiento de agua. Esto quiere decir, que las relaciones geométricas empleadas en el diseño de los tornillos de Arquímedes analizados en este trabajo de investigación son las adecuadas y garantizan una distribución uniforme de la caída de presión en todas las secciones del aspa lo que produciría mejor torque y estabilidad en la turbina.

Este trabajo ha permitido, con ayuda de la herramienta de simulación con CFD, determinar la influencia del número de álabes en la hidrodinámica del tornillo de Arquímedes, así como la propuesta de un método con el cual es factible diseñar y optimar este tipo de turbinas para generación de electricidad en centrales micro hidroeléctricas. Sin duda, este tipo de iniciativas abrirá la puerta a otros trabajos de investigación que conduzcan a la determinación de guías de diseño que contribuyan en el fortalecimiento del suministro energético del país y con ello impulsar el desarrollo económico y mejorar la calidad de vida de los mexicanos que cuenten con un suministro deficiente de energía eléctrica.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo del presente trabajo se logró concebir una propuesta metodológica viable que sirva como guía para el diseño y optimación del número de álabes en un tornillo de Arquímedes como generador de electricidad en micro centrales hidroeléctricas. El método propuesto sugiere una serie de pasos que facilitan la evaluación hidrodinámica de tornillos de Arquímedes, con distintas dimensiones geométricas y parámetros de flujo, permitiendo el ahorro de tiempo, recursos humanos y económicos con la implementación de simulaciones mediante CFD.

El esquema de simulación estacionario con la turbina estática es adecuado para realizar un primer análisis hidrodinámico de los dispositivos. Ya que requiere menor capacidad de cómputo, así como de tiempo en comparación con los esquemas de simulación móvil. Con este planteamiento es posible obtener los campos de velocidad, presión, turbulencia y torque, que son indicadores requeridos para la evaluación del desempeño de las turbinas hidráulicas.

Como resultado de esta investigación, la geometría del tornillo de Arquímedes con 6 álabes fue el que presentó mayor torque y en consecuencia una mayor potencia mecánica (127.3 W) además de una eficiencia del 77%. Este caso presentó también una mayor presión en la entrada al

tener una mayor superficie de contacto con el fluido, siendo necesario un análisis en trabajos futuros que permita evaluar las pérdidas ocasionadas por fricción.

Para futuras investigaciones se sugiere el análisis del tornillo móvil, para los escenarios geométricos que presentaron condiciones adecuadas de funcionamiento bajo el esquema estático, con el fin de observar los fenómenos que pueden influir en el rendimiento de la turbina, como es el caso de las pérdidas por fricción y el propio movimiento de la turbina.

REFERENCIAS

- Abiriga, D., Jenkins, A., Alfsnes, K., Vestgarden, L. S. & Klempe, H. (2021). Characterisation of the bacterial microbiota of a landfill-contaminated confined aquifer undergoing intrinsic remediation. *Science of the Total Environment*, 785(3800), 0–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147349>
- Adlard, J. (2011). Archimedes' screw: Copley hydropower generator. Future Energy Yorkshire.
- Ahmad, T., Plee, S. L., & Myers, J. P. (2013). Fluent Theory Guide. ANSYS Inc.
- Bennion, D. (2013). Maintaining Archimedes Screw Pumps. ECS Engineering Services. <http://www.ecsengineeringservices.com/maintaining-archimedes-screw-pumps/>
- Erinofardi, Nuramal, A., Bismantolo, P., Date, A., Akbarzadeh, A., Mainil, A. K., & Suryono, A. F. (2017). Experimental Study of Screw Turbine Performance based on Different Angle of Inclination. *Energy Procedia*, 110, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.094>
- Fishtek consulting. (2008). Archimedes screw turbine fisheries assessment phase II: eels and kelts. Fishtek consulting.
- Hu, H. H. (2012). Computational Fluid Dynamics. En *Fluid Mechanics* (pp. 421–472). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382100-3.10010-1>
- International Water Power & Dam Construction. (2010). A Quiet Revolution. <https://www.waterpowermagazine.com/features/featurea-quiet-revolution/>
- Jeong, W., & Seong, J. (2014). Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, 78, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.10.017>
- Khan, A., Khattak, A., Ulasyar, A., Imran, K., & Munir, M. A. (2019). Investigation of Archimedean Screw Turbine for Optimal Power Output by Varying Number of Blades. 2019 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering

- (ICECCE), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICECCE47252.2019.8940654>
- López, B. M. (2015). Aplicación de CFD-ANSYS-FLUENT en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura [Maestría]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Lubitz, W. D., Lyons, M., & Simmons, S. (2014). Performance Model of Archimedes Screw Hydro Turbines with Variable Fill Level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000922](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000922)
- Lyons, M., & Lubitz, W. D. (2013, julio 14). Archimedes Screws for Microhydro Power Generation. ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability. ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2013 11th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, Minneapolis, Minnesota, USA. <https://doi.org/10.1115/ES2013-18067>
- Mata Cárdenas, G. F. (2017). Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Modelado Mecánico en el Estudio del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (BEC) [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maulana, M. I., Syuhada, A., & Almas, F. (2018). Computational Fluid Dynamic Predictions on Effects of Screw Number on Performance of Single Blade Archimedes Screw Turbine. *E3S Web of Conferences*, 67, 04027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186704027>
- Maulana, M. I., Syuhada, A., & Nawawi, M. (2018). Blade number impact on pressure and performance of archimedes screw turbine using CFD. 030037. <https://doi.org/10.1063/1.5024096>
- Palacios, A., Peña, N., Cervantes, E., Güitrón, A., & López, M. (2017). Bases para un Centro Mexicano en Innovación de Energía Hidroeléctrica CEMIE-Hidro 1era Parte: Infraestructura Hidroeléctrica Actual. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rinaldi, M., Gurnell, A., Belletti, B., Cano, M. I., Bizzi, S., Bussettini, M., Tánago, M., Grabowski, R., Habersack, H., & Klösch, M. (2013). Final Report on Methods, Models, Tools to Assess the Hydromorphology of Rivers. REFORM. <https://reformrivers.eu/>
- Rosly, C. Z., Jamaludin, U. K., Azahari, N. S., Mutasim, M. A. N., Oumer, A. N., & Rao, N. T. (2016). Parametric study on efficiency of Archimedes screw turbine. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(18), 5.
- Secretaría de energía. (2019). PRODESEN 2019-2033 Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. SENER.

- Secretaría de energía. (2020). Porcentaje de la población con servicio eléctrico. SENER.
<https://datos.gob.mx/busca/dataset/porcentaje-de-la-poblacion-con-servicio-electrico>
- Shahverdi, K., Loni, R., Ghobadian, B., Gohari, S., Marofi, S., & Bellos, E. (2020). Numerical Optimization Study of Archimedes Screw Turbine (AST): A case study. *Renewable Energy*, 145, 2130–2143. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.124>
- Simmons, S., & Lubitz, W. (2017). Archimedes screw generators for sustainable energy development. 2017 IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference (IHTC), 144–148. <https://doi.org/10.1109/IHTC.2017.8058176>
- Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2013). *Computational Fluid Dynamics* (2a ed.). Butterworth-Heinemann.
- Yoosef Doost, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes screw turbines: A sustainable development solution for green and renewable energy generation- A review of potential and design procedures. *Sustainability*, 12(18), 2–34. <https://doi.org/10.3390/su12187352>