Universidad Iberoamericana Puebla

Repositorio Institucional **http://repositorio.iberopuebla.mx**

ExpoIbero Otoño 2022

Desarrollo de un prototipo de un generador de energía hidráulica utilizando una turbina tipo tornillo de Arquímedes

Pérez Molina, Jonathan

2022-12-02

https://hdl.handle.net/20.500.11777/5589

http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf

Desarrollo de un prototipo de un generador de energía hidráulica utilizando una turbina tipo tornillo de Arquímedes

Badillo Lora Raúl (quinto semestre en Ingeniería en Sistemas Computacionales)[1], López Téllez Ramsés Israel (séptimo semestre en Ingeniería Automotriz)[1, *], Melchor Hernández José Faustino (octavo semestre en Ingeniería Industrial)[1], Pérez Molina Jonathan (séptimo semestre en Ingeniería Automotriz)[1], Zarza Camacho Emiliano Francisco (séptimo semestre en Ingeniería de Negocios)[1], Lomas Montaudon Yvonne (profesor responsable)[1]

[1]*Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México*.

Resumen

El objetivo general de este proyecto consiste en el desarrollo de un prototipo de media fidelidad de un generador de energía hidráulica que utiliza una turbina estilo tornillo de Arquímedes como impulsor. La metodología consiste en diseñar un mecanismo de impulsión y generación de energía eléctrica aprovechando la energía cinética de la corriente de agua; elaborar un prototipo de media fidelidad de los componentes electrónicos del generador hidráulico que se ajusten a las condiciones; analizar la eficiencia del generador hidráulico mediante el control de variables y determinar los requerimientos para el desarrollo del proyecto. Para el desarrollo del prototipo se hizo uso de las instalaciones del IDIT, donde se armaron el tornillo de Arquímedes y la caja donde se instala dicho tornillo. Como resultado, una vez que el prototipo estuvo hecho, se procedió a realizar las pruebas en donde se analizaba la eficiencia del prototipo y de la generación de voltaje del motor, en el que se pudo determinar que el voltaje generado es parcialmente constante, 2.5 V en promedio, pero que el prototipo del tornillo de Arquímedes requiere de un mejor diseño debido a la cantidad de agua que recorría no era constante. Se concluye que para la realización de este proyecto es necesaria la creación de varios prototipados rápidos y un banco de pruebas con menor turbulencia y un caudal más constante por lo que los objetivos solo fueron parcialmente alcanzados.

Palabras clave: Hidráulica, Tornillo de Arquímedes, Generador de energía

Introducción

La problemática que atiende este proyecto es la producción de energía eléctrica limpia. En México, la inclusión de las tecnologías limpias para la producción de energía eléctrica ha aumentado [1]. Sin embargo, únicamente representan el 28.8% de la producción energética del país[2]. En México, existe una diferenciación territorial en el acceso y uso de los servicios de energía [3][4][5][6] . La Ley General para el Cambio Climático estableció el objetivo de generar el 35% de las necesidades energéticas de la nación a partir de fuentes renovables para el año 2024 [7].

La energía hidráulica, evita la generación de 4,000 millones de toneladas de gases de efecto invernadero [8]. A nivel mundial el 16% de la energía utilizada para la generación de energía eléctrica proviene de la energía hidroeléctrica. Se estima que solo ha sido aprovechado el 30% de su potencial[9]. En México producir energía limpia cuesta menos que la tradicional[10] con zonas de potencial energético [11][12].

El objetivo general es desarrollar el prototipo de un generador de energía hidráulica que utiliza una turbina tipo tornillo de Arquímedes como impulsor. La justificación de este proyecto radica en que, con realización del prototipo, será posible determinar su eficiencia de generación.

A continuación, se presentan elementos que conforman la investigación realizada para el desarrollo de este proyecto.

Dínamos

Se refiere a los motores generadores que son capaces de obtener corriente eléctrica a partir de un movimiento mecánico se denominan dinamo si la corriente eléctrica obtenida es directa[13][14].

Energía Hidroeléctrica

El agua es un elemento esencial en el sector energético, en la actualidad esta es el recurso más utilizado para la obtención de energía eléctrica ya que las hidroeléctricas no producen contaminación y el elemento fundamental (agua) no sufre deterioro, pudiendo ser utilizada para otros fines [15].

Caudal y altura neta equivalente

Se sabe que es el caudal, este concepto puede ser expresado con unidades como m^3/s o l/s [16].

$$Q = AV = mv \qquad (1)$$

El caudal de un aprovechamiento sufre grandes variaciones tanto estacionales como anuales [17]. La altura neta equivalente Corresponde a la diferencia vertical entre la superficie del agua y la turbina, considerando las pérdidas asociadas al circuito hidráulico que guía el agua hasta la turbina [18].

Ecuación de continuidad

Esta ecuación es la expresión del principio de conservación de la masa líquida.[15]. Su ecuación no se expresa que el

caudal del agua es igual a la velocidad que posee el agua multiplicado por el área transversal que atraviesa.

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2 \qquad (2)$$

Esto significa que el caudal entrante es igual al caudal de salida y sus unidades se representan cómo: $\frac{m^3}{s}$. Esta ecuación se cumple sólo cuando en 2 secciones de la conducción no se acumula masa, o sea que siempre y cuando el fluido sea incomprensible y por lo tanto tiene una densidad constante, esta condición la realizan fácilmente todos los líquidos, en especial el agua[15].

Ecuación de la energía

El efecto Bernoulli, es igual al descenso de la presión del líquido en las regiones donde la velocidad del flujo es mayor, el flujo de alta velocidad a través de un estrechamiento se tiene que incrementar la energía cinética a expensas de la energía de presión [15]. En la ecuación se deben tomar dos puntos en específico, los cuales son una salida y una entrada. A lo largo de una línea de corriente la suma de la altura geométrica, la altura de velocidad y la altura de presión se mantiene constante, como se muestra a continuación:

$$\sum energia\ de\ un\ punto\ inicial = \sum energia\ del\ punto\ final \quad (3)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g h_2 \qquad (4)$$

Ecuación de pérdidas

La ecuación de pérdidas, de Darcy-Weisbach, es ampliamente utilizada en la hidráulica ya que se puede calcular la pérdida de presión debido a la fricción actuante dentro de una tubería. Tomando los valores adecuados, como se muestra a continuación:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \qquad (5)$$

Máquinas Hidráulicas

Sistema mecánico que se encarga de intercambiar energía mecánica con un fluido de trabajo [15]. Los fluidos de trabajo que circulan a través de las máquinas pueden tener un comportamiento laminar, lo cual significa que las partículas siguen trayectorias ordenadas y pueden determinarse en algunos casos soluciones analíticas o también pueden tener un comportamiento turbulento lo que significa que el fluido no sigue trayectorias ordenadas.

Componentes de las turbinas

Estos mecanismos están compuestos por un elemento fijo, estator, y un elemento móvil, rodete.

El rodete, es donde se produce el intercambio de energía entre el fluido y la máquina.

Tomando en cuenta el modo en que entra el fluido el rotor o rodete se puede clasificar la turbomáquina en radial, axial o mixta[15].

Algunos componentes del estator son:

- El distribuidor.
- El difusor.
- La voluta.

Esto no quiere decir que en todas las turbomáquinas se deban tener estos elementos fijos[15].

Potencial Hidroeléctrico

El potencial hidroeléctrico es la capacidad que tiene un cauce o un cuerpo de agua de generar trabajo que se puede convertir en energía eléctrica [19]. Para aprovechar el potencial hidroeléctrico, se puede utilizar un dique de derivación desde el que se puede llevar el agua a la turbina utilizando una tubería [20], o hacer otros cambios para modificar el flujo de agua [21] [22] [23].

Turbina de tipo tornillo de Arquímedes

La turbina del tornillo de Arquímedes es un hidro esquema de muy pequeña escala, con un rango operacional de 1 a 350 kW[24] es considerada como tecnología limpia.[25] Su eficacia e implementación ha sido probada [26]. El agua llena las cavidades del Tornillo que funcionan como cubetas o cajones que se desplazan hacia abajo debido a la acción de su peso y la superficie helicoidal de la superficie de la hélice, hacen girar al Tornillo [27]. Sus características apuntan a una posible planta de energía micro hidroeléctrica funcional, que podría ser usada en áreas remotas fuera de la red eléctrica. [28].

Ventajas y desventajas del tornillo de Arquímedes

- Presenta una energía sostenible
- Coste de mantenimiento bajo[29]
- El funcionamiento de esta turbina se realiza con bajos caudales, además de tener un mantenimiento y control relativamente fácil, los rangos de operación para turbinas se presentan en la Fig. 1:
-

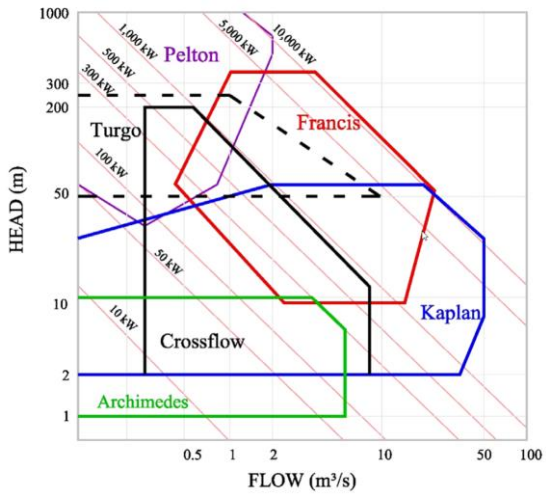

Fig.1. Diagrama de flujo vs cabeza de velocidad [5].

Caudales óptimos para el tornillo de Arquímedes

Este tipo de tornillos si utilizan como alternativas adecuadas para bajas capacidades de generación, con caudales sugeridos alrededor de $1\frac{m^3}{s}$ Y caídas entre 1m y 10m [30].

Son máquinas que tienen altas eficiencias de generación en un rango mayor de operación, donde llegan a valores

mayores al 90% con afectación mínima por variaciones en el caudal y su eficiencia es creciente en todo el intervalo cómo se muestra en la Fig. 2. Los datos de los caudales tienen que ir de la mano con los estudios del río con el que se está trabajando, y estos debe de actualizarse al menos cada tres años; estos resultados podrían verse modificados rápidamente por el calentamiento global[31].

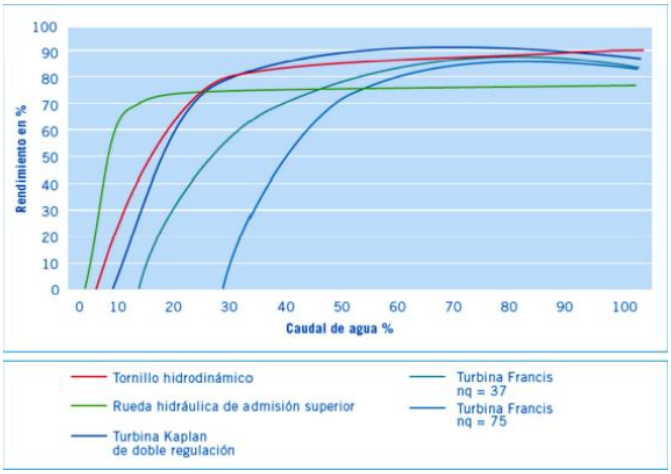

Fig. 2. Diagrama de Rendimiento vs Caudal [5].

Metodología

La metodología del presente proyecto consiste diseñar un mecanismo de impulsión y generación de energía eléctrica aprovechando la energía cinética de la corriente de agua, elaborar un prototipo de media fidelidad de los componentes electrónicos del generador hidráulico que se ajusten a las condiciones, analizar la eficiencia del generador hidráulico mediante el control de variables y determinar los requerimientos para el desarrollo del proyecto.

El material principal para armar el cuerpo del tornillo de Arquímedes fue el PVC, el cual era de un diámetro de dos pulgadas y sirve para aparentar ser el eje del tornillo. A este tubo se le añadieron las hélices que están compuestas del mismo material que el eje y que son del mismo diámetro que aparece en Fig. 3.

Para realizar las hélices se les tuvo que aplicar calor con una pistola de calor por unos veinte segundos como se puede ver en la Fig. 4, para después estirarlos con las manos de acuerdo con la Fig. 5 y dejar que se enfriaran para que se quedaran con la forma deseada por el equipo como se puede ver en la Fig. 6.

Fig. 3. Cortes de láminas de PVC en un diámetro interno de 2 pulgadas.

Fig. 4. Aplicación de calor a las láminas para poder estirarlas

Fig. 5. Estiramiento de las láminas para formar hélices

Fig. 6. Forma final de las hélices.

Armado del cuerpo del tornillo de Arquímedes

Para poder pegar las hélices al cuerpo del tornillo, se hizo uso de tornillos en ambos extremos de las hélices para que estas se quedaran fijas al cuerpo como se observa en Fig. 7. Para evitar filtraciones de agua en un futuro, se usó pegamento de secado rápido, para unir el resto de las hélices al eje del tornillo de acuerdo con la Fig. 8.

Fig. 7. Hélices pegadas al eje del tornillo usando tornillos.

Fig. 8. Uso de tornillos y pegamento para adherir las hélices al cuerpo del tornillo.

Armado de la caja del generador de energía hidráulica
Para el armado de la caja en la que se meterá el tornillo de Arquímedes se trabajó con tablas de madera del mismo largo que el tubo y de un grosor de 2 cm, debido a que este era la de menor anchura que se consiguió en el IDIT. Las tablas se emparejaron en cuanto a sus medidas, usando la sierra de mesa que se encuentra en el IDIT.

Una vez que todas las tablas contaran con las mismas dimensiones, se procedió a unirlas como se presenta en la Fig. 9. Para reforzar la unión de estas se usaron los mismos pegamentos de secado rápido que se usaron previamente en el tornillo como se observa en Fig.10.

Fig.9. Unión de las tablas de madera para el armado de la caja del generador.

Fig. 10. Uso de pegamento y silicones para reforzar la unión de las tablas de madera.

Armado final del tornillo de Arquímedes
En el ensamblado del prototipo que se muestra en Fig. 11, se colocó el prototipo en la misma posición en la que se colocará en las pruebas de simulación durante una hora como se observa en Fig. 12, para determinar que el prototipo estuviera bien ensamblado.

Fig. 11. Simulación de posición del prototipo para determinar qué el ensamblado fuese eficiente.

Dimensiones finales del prototipo:

Tabla 1: Dimensiones del tornillo.

Dimensión	Valor
Diámetro interno	50 mm
Diámetro externo	225 mm
Paso	20 cm
Largo del tornillo	120 cm
Número de hélices	1

Banco de pruebas
Para realizar las pruebas del prototipo, se necesitaron de dos tinas de agua que constantemente retroalimenta el tornillo, la parte superior del tornillo se encuentra a 30 cm sobre su parte inferior, por lo que, por medio de razones trigonométricas, se calcula la inclinación del tornillo (6):

$$\boldsymbol{\alpha = sen\frac{30\ cm}{120\ cm} = 14.48°} \qquad \textbf{(6)}$$

Con un volumen de 90 litros de agua circulando constantemente entre ambas tinas gracias a la ayuda de una

bomba de agua, se consiguió una velocidad de rotación del tornillo estable la mayor parte del tiempo.

Mediciones

Con 90 litros de agua circulando, se consigue una velocidad de rotación de 96 RPM la mayor parte del tiempo, esta medición se obtuvo gracias al uso de un tacómetro. Al utilizar un sistema de engranes con un aumento de velocidad de 1:12, se obtiene una velocidad de giro para el motor de aproximadamente 1152 RPM. Al hacer las mediciones de voltaje producida por el motor a esta velocidad, se obtuvo 2.5 V como promedio, al tomar 10 mediciones en un periodo de un minuto.

Tabla 2: Muestra de voltaje del motor.

Tiempo de toma de muestra (s)	Voltaje (V)
0	2.3
6	2.5
12	2.4
18	2.6
24	2.6
30	2.5
36	2.4
42	2.5
48	2.3
54	2.7
60	2.2

Tabla 3: Costos de realización del proyecto.

TABLA DE COSTOS DE MATERIALES		
PRODUCTO		COSTO
2 PVC ESPUMADO BLANCO 2MM .30X1.22	$	144.00
1 CIENTO PIJAS 6X1/2	$	17.00
TINAS 30LTS	$	280.00
CINTA DE TEFLÓN	$	14.00
TEE SANITARIO	$	14.00
REDUCCIÓN BUJE ECOTUBO	$	10.00
2 TAPAS SANITARIAS 50MM	$	19.00
3 COPLES SANITARIOS 50 MM	$	14.00
CEMENTO PARA PVC	$	63.00
TUBO SANITARIO	$	129.00
2 PEGAMENTO JB	$	198.00
LIJA PARA AGUA	$	9.00
TOME DC USO GENERAL TRANSPARENTE	$	55.00
IMPRESIÓN PIEZAS 3D	$	470.00
BOMBA DE AGUA	$	550.00
MDF 10MM 1.22x1.22m	$	400.00
COSTO TOTAL	$	2,386.00

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de este proyecto, enlistándolos de acuerdo con los objetivos específicos previamente establecidos.

Diseñar un mecanismo de impulsión y generación de energía eléctrica aprovechando la energía cinética de la corriente de agua.

Se diseñó un generador hidráulico impulsado por una turbina tipo tornillo de Arquímedes de 120 cm de largo, con un diámetro externo de 22.5 cm y 20 cm de paso. A partir de este diseño se elaboró un prototipo funcional, y se realizaron pruebas de rotación. El prototipo tenía una velocidad angular casi constante y como posteriormente se menciona tuvo la capacidad de hacer rotar el motor.

Fig. 12. Prototipo ensamblado.

Elaborar un prototipo de media fidelidad de los componentes electrónicos del generador hidráulico que se ajusten a las condiciones

Para la elaboración del prototipo de media fidelidad se elaboró una turbina de tipo tornillo de Arquímedes que impulsará a un motor eléctrico DC que se usó a madera de Dínamo. Para determinar que el prototipo se armó y ensambló de manera correcta, se colocó en la misma posición en la que se colocará cuando se le realicen las pruebas con agua. Se mantuvo inclinada, sobre una mesa y una silla, está a una menor altura que la mesa, y se dejó así durante una (1) hora. El resultado fue que el prototipo no presento ningún fallo. No hubo desprendimientos de piezas ni de partes del prototipo.

El prototipo logró funcionar exitosamente y generar energía, eléctrica, la cual se midió con un voltímetro. Como resultado de las primeras visitas al IDIT, se conocieron los límites de velocidades del motor. Así mismo, los avances del armado del cuerpo del tornillo de Arquímedes se vieron severamente retrasados debido a los problemas que se presentaron con el pegado de las hélices al eje del tornillo. Debido a que se trabaja con material PVC, tanto en las hélices como en el eje, el pegado de estas piezas no fue efectivo. No fue hasta que se optó por hacer uso de tornillos para que así se pudieran quedar fijos.

Analizar la eficiencia del generador hidráulico mediante el control de variables.

Al observar la gráfica, se nota que la eficiencia con la que genera voltaje el motor de corriente directa es casi constante, se optó por tomar diez muestras cada seis segundos ya que la rotación del tornillo variaba, ya que la cantidad de agua que recorre no es constante.

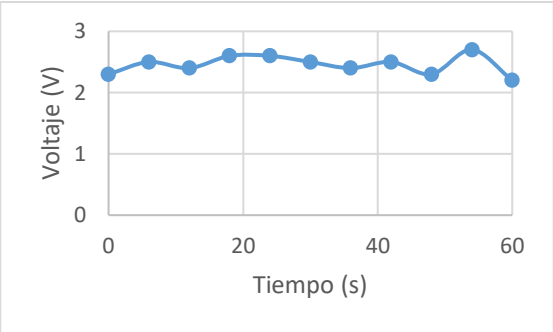

Fig. 13. Eficiencia de generación de voltaje.

A pesar de la dificultad de mantener un caudal constante que alimente al tornillo por el banco de pruebas, se consigue una velocidad de rotación de 94 RPM en promedio, se necesita considerar variables como la caída del agua sobre el recipiente inferior y su recolección por la bomba para retroalimentar el tornillo, esto hace que haya una turbulencia constante en el líquido y, visualmente, se nota que esto mismo afecta el movimiento del tornillo.

Fig. 14. Pruebe final del funcionamiento del tornillo de Arquímedes

Al no tener un sistema de engranajes de precisión profesional debido a retrasos en la impresión en 3D, el aumento de velocidad no es el esperado, además de que en algunas ocasiones se desconectaban, por lo que las mediciones no fueron posibles de tomar en un periodo extenso.
Es necesario mencionar que este voltaje se encuentra acorde a las especificaciones del fabricante del motor, ya que proporcionalmente se consigue la eficiencia a los 1150 RPM con las que se gira el motor.

Determinar los requerimientos para el desarrollo del proyecto
El prototipo fue capaz de generar energía eléctrica bajo las condiciones en que fue probado, sin embargo, para el desarrollo del proyecto se necesitarán múltiples prototipados rápidos, así como equipo más especializado.
Se necesita una mejor forma de controlar el caudal y velocidad rotacional, ya que en el banco de pruebas planteado en este proyecto su comportamiento es caótico

Conclusiones
La fabricación de un prototipo de media fidelidad de un tornillo de Arquímedes impulsado por la energía cinética de las corrientes de agua, con componentes eléctricos capaces de aprovechar el giro del tornillo, desde la experiencia de diseño, ensamble y pruebas, necesita de un campo extenso de conocimientos sobre la materia de mecánica de fluidos y diseño de productos bastante extensa, además de que se necesitarían de múltiples prototipados rápidos para que pueda elegirse aquél que se comporte de una manera más fluida con el paso del líquido a través de sus hélices. Se considera que, para la elaboración de una turbina tipo tornillo de Arquímedes, se necesita de equipo más especializado y de una financiación más plausible para poder llevar a cabo una correcta construcción precisa y, además, de pruebas experimentales más fiables con la ayuda de bancos de trabajo profesionales.
Por lo anterior mencionado, el controlar las variables como el caudal y velocidad rotacional, son muy complicadas de llevar a cabo, ya que el comportamiento del fluido es caótico en el banco de pruebas planteado en este proyecto.
En cuanto a la viabilidad del desarrollo del proyecto, también se considera que es costoso llevar a cabo cada uno de los aspectos de la construcción, principalmente del tornillo, ya que se concluye que se necesita de múltiples prototipados rápidos para comprobar la eficiencia de estos.
Se plantea que este tipo de proyectos necesita de un periodo más amplio para su desarrollo, así como de una financiación más grande, y, por último, de un amplio conocimiento en el comportamiento de la mecánica de los fluidos, diseño y producción de productos, y de generación de energía.

Referencias

[1] International Renewable Energy Agency, "Energy Profile Mexico", 2022. Consultado: nov. 06, 2022. [En línea]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical_Profiles/North%20America/Mexico_North%20America_RE_SP.pdf

[2] A. A. Palacios Fonseca, N. Peña García, E. A. Cervantes Carretero, A. Güitrón de los Reyes, y López Pérez Mario, "Infraestructura Hidroeléctrica Actual", 2017. Consultado: nov. 06, 2022. [En línea]. Available: http://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros/Potencial-Hidroelectrico-Mexico-1era-Parte.pdf

[3] R. García Ochoa, D. I. Avila-Ortega, y J. Cravioto, "The Geography of unequal access to energy services in Mexican households", *terra digitalis*, vol. 5, núm. 1, pp. 1–7, abr. 2021, Consultado: oct. 02, 2022. [En línea]. Available: https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2021.1.86

[4] C. A. Avitia, G. Dueñas D., G. R. Olivera, J. Gomez de la Cortina Ponce, E. Balan, y E. Franco, "Situación de las Instalaciones eléctricas en México", 2016.

[5] Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, "Censo 2020 Presentación de resultados", 2021. Consultado: nov. 06, 2022. [En línea]. Available: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020

[6] J. Zambrano, "Al llegar la noche prenden velas, es la pobreza energética", *El Sol de Puebla*, 2022. https://www.elsoldepuebla.com.mx/finanzas/viviendas-poblanas-sin-luz-es-la-pobreza-energetica-7833937.html (consultado sep. 26, 2022).

[7] J. A. Silva Rodríguez de San Miguel, "Energía renovable en México: Retos y oportunidades", *Revista Espacios*, vol. 40, núm. 25, jul. 2019, Consultado: sep. 28, 2022. [En línea]. Available: http://www.revistaespacios.com/a19v40n25/a19v40n25p29.pdf

[8] M. Farrera y J. Rosario, "Estrategias territoriales ante proyectos extractivos en tres localidades de Puebla e Hidalgo", Universidad Iberoamericana Puebla, Puebla, Puebla, 2019. Consultado: oct. 02, 2022. [En línea]. Available: http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf

[9] L. Ponzoni *et al.*, "Implementación de un micro generador de energía hidroeléctrica", *Innova*, jul. 2022, Consultado: sep. 11, 2022. [En línea]. Available: http://revistas.untref.edu.ar/index.php/innova/article/view/1370

[10] A. A. García Montiel, J. I. Escobar Hernández, y A. E. Rosales Rocha, "Análisis de la factibilidad de un sistema para la generación de energía eléctrica a través de paneles solares en la zona recreativa del fraccionamiento Geo-Villas La Hacienda en Puebla", 2018, Consultado: sep. 17, 2022. [En línea]. Available: https://repositorio.iberopuebla.mx/handle/20.500.11777/3856

[11] A. Y. Fragoso Altamirano, "México y su transición energética: un cambio en pro de la energía Renovable", *Latin American Developments in Energy Engineering*, vol. 1, núm. 1, pp. 26–42, nov. 2020, doi: 10.17981/ladee.01.01.2020.3.

[12] "Hidroeléctricas en la Sierra Norte de Puebla", *Grieta*. https://www.grieta.org.mx/index.php/proyectos-hidricos/hidroelectricas-en-la-sierra-norte-de-puebla/ (consultado sep. 26, 2022).

[13] D. Y. Jaimes y F. Fajardo, "Caracterización de motores DC de imán permanente mediante un sistema motor-generador", *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 44, 2022, doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2022-0199.

[14] "Computer Printout Norminal Motor Curve", PM25R-45F-1003, nov. 10, 2011 Consultado: oct. 02, 2022. [En línea]. Available: http://files.andymark.com/CIM-motor-curve-am-0255.pdf

[15] D. Lucio, "Diseño y construcción de una mini turbina tipo tornillo de Arquímedes para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía mecánica", Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2019.

[16] S. Kumar, *Fluid Mechanics (Vol. 1) Basic Concepts and Principles*, Cuarta. Cham: Springer International Publishing AG, 2021.

[17] J. Sanz, *Energía hidroeléctrica*, 2a ed. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2016. Consultado: sep. 29, 2022. [En línea]. Available: https://books.google.com/books/about/Energ%C3%ADa_hidroel%C3%A9ctrica.html?hl=es&id=Q5BfDgAAQBAJ

[18] M. J. Guardiola Oviedo, "Diseño del sistema de control de micro-generador hidráulico de uso académico", Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2021. Consultado: sep. 29, 2022. [En línea]. Available: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/182952/Diseno-del-sistema-de-control-de-micro-generador-hidraulico-de-uso-academico.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[19] C. Villegas Arango, "Generación de energía mediante tornillos de Arquímedes en PCH como aprovechamiento a los caudales turbinados", Escuela de ingeniería de Antoquia. [En línea]. Available: https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/2355/VillegasCamilo_2016_GeneracionEnergiaMediante.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[20] U. Y. Bhende, S. P. Joshi, P. R. Adkar, P. S. Marathe, A. S. Joshi, y S. M. Ganu, "Sistema de generación de energía hidroeléctrica y turbina montada en tubería", ES 2 774 652 T3, jul. 22, 2020 Consultado: sep. 26, 2022. [En línea]. Available: https://patents.google.com/patent/ES2774652T3/zh

[21] R. Ward Harding y R. C. Fillerup, “Archimedes screw turbine generator”, mar. 2014, Consultado: sep. 17, 2022. [En línea]. Available: https://patents.google.com/patent/US20140265337A1/en

[22] M. J. Charney y D. D. Radke, “Hydraulic energy booster”, may 18, 2005 Consultado: sep. 17, 2022. [En línea]. Available: https://patents.google.com/patent/JP4787536B2/en?q=hydraulic+energy&oq=hydraulic+energy+)

[23] Y. Unno, “Dispositivo generador hidroeléctrico”, ES 2 560 434 T3, feb. 19, 2016 Consultado: sep. 27, 2022. [En línea]. Available: https://patentimages.storage.googleapis.com/9a/a3/26/0db284e6992aed/ES2560434T3.pdf

[24] N. Martínez Parra, “Estudio de la generación de energía hidroeléctrica a partir del uso del tornillo de Arquímedes, y su aplicabilidad en el contexto colombiano”, Universidad de los Andes, Bogotá, 2014. Consultado: sep. 29, 2022. [En línea]. Available: https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16267/u686342.pdf?sequence=1

[25] K. Yulieth Restrepo Zapata, “Turbinas hidrocinéticas utilizadas para la generación de energía: Características, principio de funcionamiento e impactos ambientales asociados Autor”, Tecnológico de Antioquia, Medellín, Colombia, 2021. doi: 10.1016/j.renene.2018.02.137.

[26] I. Kampel y F. Kaltenberger, “State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine”, 2012. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/281347248

[27] J. E. Santa Cruz Herrera, “Aálisis energético de un Tornillo de Arquímedes para canales de regadío con una caída de 2m y caudal de 2m 3 /s”, Pontifica Universidad Católica del Perú, Lima, 2018. Consultado: oct. 02, 2022. [En línea]. Available: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/13235/SANTA_JOSE_TORNILLO_ARQUIMEDES.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[28] C. Rat, O. Prostean, I. Filip, y C. VAsar, “The Modeling and Simulation of an Archimedes Spiral Turbine for use in a Hydrokinetic Energy Conversion System”. doi: 10.1109/INES.2018.8523996.

[29] G. M. Webber, “Screw turbine and method of power generation”, WO2012016283A1, ago. 03, 2011 Consultado: oct. 02, 2022. [En línea]. Available: https://patents.google.com/patent/WO2012016283A1/en

[30] G. Ranjitkar, J. Huang, y T. Tung, “Application of Micro-hydropower Technology for Remote Regions”. doi: 10.1109/EICCCC.2006.277207.

[31] R. Ramos Aguilar *et al.*, “Análisis técnico geoestadístico de los ríos Atoyac y Alseseca que atraviesan la ciudad de Puebla, México”, *Contactos*, núm. 119, pp. 5–22, mar. 2021, Consultado: oct. 02, 2022. [En línea]. Available: https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/99/80