



DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN MICROHIDRÁULICA BASADO EN UN TORNILLO DE ARQUÍMEDES

DESIGN OF A MICRO-HYDRAULIC GENERATION SYSTEM BASED ON AN ARCHIMEDES SCREW

Alan Cuenca Sánchez^{1,*} , Willian Farinango Galeano¹ , Joan Murillo Zambrano¹ 

Recibido: 20-10-2022, Recibido tras revisión: 08-12-2022, Aceptado: 14-12-2022, Publicado: 01-01-2023

Resumen

En este trabajo se aplica el principio de generación hidroeléctrica, utilizado a gran escala en nuestro país. El sistema construido representa una herramienta didáctica de laboratorio en los cursos de docencia sobre energías renovables. El objetivo de este artículo es la construcción de un microgenerador hidráulico de carácter didáctico que permita aprovechar la energía cinética del agua para la producción de energía eléctrica. Además, disponer dicho sistema en una institución educativa ayuda a enseñar conceptos de energías renovables como la microhidráulica y potenciar sus aplicaciones en zonas rurales a través de proyectos de vinculación con la sociedad. Se han considerado aspectos de diseño importantes como potencia de generación, uso del modelo tornillo de Arquímedes, suministro del recurso hídrico, costo de materiales para la elaboración, instalación del generador, entre otros. Esta propuesta ofrece una solución didáctica de bajo costo fácil de reproducir, que genera una potencia máxima de 8 (W) con un caudal de 10 (l/s), lo que permite abastecer una determinada demanda eléctrica, principalmente de iluminación. A través de un modelo validado en laboratorio gracias al sistema desmontable que posee para ser utilizado en un entorno real, se realizaron pruebas, utilizando un tanque de almacenamiento de agua y una bomba. Con estos resultados se concluye que el sistema construido aprovecha un caudal de agua reducido para producir energía limpia y renovable.

Palabras clave: caudal, energías renovables, microgeneración, microhidráulica, tornillo de Arquímedes

Abstract

In this work, the principle of hydroelectric generation, used on a large scale in our country, is applied. The built system represents a didactic laboratory tool in teaching courses on renewable energies. The objective of this article is the construction of a didactic hydraulic micro generator that allows to take advantage of the kinetic energy of water to produce electrical energy. In addition, having said system in an educational institution helps to teach concepts of renewable energies such as micro-hydraulics and promote its applications in rural areas through projects related to society. Important design aspects such as power generation, use of the Archimedes screw model, supply of water resources, cost of materials for processing, installation of the generator, among others, have been considered. This proposal offers a low-cost educational solution that is easy to reproduce, which generates a maximum power of 8(W) with a flow rate of 10(l/s), which allows supplying a certain electrical demand, mainly for lighting. Through a model validated in the laboratory thanks to the removable system that must be used in a real environment, tests were carried out using a water storage tank and a pump. With these results it is concluded that the built system takes advantage of a reduced water flow to produce clean and renewable energy.

Keywords: flow, renewables energies, microgeneration, microhydraulic, Archimedes screw

^{1,*}Escuela de Formación de Tecnólogos, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
 Autor para correspondencia ✉: alan.cuenca@epn.edu.ec.

Forma sugerida de citación: Cuenca Sánchez, A.; Farinango Galeano, W. y Murillo Zambrano, J. "Diseño de un sistema de generación microhidráulica basado en un tornillo de Arquímedes," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, N.º 29, pp. 98-107, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.09>.

1. Introducción

El desarrollo de tecnologías limpias para la generación de energía eléctrica en el Ecuador ha permitido abastecer una gran parte de la demanda energética, siendo la hidroeléctrica una de las más importantes en el ámbito nacional, aportando alrededor del 92 % de la matriz energética. Sin embargo, existen ciertos lugares remotos que no cuentan con una conexión a la red eléctrica nacional por su ubicación remota o aislamiento de la urbanización.

Los habitantes de dichas zonas rurales no gozan de este servicio básico, por lo que en estos casos se ha optado por otros tipos de energía como la microhidráulica, como estrategia vial para proveer del servicio eléctrico. En nuestro país, esta tecnología se encuentra dentro del 1 % al igual que otras tecnologías como biomasa, biogás, geotérmica, como se muestra en [1], lo que ha permitido aprovechar recursos hídricos a pequeña escala como riachuelos, agua de regadíos o pequeños saltos de agua [2].

Dentro del campo de la microhidráulica, se conoce el uso del tornillo de Arquímedes como una de las estrategias para aprovechar los caudales que fluyen a través de ríos y cascadas. En dicha aplicación se denomina tornillo hidrodinámico, esto consiste en aplicar una ingeniería inversa del tornillo de Arquímedes, es decir, ya no funcionaría como una bomba rudimentaria, sino más como una turbina. Dicho sistema es aplicado a pequeña escala captando pequeñas caídas de agua de ríos, cascadas o en represas pequeñas. En el enfoque técnico, esta estrategia es viable siempre y cuando se trabaje con caídas mínimas de agua, a diferencia de las que requieren las turbinas convencionales para funcionar, los tornillos hidrodinámicos son elementos de alta eficiencia en cuanto a la producción de electricidad para rangos mayores de trabajo, alcanzando un 90 % con poca perturbación por cambios en el caudal, además, su eficiencia aumenta según el volumen de diseño [3].

Es por ello por lo que, con base en el caudal disponible de agua, el uso de esta tecnología facilita la realización de este proyecto en cuanto a eficiencia y costo, a diferencia de si se realizara con otro tipo de turbina, ya que reduciría la eficiencia y versatilidad del sistema.

En la actualidad, la producción de energía hidroeléctrica y microhidroeléctrica se enfoca generalmente en el uso de tres modelos de turbinas como son Kaplan, Francis y Pelton, las cuales, según su estructura, lugar a instalar y la eficiencia que presenta cada una [4], han permitido estar entre las más usadas y estudiadas.

El sistema construido es basado en un modelo planteado por Arquímedes, el mismo que ha sido usado desde el siglo III a. C., que inicialmente fue utilizado para elevar agua y otros materiales, es decir, como

una bomba [5], lo que posteriormente al realizar una modificación en el sentido de las hélices del tornillo de Arquímedes, se pudo cotejar que este sistema puede ser usado como una turbina para generación de energía como se acotó anteriormente, beneficiándose de esos pequeños saltos de agua y caudales bajos como el puesto en marcha en el dique del río Tess situado en Inglaterra en el año 2012 [2].

La empresa japonesa Sumino Co., situada en la ciudad de Ena [6], es una de las pioneras en sistemas microhidráulicos, la misma que ha desarrollado módulos de diversas especificaciones para distintas características del sitio a instalar, que han llegado a abastecer alumbrados para localidades arroceras, aprovechando el agua que circula por los canales de los regadíos [7].

La implementación de módulos basados en ciertas características como la estructura de la turbina, longitudes y elementos principales utilizados como un generador eléctrico y el recurso hídrico [8], ha permitido demostrar varios conceptos como es la transformación de energía y uso del potencial hidráulico en lugares de difícil acceso a energía eléctrica, lo que establece un reto en cuanto a innovación tecnológica para solucionar este tipo de problemas.

Por tal razón, como objetivo principal se establece la implementación de un sistema didáctico de generación microhidráulica basado en un tornillo hidrodinámico para abastecer una o varias cargas de iluminación utilizando un caudal reducido de recurso hídrico.

A pesar de las ventajas que presenta el uso de esta tecnología con tornillos hidrodinámicos, si se desea optar como una medida económicamente factible para ser usada a largo plazo en zonas rurales, es imperativo por cuidado ambiental, medir el impacto en la tasa de incorporación de oxígeno al río, ya que esta debe conservarse, por cuanto es una razón de estudio para adicionar una estrategia correctiva o preventiva a la hora de usar esta tecnología, de lo cual se dice o se investiga muy poco para establecer si en realidad existe un impacto significativo hacia los ríos y lagunas así como a su fauna marina [9].

2. Estado del arte

Santa Cruz [10] realizó el estudio y diseño de un sistema microhidroeléctrico para abastecimiento de energía eléctrica a una vivienda en Cuenca. Este estudio estableció que el tornillo de Arquímedes es la mejor opción para pequeños saltos de agua y caudales bajos, sin embargo, en esta localidad se disponía de caudales elevados, por lo que se utilizó una turbina Kaplan.

Ramírez y Ramón [11] realizaron el estudio preliminar para la implementación de un sistema de microgeneración hidroeléctrica para autoconsumo en una hostería en la Amazonía ecuatoriana, resultando

factible un turbogenerador de 7.5 (kW) que aprovecha el agua de varias cascadas internas debido a que la atraviesa el río Reventador, se seleccionó un grupo de turbinas tipo Pelton, ya que en la zona el recurso hídrico es abundante. Sin embargo, se puntualiza que para potencias menores de hasta 300 (W) y caudales menores de 50 (l/s) se recomienda la utilización de tornillos hidrodinámicos.

Arias [12] trata sobre el estudio de factibilidad de un sistema de microgeneración hidroeléctrica, utilizando turbinas tipo Kaplan para puntualizar la inversión inicial y sus beneficios para comunidades que no tengan un crecimiento poblacional elevado y se encuentren a distancias menores a 500 metros del punto de suministro de energía. Además, este estudio establece la importancia de la implementación de sistemas microhidráulicos de bajo costo para abastecer la demanda de energía de cargas puntuales de iluminación, siendo una excelente opción los tornillos hidrodinámicos.

Lucio [13] realiza la construcción de una microturbina tipo tornillo de Arquímedes, en donde se puntualiza el funcionamiento óptimo del sistema en un canal de riego, obteniendo niveles de potencia y torque adecuados para generar energía mecánica (no abastece cargas eléctricas).

Todos los estudios revisados anteriormente muestran la importancia de la microhidráulica en el Ecuador y sus aplicaciones; sin embargo, ninguno de ellos plantea el diseño y la implementación de un sistema rentable de microgeneración eléctrica basado en tornillos hidrodinámicos para autoabastecimiento en lugares aislados de la red con pequeños saltos de agua y caudales bajos. Si bien el sistema construido tiene fines académicos, a través de los proyectos de vinculación con la sociedad se pretende repotenciar el sistema para su utilización en lugares aislados, además, el presente trabajo contiene toda la información técnica para la implementación de la microturbina y su aplicación, mostrando la contribución de este artículo en el área de las energías renovables.

La Tabla 1 reúne algunos artículos que analizan los parámetros, funcionamiento, modelamiento, etc., de sistemas microhidráulicos basados en generadores tipo tornillos de Arquímedes. Estos artículos resaltan la eficiencia de estas turbinas para generar hidroelectricidad en sitios con muy poca altura y caudal moderado.

Tabla 1. Artículos similares de generadores tipo tornillo de Arquímedes

Artículo	Característica analizada
[14]	Rendimiento
[15]	Pendiente y número de álabes
[16]	Potencia
[17]	Tamaño
[18]	Tipos de fluidos

Simmons *et al.* [19] analizaron a los generadores

de tornillo de Arquímedes para el desarrollo energético sostenible generando energía hidroeléctrica en plantas de hasta unos 200 (kW). Además, establecen que este tipo de tecnología tiene el potencial de ser utilizada para la electrificación rural en regiones en desarrollo con recursos hídricos confiables bajos. Raza *et al.* [20] resaltan que la electricidad generada por la energía hidráulica es más barata y respetuosa con el medioambiente, además, establecen que los sistemas de microgeneración no conectados a red pueden utilizar aguas residuales y que la turbina más adecuada para una central hidroeléctrica de baja caída es la turbina Arquímedes.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un sistema didáctico rentable, fácil de reproducir, para diseminar el conocimiento en el área de microhidráulica, generando energía limpia y renovable. Se utilizan materiales de bajo costo para la construcción de la microturbina. La energía generada permitió abastecer cargas de iluminación con caudales de agua bajos, validando el funcionamiento del sistema desarrollado. El sistema puesto en marcha en esta investigación puede ser repotenciado para complementar y abaratar costos en los proyectos [10–13]. Además, puede ser utilizado de forma didáctica en los laboratorios de las universidades para motivar a los estudiantes a prepararse y especializarse en el área de las energías renovables para contribuir al cambio de la matriz energética en el Ecuador.

3. Materiales y métodos

Esta sección presenta las etapas de desarrollo del proyecto, presentando los materiales y métodos empleados. El sistema propuesto puede dividirse en dos partes:

1. Diseño mecánico
2. Sistema eléctrico-electrónico

3.1. Diseño mecánico

3.1.1. Potencia de una turbina tipo tornillo de Arquímedes

En el caso de una turbina hidráulica, la potencia está dictaminada por variables que suministra el espacio donde va a ser instalada como es el caudal de entrada, además de la altura, al igual que aspectos como la densidad del agua y de igual forma la gravedad. En la ecuación (1) se establecen los parámetros a ser incluidos para obtener la potencia hidráulica de una turbina [21].

$$P_H = \rho \times g \times Q \times H \quad (1)$$

En donde, P_H es la potencia hidráulica en (W), ρ corresponde a la densidad del agua en (kg/m^3), g es

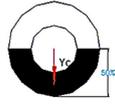
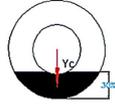
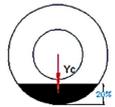
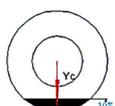
la gravedad de la tierra en (m/s^2), Q es el caudal que ingresa a la turbina en (m^3/s), y H la altura del salto de agua en (m).

3.1.2. Inercia y área de la hélice

La Tabla 2, considera la inercia de la turbina en función del porcentaje del área de contacto, considerando que para este diseño se tiene un área mínima, se considera un 10 % dado que la entrada por donde ingresa el agua de recirculación es menor a una pulgada.

Considerando las ecuaciones para un 10 %, se tiene que A es el área de contacto del agua con las hélices de la turbina en (m^2), R es el radio exterior de la turbina en (m) y Y_c es la inercia del álabe en (m) dependiendo del área de contacto a escoger [21].

Tabla 2. Inercia de la turbina en función del porcentaje del área de contacto [21]

Área de contacto	Área (A)	Porcentaje	Inercia (Yc)
	$\frac{3}{8} \times \pi \times R^2$	50%	$0.4951 \times R$
	$\frac{9}{40} \times \pi \times R^2$	30%	$0.6907 \times R$
	$\frac{3}{20} \times \pi \times R^2$	20%	$0.7544 \times R$
	$\frac{3}{40} \times \pi \times R^2$	10%	$0.8471 \times R$

3.1.3. Par y potencia teórica

En la Figura 1 se observa la fuerza de empuje que ejerce el agua en sentido horizontal (F_x), la fuerza que ejerce el agua de manera tangencial (F_z), la fuerza de empuje en dirección del plano X (F_R), la fuerza que ejerce el agua sobre la carcasa (F_y), la fuerza en sentido vertical (W) y (α) el ángulo exterior de la hélice [21].

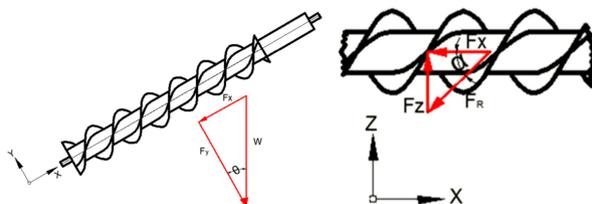


Figura 1. Fuerzas que actúan en un tornillo de Arquímedes [21]

Al considerar la relación que existe entre el plano XZ, se puede obtener la ecuación (2).

$$\tan \alpha = \frac{F_z}{F_x} \quad (2)$$

En donde la fuerza tangencial (F_z) juntamente con la inercia del álabe (Y_c), describen el par que se genera al momento del contacto del agua con el tornillo, obteniendo así la ecuación (3).

$$T = F_z \times Y_c \quad (3)$$

Realizando un análisis para la fuerza tangencial (F_z), se puede llegar a obtener la ecuación (4), que describe el par del tornillo considerando los efectos del agua, la altura, el área de contacto y los ángulos.

$$T = \rho \times g \times LT \times A \times \sin(\Theta) \times \tan(\alpha) \times Y_c \quad (4)$$

Donde, T es el par de la turbina en (Nm), ρ es la densidad del agua en ($\frac{kg}{m^3}$), LT es la longitud total de la turbina en (m), cuyo valor es asumido sobre la base de criterios técnicos de diseño, material, factibilidad de fabricación, y versatilidad, Θ es el ángulo de inclinación de la turbina en ($^\circ$) y h es la altura de la cabeza hidráulica, tanto LT , Θ , y h se observan en la Figura 2.

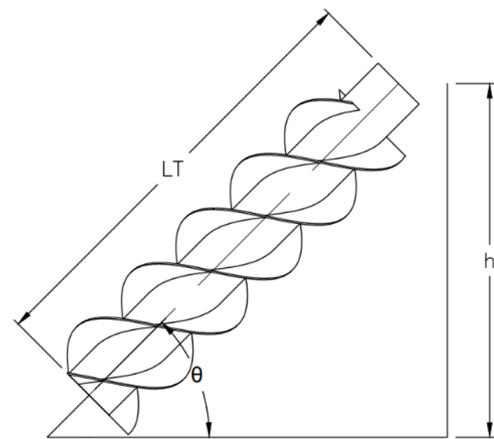


Figura 2. Dimensiones por considerar para la turbina

Por otro lado, la potencia mecánica teórica de un tornillo de Arquímedes también se puede expresar como se muestra en la ecuación (5).

$$P_{teorica} = T \times \omega \quad (5)$$

En donde, T es el par que se obtiene a partir de la ecuación (4), y ω es la velocidad angular en (rad/s) que se expresa en la ecuación (6).

$$\omega_{angular} = \frac{Q \times \tan(\alpha)}{A \times Y_h} \quad (6)$$

Si se sustituye tanto las ecuaciones (4) y (6) en la ecuación (5) se obtiene una ecuación (7), que describe no solo variables estándar como en la ecuación (1), sino que además hace énfasis en el área de contacto, la inercia, ángulos y longitudes.

$$P_{teorica} = \rho \times g \times LT \times A \times Q \times \text{sen}(\Theta) \tan^2(\Theta) \quad (7)$$

Para la obtención del ángulo α , se parte de la idea que la eficiencia en este caso se debe asumir debido a varios factores como fricción, peso de la turbina, el propio medioambiente, etc., por lo que se tiene la ecuación (8) que describe la eficiencia de una turbina.

$$\eta = \frac{P_{teorica}}{P_{teorica_max}} \times 100\% \quad (8)$$

En donde, η es la eficiencia de una turbina y $P_{teorica_max}$ es la potencia mecánica máxima a la que puede llegar la turbina en (W), que al momento de sustituir y simplificar lo obtenido en la ecuación (7) en ambas variables de la ecuación (8), se obtiene lo que se describe en la ecuación (9), que como se observa en el numerador la $\tan^2(\alpha)$ es 1 debido a que el ángulo máximo α debe ser 45° .

$$\eta = \frac{\rho \times g \times LT \times A \times Q \times \text{sen}(\Theta) \tan^2(\alpha)}{\rho \times g \times h \times Q} \times 100\% \quad (9)$$

Considerando la Figura 2 se establece que la altura está dada por la ecuación (10):

$$H = LT \times \text{sen}(\Theta) \quad (10)$$

Considerando la ecuación (10) y reemplazando y simplificando la ecuación (9) se obtiene la ecuación (??), mediante la cual se puede determinar el valor del ángulo exterior (α):

$$\eta = \tan^\alpha \times 100 \% \quad (11)$$

Tanto con las ecuaciones (4) y (7) previamente descritas, es posible encontrar el par y la potencia respectivas que teóricamente se obtendrían de una turbina tipo tornillo de Arquímedes.

3.1.4. Dimensiones y modelado

Se adaptó un tornillo de Arquímedes de tres hilos con dos revoluciones a lo largo de un eje de plástico de 0.76 (m) de longitud, según el diseño base que se tomó como referencia. Esta pieza fue dividida en dos secciones, las cuales son acoplables. En la Figura 3 se observa el tornillo de Arquímedes, el mismo que no tiene un relleno sólido y dispone de un espesor de 0.003 (m) en su eje y 0.002 (m) de espesor en sus hélices. En su extremo lateral posee un agujero para fijar la turbina con respecto a un eje metálico.



Figura 3. Microturbina hidráulica tipo tornillo de Arquímedes

Para el diseño de la microturbina se tomó en cuenta un prototipo de la turbina existente para microgeneración, las respectivas especificaciones geométricas se adaptaron al diseño propuesto, dichas características se especifican en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de la microturbina hidráulica

Propiedad	Valor
Material	Ácido poliláctico
Longitud	0.760 (m)
Diámetro exterior de la hélice	0.198 (m)
Diámetro del eje de la hélice	0.109 (m)
Espesor	0.003 (m)

Para implementar medidas en las que se evite el rozamiento en las partes rotativas se debe mantener lubricadas las chumaceras y aislar las partes metálicas del óxido, ya que en los tornillos de Arquímedes es de vital importancia evitar rozamientos especialmente en las hélices helicoidales por temas de eficiencia [22].

Para la fijación de las chumaceras que soportan a la microturbina, se diseñó una estructura metálica con las dimensiones detalladas en la Tabla 4, la cual sirve de apoyo del canal para la corriente de agua y de la microturbina, además, sostiene al generador y el circuito electrónico. Dicha estructura se asocia con soportes auxiliares que definen la inclinación y equilibrio de la superficie en la que irá dispuesto todo el sistema de la turbina y el generador.

Tabla 4. Características de la microturbina hidráulica

Propiedad	Valor
Ancho	0,81 (m)
Longitud	0,281 (m)
Altura	0,221 (m)

Una vez establecido el propósito de la estructura metálica base, se obtiene el plano del diseño final de la misma (Figura 4).

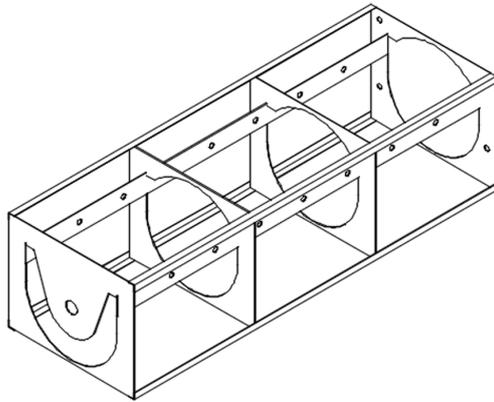


Figura 4. Base de soporte del hidrotornillo

En la Figura 5 se observa el modelo 3D de la micro-turbina. En la parte posterior de la estructura metálica se realiza un contenedor aislado para colocar el generador y el circuito electrónico. Además, se observan las estructuras metálicas auxiliares para establecer la inclinación de la turbina hidráulica, e incluso, fijación de la bomba hidráulica y el tanque de almacenamiento del agua para las pruebas en laboratorio, dichas estructuras se pueden retirar (desmontables) para el funcionamiento en un riachuelo o arroyo.

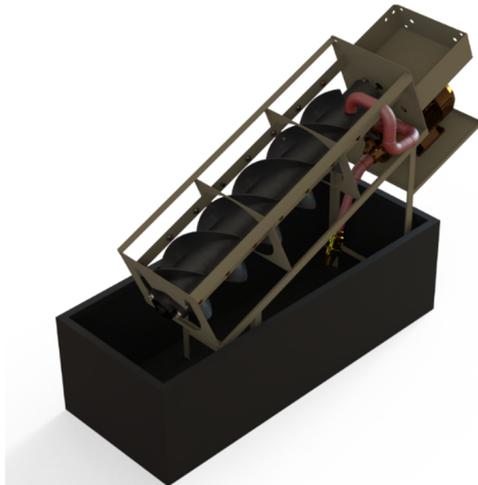


Figura 5. Diseño renderizado del sistema de microgeneración

3.2. Sistema eléctrico-electrónico

Para las pruebas en laboratorio se utilizó un sistema de recirculación de agua, por lo que se dispuso un tanque de almacenamiento en donde se receipta y desemboca el fluido gracias a una bomba hidráulica de 372.85 (W).

Para la producción de electricidad se empleó un motor Brushless DC (BLDC), cuyas partes principales se observan en la Figura 6, el cual es utilizado como generador sin multiplicadores de velocidad acoplándose en la parte posterior del tornillo de Arquímedes.

Este elemento se adapta a las revoluciones por acople mecánico directo que provee la turbina, además, la inclinación del tornillo de Arquímedes y el caudal que ingrese a través de las hélices, influyen en la conversión de la energía mecánica a eléctrica.

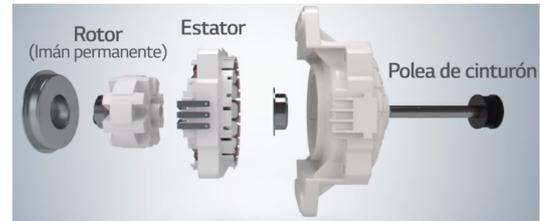


Figura 6. Motor síncrono de imán permanente [23]

Se diseñó el circuito electrónico para el circuito rectificador de voltaje para alimentar las cargas a abastecer. Este circuito dispone de una etapa de rectificación, filtrado y linealización de la onda de voltaje alterna a la salida del generador, además, se añadió un “*boost converter step up DC – DC*” (MT3608) para regulación y amplificación de las ondas de voltaje DC filtradas. El esquema electrónico se observa en la Figura 7.

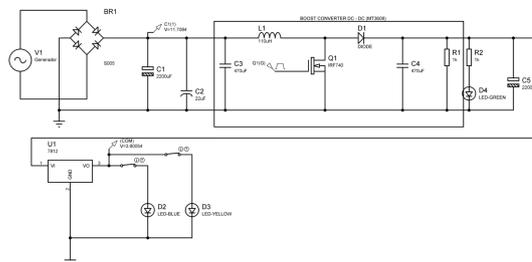


Figura 7. Esquema electrónico del rectificador de voltaje de onda completa AC-DC

4. Resultados y discusión

Tomando en cuenta todos los parámetros, características y requisitos de la tecnología de microgeneración hidráulica, se construyó un sistema didáctico, rentable y fácil de reproducir, capaz de utilizar recurso hídrico para generar hasta 8 (W), abasteciendo la demanda de cargas de iluminación tipo LED de 6 (V). El sistema puede ser fácilmente desmontable para ser traslado de un lugar a otro cuando se requiera observar su funcionamiento, ya sea en el laboratorio o en el exterior. Además, el sistema diseñado y construido representa una solución innovadora y eficiente que puede ser mejorada para la generación de electricidad a partir de fuentes de energía renovable no convencional.

La elaboración del hidrotornillo, se realizó mediante impresión 3D (Figura 8) en modelado por deposición fundida (MDF), utilizando en esta técnica filamento de ácido poliláctico (PLA) en la totalidad de la estructura de la microturbina hidráulica.

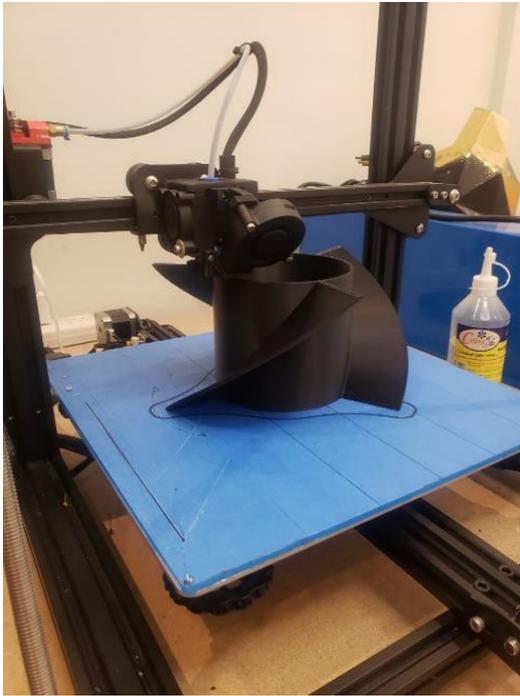


Figura 8. Fabricación del hidro tornillo

De igual manera, las estructuras metálicas del sistema se construyeron mediante corte en plasma compuestas de tol A – 34 de 0.0015 (m) de espesor. La estructura metálica de soporte se observa en la Figura 9.



Figura 9. Estructura metálica de soporte del sistema de microgeneración

En la Figura 10 se observa el sistema construido y funcionando en laboratorio, la demanda establecida (luces LED de 6 V) es abastecida correctamente gracias al flujo de agua de entrada que se encuentra recirculando por el sistema.

Si bien el sistema de microgeneración cuenta con una bomba de agua para un circuito hidráulico que recircula el agua, esto sirve para emular el medio físico donde se instalaría dicho sistema y realizar las respectivas pruebas de funcionamiento en laboratorio. Para

la adaptación y utilización del sistema en lugares externos al laboratorio no son necesarios estos componentes por lo cual se pueden desmontar fácilmente, ya que lo único que se necesita es la presencia de un riachuelo y la colocación del generador para el paso de agua (Figura 11).



Figura 10. Sistema de microgeneración hidráulica



Figura 11. Sistema de microgeneración hidráulica instalado en riachuelo

Al ingresar un caudal constante (mínimo) de 0.583 (l/s), la turbina gira con una velocidad en un rango de 18.85 a 20.94 (rad/s) con el acople respectivo del generador. Al ingresar un caudal (máximo) de 10 (l/s), la turbina gira con una velocidad de aproximadamente 220 (rad/s).

Se realizaron pruebas para diferentes caudales de entrada, midiendo la potencia generada para abastecer una determinada carga. En la Tabla 5 y Figura 12 se observa la potencia generada por la microturbina construida en este trabajo en función del caudal de entrada.

Mediante las pruebas de funcionamiento se establecieron los resultados de potencia generada, los cuales muestran que a medida que aumenta el caudal de entrada también lo hace la potencia. Con el caudal mínimo de 0.583 (l/s) se obtuvieron valores de corriente de 0.4 (A) y 6 (V) con lo cual se puede alimentar una luz LED de estas características, mientras que con el caudal máximo de 10 (l/s) se pueden alimentar hasta tres luces LED. Si bien existen varios sistemas para cubrir la demanda de energía sin conectarse a la red

eléctrica incluso, obteniendo niveles de potencia mayor, la microturbina construida representa una opción muy atractiva para que los estudiantes de escuelas, colegios y universidades puedan incursionar en el área de la microhidráulica.

Tabla 5. Valores de potencia generada en función del caudal de entrada

Caudal de entrada (l/s)	Potencia generada (W)
0.583	0.57
1.243	0.93
1.846	1.24
2.394	1.38
2.749	1.47
3.198	1.78
3.639	2.16
4.957	2.78
5.293	3.11
5.384	3.21
6.393	4.09
7.475	5.28
8.273	6.14
9.583	7.32
10	7.95

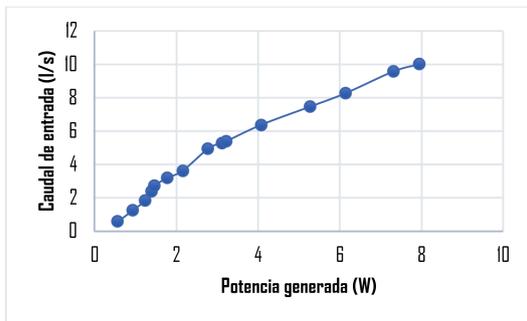


Figura 12. Sistema de microgeneración hidráulica

Este tipo de tecnología es capaz de recuperar la energía de una gran variedad de pequeños saltos de agua y sus costes de instalación y mantenimiento son muy reducidos, en comparación con otras energías renovables. El sistema presentado en este trabajo es viable, ya que utiliza materiales de bajo costo, además, con base en la información técnica presentada en este artículo, es posible su construcción, reproducción y repotenciación, sin tomar en cuenta que puede adaptarse a diversos entornos, internos o externos.

Estos resultados permiten evidenciar el cumplimiento del objetivo del sistema didáctico de microgeneración el cual es aportar al desarrollo del conocimiento de los estudiantes de energías renovables, a través del abastecimiento de demanda de cargas de iluminación a partir de la energía cinética del agua. La Figura 13

muestra la inducción del funcionamiento del sistema a estudiantes de la Escuela de Formación de Tecnólogos ESFOT de la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 13. Estudiantes observando el funcionamiento del sistema de microgeneración en el laboratorio

Al adaptar la carga de iluminación se consideró la instalación de un rectificador de voltaje para evitar la intermitencia en la lámpara utilizada y estabilizar la potencia proveniente del generador.

Consecuentemente, con base en las características de diseño de la microturbina existen pérdidas por distintos factores, como pueden ser la fricción, resistencia del generador, peso, etc., lo que se traduce a pérdidas existentes en la etapa de transformación de la energía mecánica a eléctrica, sin embargo, los tornillos hidrodinámicos disponen alta eficiencia en cuanto a la generación de electricidad para rangos mayores de trabajo, alcanzando un 90 % con poca perturbación por cambios en el caudal, además, su eficiencia aumenta según el volumen de diseño.

El sistema construido corresponde un aporte al desarrollo del conocimiento sobre la microhidráulica, ya que mediante los resultados obtenidos se verifica que el módulo funciona correctamente y puede ser utilizado para actividades de docencia como prácticas de laboratorio. Además, se puntualiza que las pruebas de funcionamiento han sido realizadas con el sistema para recircular el agua (bomba, tuberías y tanque de almacenamiento) en el laboratorio de la ESFOT y en un riachuelo en la localidad de Guayllabamba, logrando abastecer cargas de iluminación. Por tal motivo, se establece que la implementación de la microturbina didáctica realizada en este trabajo puede servir como base para ampliar el sistema a aplicaciones reales en zonas aisladas a la red eléctrica, tomando en cuenta la demanda que debe ser cubierta.

Un aspecto para considerar es el sistema de almacenamiento de energía que utilizaría la carga de iluminación durante las épocas de sequía, sin embargo, para el presente proyecto se ha considerado la presencia continua y estable del recurso hídrico, es decir, se

usa la energía que se produzca al momento en el que opera el sistema.

5. Conclusiones

En concordancia con los valores obtenidos y la implementación del sistema de microgeneración, se hace énfasis en que el caudal de agua es el recurso utilizado para generar el movimiento, ya que como se comprobó al realizar pruebas con un flujo de agua de 0.583 (l/s) el tornillo se mueve a una velocidad considerable, sin embargo, al aumentar el flujo el sistema tiene una mayor eficiencia, generando un mejor par y una potencia de hasta 8 (W) para alimentar una mayor cantidad de cargas conectadas.

El sistema de microgeneración basado en un tornillo de Arquímedes permite abastecer hasta tres luces LED de 6 (V) y 0.4 (A). A pesar de ser un sistema didáctico, se podría mejorar y ampliar sus prestaciones para abastecer una demanda mayor.

Se realizó una calibración y ajuste de la turbina hidráulica de forma minuciosa, de tal forma que no exista contacto directo de la turbina con la estructura metálica y de igual manera esta se encuentre lo más centrada al momento de entrar en funcionamiento. Se establecieron las dimensiones del sistema en general y su descripción correspondiente mediante planos mecánicos de diseño.

Tomando en cuenta la demanda eléctrica a abastecer y la información técnica del presente artículo se puede repotenciar el sistema construido, aumentando los niveles de generación al utilizar un generador de mayor potencia. Esto permitiría utilizar la microturbina en sistemas de iluminación en pasajes o calles sin iluminación pública hasta electrificado de cercados para proteger siembras o ganado, incluso en sistemas de riego en áreas rurales del Ecuador.

El presente trabajo permitió el diseño y construcción de un sistema basado en energía limpia y renovable, se utilizaron materiales de bajo costo que permita a dicho sistema ser rentable y fácil de reproducir y repotenciar en comparación con otro tipo de tecnologías.

El sistema construido representa un aporte para el desarrollo de la tecnología microhidráulica y su socialización en las instituciones educativas, con el fin de que los estudiantes y demás personas interesadas puedan conocer y aprender sobre este tipo de tecnología. En el caso de la ESFOT la microturbina sirve para aplicaciones didácticas en el laboratorio donde los estudiantes pueden ampliar, fortalecer y complementar los conocimientos relacionados con energías renovables. Además, el presente trabajo se ajusta a la línea de proyectos de Tecnología Aplicada de la ESFOT, los cuales han permitido plantear soluciones técnicas en diversos proyectos de vinculación con la sociedad.

Referencias

- [1] Ministerio de Energía y Minas, *Ecuador consolidada la producción eléctrica a partir de fuentes renovables*. Ministerio de Energía y Minas. República del Ecuador, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jbARot>
- [2] J. E. Santa Cruz Herrera, “Análisis energético de un tornillo de arquímedes para canales de regadío con una caída de 2 m y caudal de 2 m³/s,” 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BHjzG4>
- [3] M. E. Madrid Wolff and J. M. Toro Bedoya, “Viabilidad técnica y económica de tornillos hidrodinámicos para generación eléctrica,” 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3v1axzK>
- [4] Enel. (2022) Turbina hidroeléctrica. [Online]. Available: <https://bit.ly/3Pzvmf7>
- [5] E. Martínez Rull. (2019) Lista la primera central de tornillo de Arquímedes. [Online]. Available: <https://bit.ly/3FsebaI>
- [6] J-GoodTech. (2022) Corporate profile. [Online]. Available: <https://bit.ly/3WnNb3b>
- [7] M. Sumino. (2022) Generador móvil de energía hidráulica ultrapequeño, tienes agua tienes energía. [Online]. Available: <https://bit.ly/3PuN4k9>
- [8] Sumino. (2022) Spiral pico hydropower generation device picopica@10. [Online]. Available: <https://bit.ly/3V58xkX>
- [9] FAO. (2022) Mejora de la calidad de agua en los estanques. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BEGhyo>
- [10] V. R. Vásquez Huiracocha, “Estudio y diseño de un sistema microhidroeléctrico para generación y abastecimiento de energía eléctrica mediante energía renovable para una vivienda típica del sector de Sinincay perteneciente al cantón Cuenca,” 2015.
- [11] R. A. Ramírez-Coronel and G. M. Ramón-Poma, “Estudio preliminar para la implementación de un sistema de microgeneración hidroeléctrico, para autoconsumo, en la hostería el reventador,” *Revista Científica FIPCAEC (Fomento de la investigación y publicación científico-técnica multidisciplinaria)*, vol. 7, no. 1, pp. 275–311, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BGscjY>
- [12] M. D. Arias Venegas, “Estudio de factibilidad y análisis de sistema de microgeneración hidroeléctrica,” 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3UXyF0Y>

- [13] L. E. Escobar Luna and D. M. Lucio Yugsi, "Diseño y construcción de una mini turbina tipo tornillo de arquímedes para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía mecánica," 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3FB0s1o>
- [14] S. C. Simmons, C. Elliott, M. Ford, A. Clayton, and W. D. Lubitz, "Archimedes screw generator powerplant assessment and field measurement campaign," *Energy for Sustainable Development*, vol. 65, pp. 144–161, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.09.007>
- [15] G. Dellinger, S. Simmons, W. D. Lubitz, P.-A. Garambois, and N. Dellinger, "Effect of slope and number of blades on archimedes screw generator power output," *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 896–908, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.060>
- [16] A. Kozyn and W. D. Lubitz, "A power loss model for archimedes screw generators," *Renewable Energy*, vol. 108, pp. 260–273, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.062>
- [17] H. Lavriç, A. Rihar, and R. Fišer, "Influence of equipment size and installation height on electricity production in an archimedes screw-based ultra-low head small hydropower plant and its economic feasibility," *Renewable Energy*, vol. 142, pp. 468–477, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.095>
- [18] K. Shahverdi, R. Loni, B. Ghobadian, M. Monem, S. Gohari, S. Marofi, and G. Najafi, "Energy harvesting using solar orc system and archimedes screw turbine (ast) combination with different refrigerant working fluids," *Energy Conversion and Management*, vol. 187, pp. 205–220, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.057>
- [19] S. Simmons and W. Lubitz, "Archimedes screw generators for sustainable energy development," in *2017 IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference (IHTC)*, 2017, pp. 144–148. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/IHTC.2017.8058176>
- [20] A. Raza, D. Xu, M. S. Mian, and J. Ahmed, "A micro hydro power plant for distributed generation using municipal water waste with archimedes screw," in *INMIC*, 2013, pp. 66–71. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/INMIC.2013.6731326>
- [21] "Diseño de una turbina hidráulica basada en el tornillo de arquímedes," Ph.D. dissertation, 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3YvJYk0>
- [22] Hidrometálica. (2022) Tornillo de arquímedes. [Online]. Available: <https://bit.ly/3WrAcxx>
- [23] LG Chile. (2022) ¿Por qué te conviene una lavadora de carga superior LG con motor smart inverter? [Online]. Available: <https://bit.ly/2svHe8D>