



POSGRADOS

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

RPC-SO-30-No.508-2019

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

ARTÍCULO PROFESIONAL DE ALTO NIVEL

TEMA:

EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE MICRO GENERACIÓN DE
ELECTRICIDAD A TRAVÉS DE CENTRALES HIDROKINÉTICA EN
RÍOS.

AUTOR:

EDDY XAVIER TUMBACO CASTRO

DIRECTOR:

CARLOS FERNANDO CHÁVEZ CÓRDOVA

GUAYAQUIL - ECUADOR
2022

Autores:



Eddy Xavier Tumbaco Castro
Ingeniero en Electricidad
etumbaco@est.ups.edu.ec

Director:



Carlos Fernando Chávez Córdova
Ingeniero en Electricidad
Master in Electricity
cchavez@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL – ECUADOR – SUDAMÉRICA

EDDY XAVIER TUMBACO CASTRO

CARLOS FERNANDO CHÁVEZ CÓRDOVA

EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE MICRO GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A TRAVÉS DE CENTRALES HIDROKINÉTICA EN RÍOS

Evaluación De Factibilidad De Micro Generación De Electricidad A Través De Centrales Hidrocinética En Ríos

Feasibility Evaluation of Micro Generation The Electricity Through Hydrokinetic Power Plants in the River

Tumbaco Eddy¹, Chavez Carlos²

¹ Estudiante del programa de maestría en electricidad MEL de la Universidad Politécnica Salesiana (UPS); email: castroledxa@hotmail.com

² Docente de la Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Electricidad; email: cchavez@ups.edu.ec

Abstract—The objective of this article is to evaluate the feasibility of micro electric generation using a hydrokinetic turbine in the Portoviejo, Cañar and Chanchán rivers. The vertical axis GORLOV type turbine was chosen as the most suitable; With the advantage that it can be used in shallow rivers with a flow speed of 0.60 to 2.5 m/s, field work carried out to determine the flow speed of the river current by the float method.

Works and research articles on Gorlov turbines were reviewed to verify the behavior, structure and designs of this type of turbines according to the construction parameters with the river parameters obtained in the field tests, to then make the graphs and evaluate using the algorithm of MatLab. The feasibility of using the aforementioned rivers the generation of low-power electrical energy for the populations adjacent to the rivers was investigated.

Keywords— micro generation, Gorlov Turbine, Float Method, Feasibility, Parameters, MatLab

Resumen— El objetivo de este artículo es evaluar la factibilidad de la micro generación eléctrica mediante una turbina hidrocinética en los ríos Portoviejo, Cañar y Chanchán. Se eligió la turbina tipo GORLOV de eje vertical como la más adecuada; con la ventaja de que se puede utilizar en ríos poco profundos con una velocidad de flujo de 0.60 a 2.5 m/s. Se realizaron trabajos de campo para determinar la velocidad del flujo de la corriente del río mediante el método del flotador.

Se revisaron trabajos y artículos de investigación sobre turbinas GORLOV para comprobar el comportamiento, estructura y diseños de este tipo de turbinas según los parámetros de construcción con los parámetros del río obtenidos en las pruebas de campos, para luego realizar las gráficas y evaluar utilizando el algoritmo de MatLab. Se investigó la factibilidad de utilizar los ríos antes mencionados para la generación de energía eléctrica de baja potencia para las poblaciones adyacente a los ríos.

Palabras clave— Micro generación, Turbina Gorlov, Método del flotador, Factibilidad, Parámetros, MatLab.

I. INTRODUCCIÓN

Generar energía eléctrica es uno de los principales indicadores para el desarrollo de las actividades productivas a nivel mundial. Se produce en parte por la combustión de los recursos no renovables tales como, combustibles fósiles que implican la emisión de contaminantes del aire y de gases de efecto invernadero que utilizan calderos, turbinas o motores de combustión interna [1].

La energía renovable está en todo su apogeo a nivel mundial por lo cual algunos países desarrollados tienen como objetivo la reducción de la emisión del dióxido de carbono (CO₂). Mientras que en muchos países en desarrollo el fin principal se relaciona más con la necesidad de aumentar la oferta energética y el incremento del acceso a la electricidad en zonas remotas [2].

La tecnología convencional para generar electricidad mediante sistemas hidráulicos necesita almacenar energía potencial del agua o interferir en el caudal natural del río. Sin embargo, con la ayuda de una turbina hidrocinética sumergida en el agua se produce un movimiento en la pala de la turbina. Transformando así directamente la energía potencial del agua en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica producto del flujo natural del agua [3].

La energía hidrocinética es limpia y silenciosa las 24 horas del día, es una propuesta atractiva económica y confiable sin ningún tipo de contaminación visual o ambiental. Esta tecnología beneficiará particularmente a las comunidades asentadas alrededor de los ríos en áreas remotas de la selva tropical, que no están conectadas al sistema nacional interconectado [4]. Por lo tanto, las turbinas hidrocinéticas, en la actualidad son la primera opción para el aprovechamiento de energía cinética de la corriente de agua de los ríos. En donde se identifican variables fundamentales como la densidad y la velocidad del fluido, al igual que el área de la sección transversal a través de la cual podría ser realizada la conversión [5].

Los principales desafíos para diseñar una central hidroeléctrica fluvial con la tecnología de las turbinas de corriente de los ríos, para estimar el potencial energético y la viabilidad económica del sistema [6]. Son: la selección del sitio para la determinación del rendimiento energético anual y el análisis de la característica del río. El reto más dominante que afecta a esta tecnología son los costos de operación y mantenimiento. El impacto ambiental como las alteraciones del

flujo de la corriente y las adversidades para la flora y fauna del sector. Desde el punto de vista técnico tenemos la selección de los componentes adecuados para el diseño del sistema [7].

El objetivo del artículo es demostrar la factibilidad de generar electricidad utilizando turbinas hidrocineéticas para proveer de energía eléctrica a una población aislada con una o más turbinas o conectarse a la red (SIN). Para ello es necesario conocer los datos de la propia turbina, como especificaciones técnicas, y también los datos del propio río, como especificaciones técnicas, y también los datos del propio río, como velocidad, caudal, área, profundidad, etc. Por el método del flotador se obtuvieron datos de pruebas de campo en los ríos Portoviejo, Cañar y Chanchán; que se toman como variable de entrada para el algoritmo de la propuesta.

II. MARCO TEÓRICO

A. Turbinas Hidrocineéticas.

Las turbinas hidráulicas trabajan con principios de operación similares a las turbinas eólicas, que consisten en; rotor (1), caja de cambios (2), generador (3), convertidor (4), transformador (5) y la conexión a la red eléctrica (6), como se muestra en la Figura (1) [8].

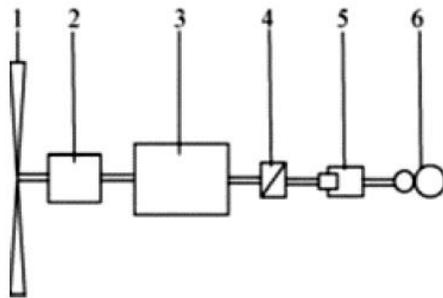


Figura 1.- Configuración de las central hidrocineética [8].

Los dos tipos de turbinas hidrocineéticas más usadas en sistema a pequeñas escalas son las de flujos axial (eje horizontal) y flujo cruzado (eje vertical) [9] como se muestra en la Figura (2).

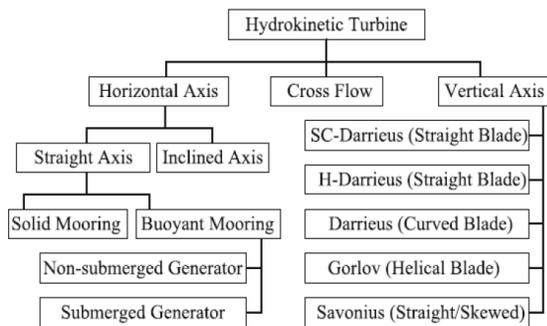


Figura 2.- Clasificación de las turbinas hidrocineéticas [7].

I. TURBINAS DE EJE HORIZONTAL

La rotación de las turbinas con eje horizontal es paralela a la dirección del fluido, su funcionamiento se asemeja a las turbinas eólicas [10]. A este tipo de turbinas se la denominan también como de flujo axial en la Figura (3) se muestra los tipos de turbinas de eje horizontal [9]. La velocidad para generar depende del número de palas siendo la de 3 más rápido y la de 24 la más lenta [5].

2. TURBINA DE EJE VERTICAL

La rotación de las turbinas con eje vertical es perpendicular a la dirección del fluido y paralelas a la superficie del agua, estas pueden ser de eje vertical al plano del agua y eje sobre el plano de la superficie del fluido, en la Figura (4) se muestra los tipos de turbinas de eje vertical [9].

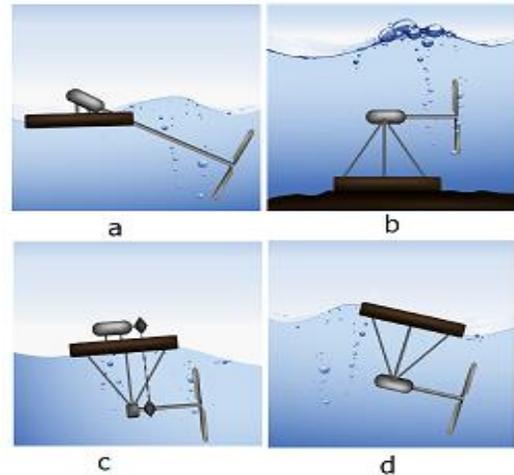


Figura 3.- Tipos de turbinas de eje horizontal. a) eje inclinado, b) amarre rígido, c) generador no sumergido y d) generador sumergido [9].

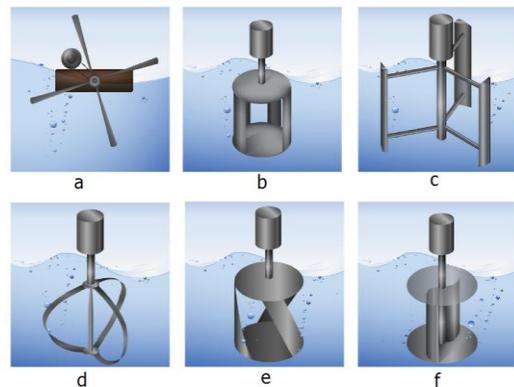


Figura 4.- Tipos de turbina de eje vertical. a) eje en el plano, b) jaula de ardilla Darrieus, c) H-Darrieus, d) Darrieus, e) Gorlov y f) Savonius [9].

B. Evaluación de los recursos.

La cantidad de energía hidrocineética contenida en las masas de agua depende de su velocidad. existen dos tipos de energía hidrocineética sustentada a causa del movimiento del agua. Es decir, la basada en el movimiento de las olas de los mares y la del movimiento de la corriente de los ríos, canales de riesgo, etc. Siendo esta última la que se utilizará para el desarrollo de este artículo [11]. Teóricamente, la potencia cinética en una turbina de corriente marina se expresa en la ecuación (1) asumiendo que la velocidad del agua es constante [12].

$$P_k = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

Donde:

- P_k es la potencia cinética del flujo del agua (w);
- ρ es la densidad del fluido (1000 kg/m³). Densidad del agua.
- A es el área de barrido por las palas de la turbina (m²)
- V es la velocidad del fluido (constante) (m/s).

Según la ley de Betz, el 59% de la energía del viento es aprovechada para producir el trabajo mecánico de la turbina, a esta fracción de energía se le denomina coeficiente de potencia [13][14]. De manera similar, se aplica a la energía contenida en una masa en movimiento, como el agua de un río, un canal abierto y una corriente de mareas. La energía que se extrae por el movimiento del agua depende de su densidad, velocidad y del área de la sección transversal de la turbina que esta sumergida en el agua [15]. Con lo cual se debe considerar el factor de C_p , que es la unidad de medida en la dinámica de fluidos para este tipo de turbinas se la obtiene mediante las ecuaciones (2) y (3) [16].

$$C_p = \frac{P_m}{P_k} \rightarrow C_p < 1 \quad (2)$$

$$C_p = \frac{P_m}{P_k} = \frac{P_m}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad (3)$$

Donde:

C_p es el coeficiente de potencia del rotor de la turbina

P_m es la potencia mecánica de la turbina (w) [17].

Entonces, la potencia generada (P_g) por la turbina hidrocinetica considerando el coeficiente de potencia, se la obtiene mediante la Ecuación 4 [18].

$$P_g = \frac{1}{2}\rho AV^3 C_p \quad (4)$$

La energía cinética generada por la corriente de río es utilizada para hacer rotar el convertidor de energía mecánica transmitida por el eje para generar electricidad mediante la Ecuación 5. [18]

$$P_{ok} = P_g * \eta_t * \eta_g \quad (5)$$

$$P_{ok} = \frac{1}{2}\rho AV^3 C_p * \eta_t * \eta_g \quad (6)$$

Donde:

P_{ok} es la potencia de salida del generador (w).

η_t es el rendimiento de transmisión.

η_g es el rendimiento del generador.

La energía (E) extraída en kWh, por la turbina hidrocinetica en un día se la determina mediante la Ecuación 7 y la energía anual se la determina mediante la Ecuación 8.

$$E_1 = P_{ok} * 24 \quad (7)$$

$$E_2 = P_{ok} * 24 * 30 \quad (8)$$

$$E_3 = P_{ok} * 24 * 365 \quad (9)$$

Donde:

P_{ok} es la potencia de salida del generador (w).

E es la energía extraída por la turbina (Wh).

La variación de estos parámetros permitirá extraer la mayor cantidad de energía cinética mediante el flujo de agua para poderla convertir en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. [19]

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Parámetros del río.

Para el presente artículo se seleccionaron los ríos: Río Portoviejo ubicado en la provincia de Manabí, nace de las ramificaciones de los cerros de Puca al sureste de la provincia, formado por las aguas de los ríos Naranjal, Santa Ana y Río Chico, desemboca en las cuencas del océano Pacífico. Río Cañar, ubicado en la provincia del Cañar, nace de la unión de pequeños ríos que descienden de las montañas de la sierra y del nudo del Azuay, recorre la provincia de Cañar hasta la provincia del Guayas en donde cambia de nombre. Río Chanchán, ubicado en la provincia del Chimborazo, nace de las ramificaciones de Cruzpungo y el valle del Alausí, desciende hacia el oeste hasta juntarse al río Chimbo para formar después el río Yaguachi.

1. MÉTODO DEL FLOTADOR.

El método del flotador consiste en encontrar la velocidad del agua al arrojar un objeto flotante en un tramo recto y uniforme del río entre los puntos A y B (Figura 2). Midiendo la sección transversal y el ancho del río (Figura 3). El tiempo requerido para que el objeto recorra el tramo seleccionado para la prueba es controlado por un cronómetro [20][21].

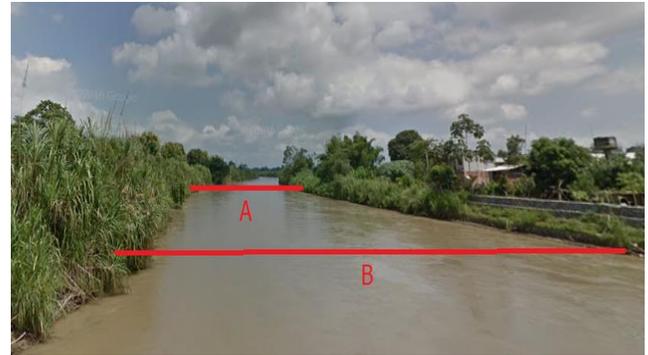


Figura 2.- Trazo del área de prueba de campo.



Figura 3.- Medición del ancho y profundidad para determinar el área transversal del río.

Para encontrar la velocidad se seleccionó un tramo de 30 metros de longitud del río, en donde se aplica el método del flotador para determinar la velocidad del fluido mediante la Ecuación 9.

$$V = \frac{d}{t_p} \quad (9)$$

Donde:

V es la velocidad del fluido (m/s).

d es la distancia del tramo seleccionado.

t_p es el tiempo promedio de que el flotador se demoró en recorrer la distancia del tramo.

Para determinar el área transversal se mide el ancho del río y se secciona en tramos iguales para proceder a medir la profundidad en cada sección, entonces el área en cada sección se la determinará mediante la Ecuación 10.

$$A = a * h_p \quad (10)$$

Donde:

A es el área del tramo seccionado (m²);

h_p es la profundidad promedio (m);

a es el ancho del río (m).

2. PRUEBAS DE CAMPO

La toma de muestra se realizó: En el río Portoviejo en los sectores Puerto Cañita y Los Ríos (Figura 4) del cantón Rocafuerte parroquia El cerrito. En el río Cañar en los sectores Jesús María en Naranjal provincia del Guayas, y Suya Grande en Molleturo provincia del Azuay (Figura 5). En el río Chanchán se seleccionó los sectores Ventura en la provincia del Cañar y Cumandá en la provincia del Chimborazo (Figura 6).



Figura 4.- Río Portoviejo, sectores Puerto Cañita y Los ríos, provincia de Manabí.



Figura 5.- Río Cañar, sectores Jesús María y Suya Grande, provincias del Guayas y Azuay.

Empleando el método del flotador se obtuvieron los datos de la velocidad del flujo del río en el tramo seleccionado con 30 metros de longitud determinada mediante la ecuación 6. Durante las pruebas de campos realizadas, se obtuvieron datos sobre la profundidad y el ancho del río. Las tablas muestran los datos de

tiempo, velocidad y profundidad del río Portoviejo (Tabla 1), río Cañar (Tabla2) y río Chanchán (Tabla 3) en los períodos descritos en las tablas.



Figura 6.- Río Chanchán, sectores Cumandá y Ventura, provincias del Cañar y Chimborazo.

Muestras	PARAMETROS					
	Puerto Cañita			Los Ríos		
	T	V	P _R	T	V	P _R
oct-21	45,78	0,66	0,85	49,78	0,60	0,63
nov-21	40,15	0,75	0,95	48,74	0,62	0,76
dic-21	45,67	0,66	1,14	47,29	0,63	0,82
ene-22	44,76	0,67	1,21	48,14	0,62	0,82
feb-22	39,65	0,76	1,09	47,26	0,63	0,90
mar-22	38,74	0,77	1,19	46,66	0,64	0,90
abr-22	39,71	0,76	1,17	47,95	0,63	0,94
may-22	37,41	0,80	1,07	44,74	0,67	0,97
jun-22	36,23	0,83	1,12	46,71	0,64	1,00
jul-22	47,73	0,63	1,01	47,87	0,63	1,04

Tabla 1.- Datos obtenidos tiempo (T); velocidad del río (V) y profundidad (P_R) del río Portoviejo.

MUESTRAS	PARAMETROS					
	Jesús María			Suya Grande		
	T	V	P _R	T	V	P _R
oct-21	20,21	1,48	0,75	20,65	1,45	0,87
nov-21	21,13	1,42	0,86	23,83	1,26	0,94
dic-21	21,11	1,42	0,94	24,91	1,20	1,05
ene-22	21,79	1,38	1,18	20,24	1,48	1,12
feb-22	20,12	1,49	1,26	21,15	1,42	1,24
mar-22	19,38	1,55	1,37	21,13	1,42	1,34
abr-22	21,45	1,40	1,11	21,78	1,38	1,27
may-22	19,45	1,54	1,15	22,12	1,36	1,21
jun-22	22,12	1,36	1,09	22,36	1,34	1,04

Tabla 2.- Datos obtenidos tiempo (T); velocidad del río (V) y profundidad (P_R) del río Cañar.

MUESTRAS	PARAMETROS					
	Cumandá			Ventura		
	T	V	P _R	T	V	P _R
oct-21	23,33	1,29	0,97	18,13	1,65	0,75
nov-21	20,51	1,46	1,07	17,89	1,68	0,88
dic-21	20,58	1,46	1,26	18,24	1,64	0,94
ene-22	18,3	1,64	1,33	16,98	1,77	0,94
feb-22	18,37	1,63	1,21	16,47	1,82	1,02
mar-22	18,58	1,61	1,31	17,18	1,75	1,02
abr-22	19,57	1,53	1,29	17,48	1,72	1,06
may-22	17,47	1,72	1,19	19,74	1,52	1,09
jun-22	24,23	1,24	1,24	20,71	1,45	1,12

Tabla 3.- Datos obtenidos tiempo (T); velocidad del río (V) y profundidad (P_R) del río Portoviejo.

Con los datos obtenidos se determina la factibilidad para generar energía eléctrica en la fluyentes de los ríos Portoviejo, Cañar y Chanchán del Ecuador.

B. Selección de la Turbina.

La turbina hidrocínética adecuada para determinar la factibilidad de generar energía eléctrica en los ríos seleccionados para esta investigación, es la turbina de eje vertical tipo Gorlov. Esta turbina aprovecha la forma de sus álabes para captar la energía cinética del agua. En mayor proporción alcanzando una velocidad de rotación hasta 3600 rpm, en ríos de poca profundidad (0.40 – 0.70 m) [22]. Principalmente en épocas donde, en diversos sectores del país las lluvias son escasa por la temporada. [7]

La ventaja de utilizar las turbinas Gorlov en un río es que se pueden instalar turbinas en serie, así se aprovecha la corriente del río para generar más potencia eléctrica. El impacto ambiental por su utilización es muy bajo gracias a su forma helicoidal. [23]

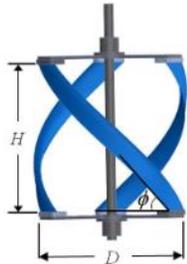


Figura 6.- Modelo CAD de turbina de palas helicoidales de un paso.[24]

En la tabla 4 se muestran los parámetros más utilizados en diseños de turbinas Gorlov tipo helicoidal necesarios para la generación de energía eléctrica a partir de simulaciones y proyectos ya realizados con este tipo de turbinas.[25]

Parámetro	Valor o rango de valores
Altura o longitud (H)	0,6 m; 0,234 m; 1,5 m; 0,25 m; 0,3 m; 0,8636 m
Diámetro (D)	0,5 m; 0,172 m; 1 m; 0,25 m; 0,3 m; 0,6096 m
Angulo de hélice (Φ)	43,7°; 60°
Numero de alabes (n)	3; 4
Relación de solidez (σ)	0,03; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,2; 0,27; 0,14; 0,38; 0,27
Perfil del alabe	NACA0020; NACA0018
Separación entre alabes (°)	120°; 90°
Relación de aspecto (AR)	1,5; 1

Tabla 4.- Parámetros utilizados en el diseño de turbinas tipo helicoidal o Gorlov.[25]

En la tabla 5 se describen los parámetros de la turbina hidrocínética tipo Gorlov utilizada en el proyecto del canal de Latacunga – Salcedo. Considerando que es la más adecuada para ser utilizada de acuerdo con la hidrogeografía de los ríos seleccionados para esta investigación. Con la finalidad de determinar la factibilidad de generar energía eléctrica a través del sistema hidrocínético propuesto. Se seleccionaron los parámetros de la turbina de Gorlov, que se pueden aplicar a los caudales de los ríos seleccionados para esta investigación [26].

Parámetro	Valor o rango de valores
Altura o longitud (H)	0.60 m
Diámetro (D)	0.45 m
Angulo de hélice (Φ)	51.85°
Numero de alabes (n)	3
Relación de solidez (σ)	0,32
Perfil del alabe	NACA0018
Separación entre alabes (°)	120°
Cuerda (m)	0.15

Tabla 5.- Parámetros de la turbina Gorlov que se implementó en el canal.[26]

C. Resultados en MatLab.

I. RESULTADOS RÍO PORTOVIEJO

Los resultados de la simulación de la potencia eléctrica generada por la turbina se obtuvieron en el sitio de muestreo en Puerto Cañita. A partir de los datos de la Tabla 6 y aplicando la Ecuación 6, se obtiene la potencia de salida del generador en watts. La Figura 7 muestra la relación entre la potencia generada en función a la velocidad del río obtenida en el período octubre 2021 a julio 2022.

Parámetro	Valor o rango de valores
Altura o longitud (H)	0.60 m
Diámetro (D)	0,45 m
Densidad del flujo (ρ)	1000 kg/m ³
Velocidad del flujo (V)	Datos extraído Tabla 1
Coefficiente de potencia (C _p)	35%
Rendimiento de la turbina (η _t)	85%
Rendimiento del generador (η _g)	95%

Tabla 6.- Parámetros para determinar la potencia de salida en el Río Portoviejo.

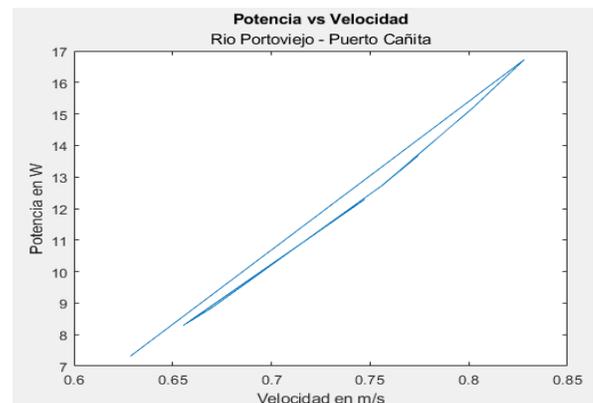


Figura 7.- Potencia generada vs velocidad del flujo del río.

La Figura 8 describe la potencia producida durante las pruebas de 12.83 W – 29.34 W con un promedio de 20.38 W. Usando la Ecuación 7, la Figura 9 muestra la producción de energía diaria de 175.52 Wh – 401.32 Wh con un promedio de 278.75 Wh dependiendo de la potencia generada y la velocidad del río. Utilizando la Ecuación 8, la Figura 10 muestra la producción mensual de energía de 5.27 kWh – 12.04 kWh, con base en el comportamiento del río durante el período de muestreo.

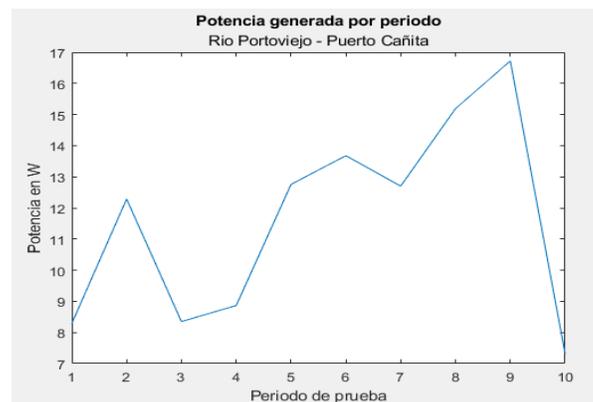


Figura 8.- Potencia generada en el río.

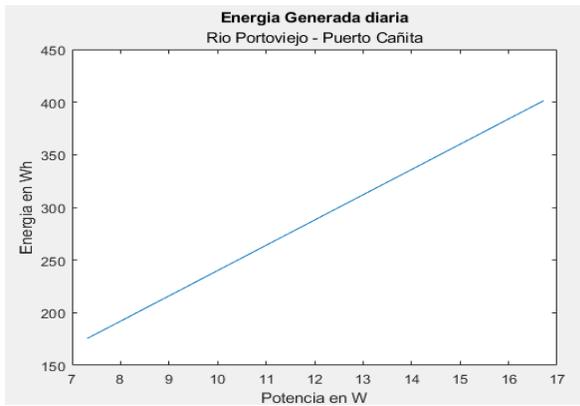


Figura 9.- Producción de energía diaria.

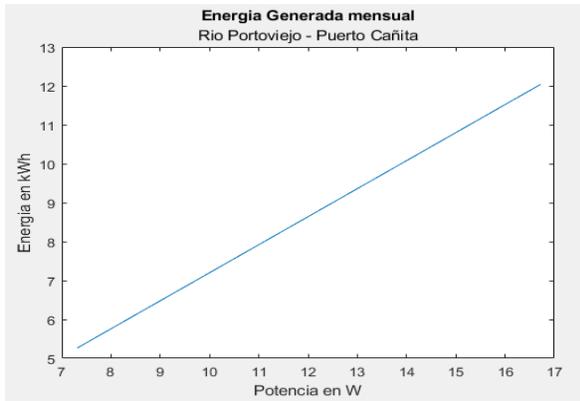


Figura 10.- Producción de energía mensual.

Los resultados de la simulación de la potencia eléctrica generada por la turbina se obtuvieron en el sitio de muestreo Los Ríos. A partir de los datos de la Tabla 6 y aplicando la Ecuación 6, se obtiene la potencia de salida del generador en watts. La Figura 11 muestra la relación entre la potencia generada en función a la velocidad del río obtenida en el período octubre 2021 a julio 2022.

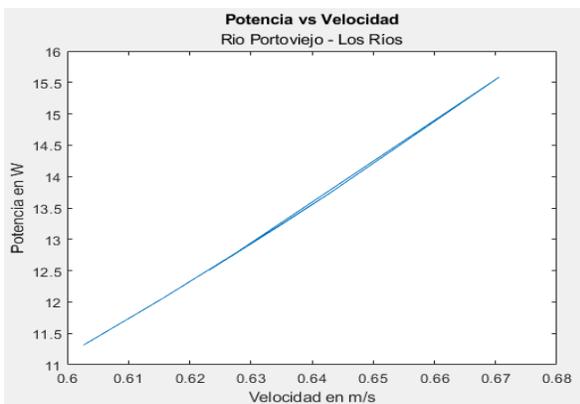


Figura 11.- Potencia generada vs velocidad del flujo del río.

La Figura 12 describe la potencia producida durante las pruebas de 6.45 W – 8.88 W con un promedio 7.44 W. Usando la

Ecuación 7, la Figura 13 muestra la producción de energía diaria de 154.72 Wh – 213.11 Wh con un promedio de 178.72 Wh dependiendo de la potencia generada y la velocidad del río. Utilizando la Ecuación 8, la Figura 14 muestra la producción mensual de energía de 4.64 kWh – 6.39 kWh, con base en el comportamiento del río durante el período de muestreo.

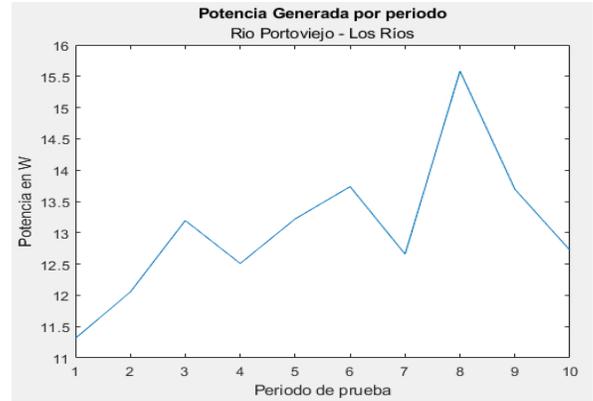


Figura 12.- Potencia generada en el río.

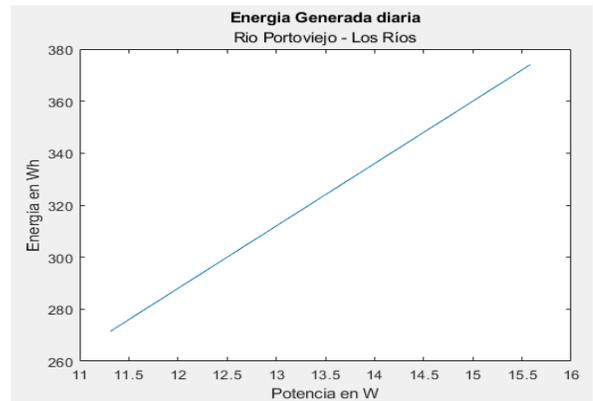


Figura 13.- Producción de energía diaria.

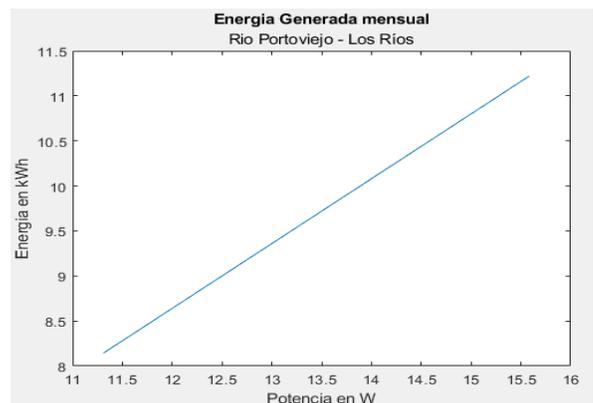


Figura 14.- Producción de energía mensual.

2. RESULTADOS RÍO CAÑAR

Los resultados de la simulación de la potencia eléctrica generada por la turbina se obtuvieron en el sitio de muestreo Jesús María. A partir de los datos de la Tabla 7 y aplicando la Ecuación 6, se obtiene la potencia de salida del generador en

watts. La Figura 15 muestra la relación entre la potencia generada en función a la velocidad del río obtenida en el período octubre 2021 a junio 2022.

Parámetro	Valor o rango de valores
Altura o longitud (H)	0.8636 m
Diámetro (D)	0,6096 m
Densidad del flujo (ρ)	1000 kg/m ³
Velocidad del flujo (V)	Datos extraído Tabla 1
Coefficiente de potencia (C_p)	35%
Rendimiento de la turbina (η_t)	85%
Rendimiento del generador (η_g)	95%

Tabla 7.- Parámetros para determinar la potencia de salida en el Río Cañar.

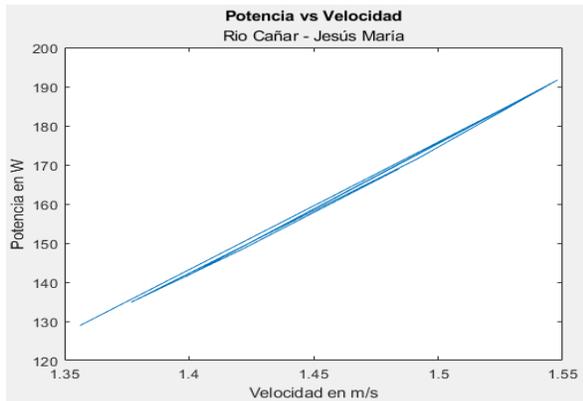


Figura 15.- Potencia generada vs velocidad del flujo del río.

La Figura 16 describe la potencia producida durante las pruebas de 128.93 W - 191.72 W con un promedio de 158.14 W. Usando la Ecuación 7, la Figura 17 muestra la producción de energía diaria de 3.09 kWh - 4.60 kWh con un promedio de 3.80 kWh dependiendo de la potencia generada y la velocidad del río. Utilizando la Ecuación 8, la Figura 18 se muestra la producción mensual de energía de 92.83 kWh - 138.04 kWh, con base en el comportamiento del río durante el período de muestreo.

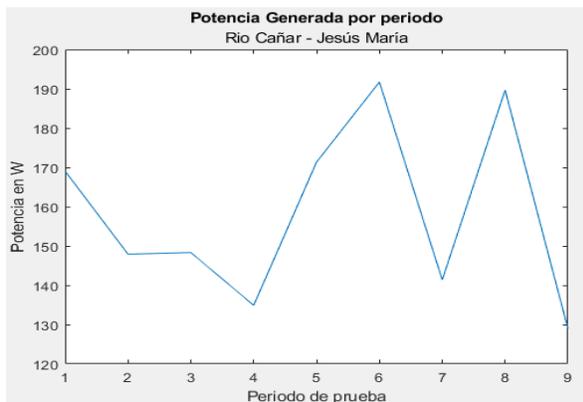


Figura 16.- Potencia generada en el río.

Los resultados de la simulación de la potencia eléctrica generada por la turbina se obtuvieron en el sitio de muestreo Suya Grande. A partir de los datos de la Tabla 7 y aplicando la Ecuación 6, se obtiene la potencia de salida del generador en

watts. La Figura 19 muestra la relación entre la potencia generada en función a la velocidad del caudal del río obtenida en el período octubre 2021 a julio 2022.

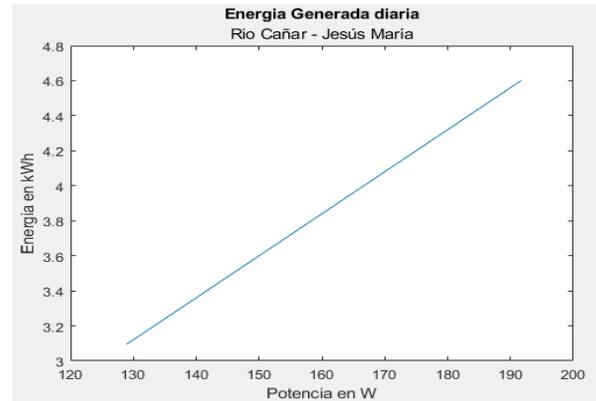


Figura 17.- Producción de energía diaria.

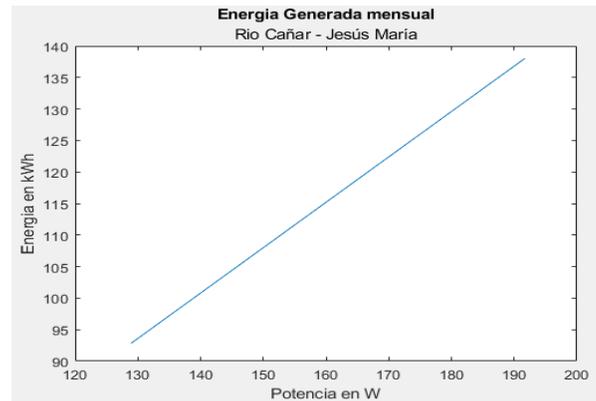


Figura 18.- Producción de energía mensual.

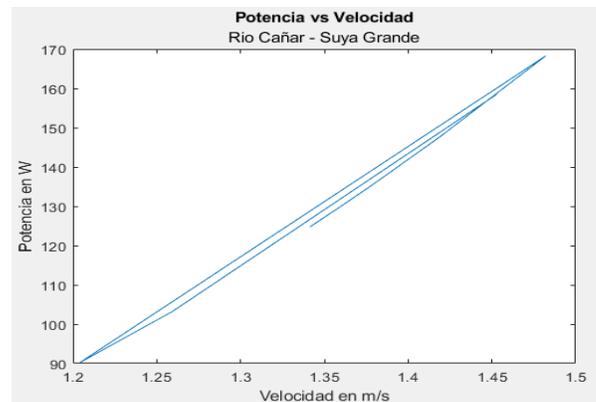


Figura 19.- Potencia generada vs velocidad del flujo del río.

La Figura 20 describe la potencia producida durante las pruebas de 90.28 W - 168.24 W con un promedio 133.83 W. Usando la Ecuación 7, la Figura 21 muestra la producción de energía diaria de 2.17 kWh - 4.04 kWh con un promedio de 3.21 kWh dependiendo de la potencia generada y la velocidad del río. Utilizando la Ecuación 8, la Figura 22 muestra la producción mensual de energía de 65.00 kWh - 121.13 kWh, con base en el comportamiento del río durante el período de muestreo.

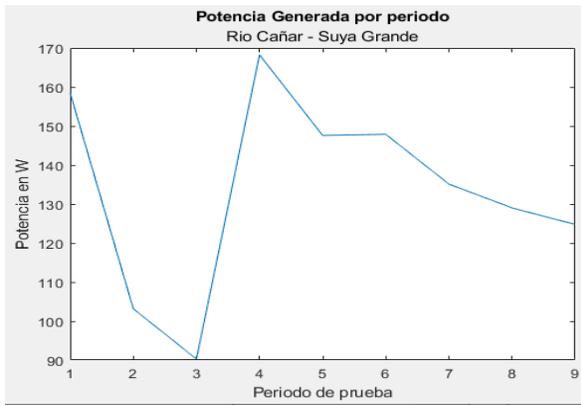


Figura 20.- Potencia generada en el río.

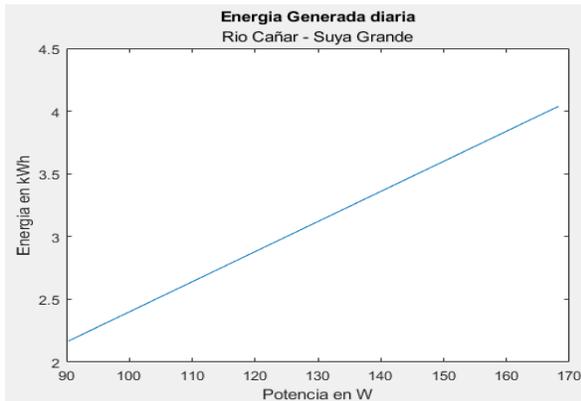


Figura 21.- Producción de energía diaria.

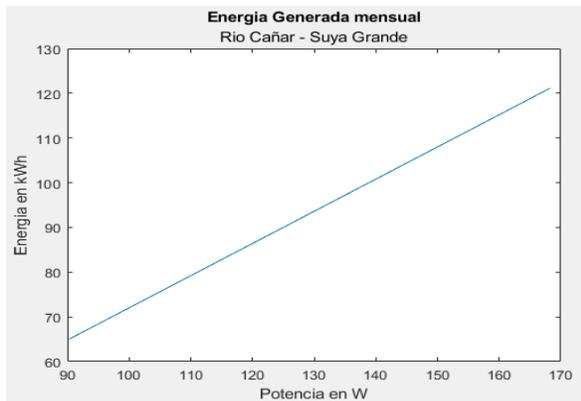


Figura 22.- Producción de energía mensual.

3. RESULTADOS RÍO CHANCHÁN

Los resultados de la simulación de la potencia eléctrica generada por la turbina se obtuvieron en el sitio de muestreo Cumandá. A partir de los datos de la Tabla 8 y aplicando la Ecuación 6, se obtiene la potencia de salida del generador en watts. La Figura 23 muestra la relación entre la potencia generada en función a la velocidad del caudal del río obtenida en el período octubre 2021 a junio 2022.

La Figura 24 describe la potencia producida durante las pruebas de 98.10 W – 261.72 W con un promedio 183.13 W. Usando la Ecuación 7, la Figura 25 muestra la producción de

energía diaria de 2.35 Wh – 6.28 Wh con un promedio de 4.40 Wh dependiendo de la potencia generada y la velocidad del río. Utilizando la Ecuación 8, la Figura 26 muestra la producción mensual de energía de 70.63 kWh – 188.44 kWh, con base en el comportamiento del río durante el período de muestreo.

Parámetro	Valor o rango de valores
Altura o longitud (H)	0.8636 m
Diámetro (D)	0,6096 m
Densidad del flujo (ρ)	1000 kg/m ³
Velocidad del flujo (V)	Datos extraído Tabla 1
Coefficiente de potencia (C_p)	35%
Rendimiento de la turbina (η_t)	85%
Rendimiento del generador (η_g)	95%

Tabla 8.- Parámetros para determinar la potencia de salida en el Río Chanchán.

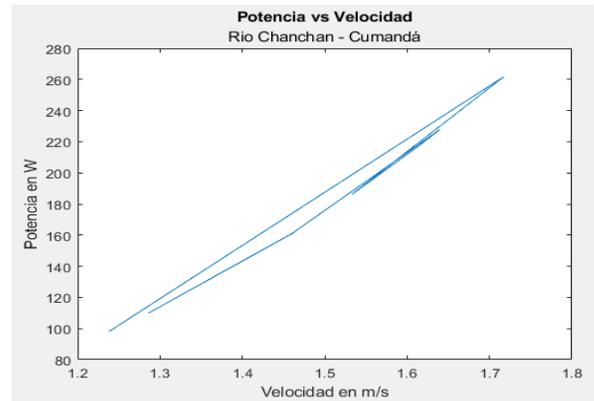


Figura 23.- Potencia generada vs velocidad del flujo del río.

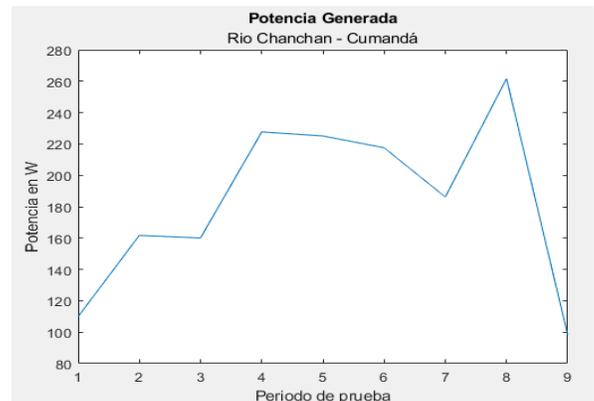


Figura 24.- Potencia generada en el río.

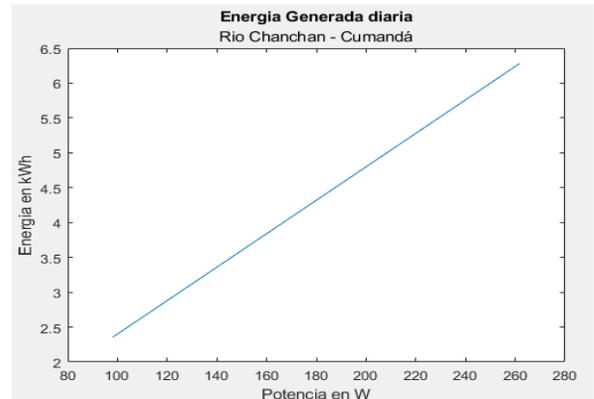


Figura 25.- Producción de energía diaria.

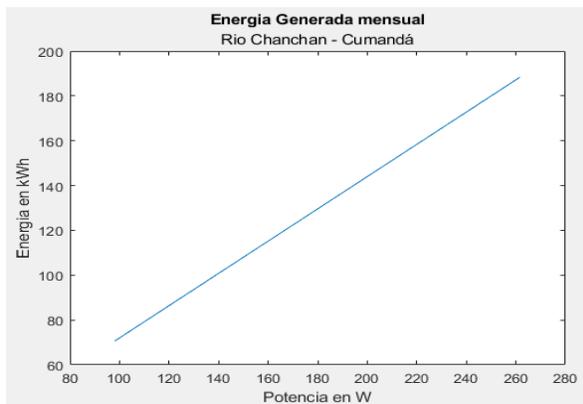


Figura 26.- Producción de energía mensual.

Los resultados de la simulación de la potencia eléctrica generada por la turbina se obtuvieron en el sitio de muestreo Ventura. A partir de los datos de la Tabla 6 y aplicando la Ecuación 6, se obtiene la potencia de salida del generador en watts. La Figura 27 muestra la relación entre la potencia generada en función a la velocidad del río obtenida en el período octubre 2021 a junio 2022.

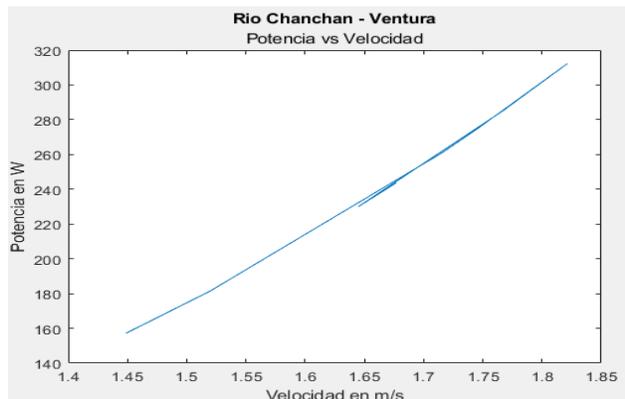


Figura 27.- Potencia generada vs velocidad del flujo del río.

La Figura 28 describe la potencia producida durante las pruebas de 157.10 W – 312.35 W con un promedio 242.25 W. Usando la Ecuación 7, la Figura 29 muestra la producción de energía diaria de 3.77 kWh – 7.49 kWh con un promedio de 5.81 kWh dependiendo de la potencia generada y la velocidad del río. Utilizando la Ecuación 8, la Figura 30 muestra la producción mensual de energía de 113.11 kWh – 224.89 MWh, con base en el comportamiento del río durante el período de muestreo.

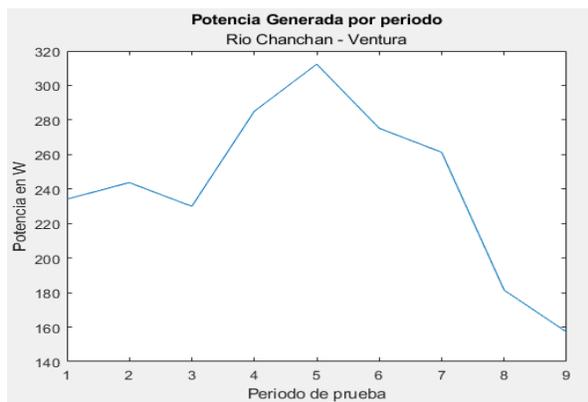


Figura 28.- Potencia generada en el río.

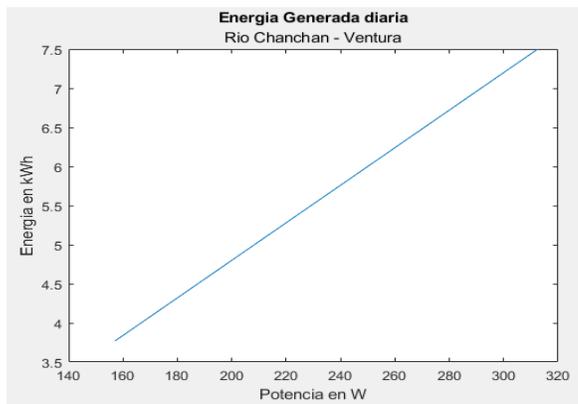


Figura 29.- Producción de energía diaria.

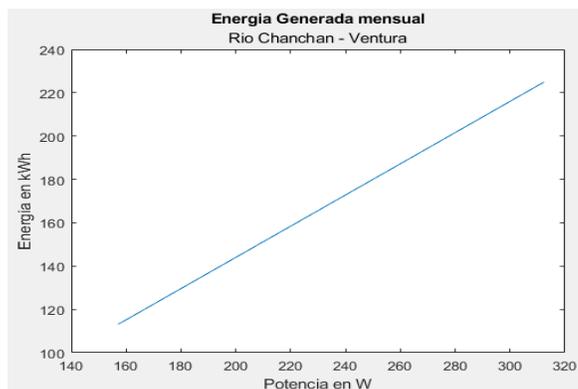


Figura 30.- Producción de energía mensual.

Las Tablas muestran los resultados de las simulaciones realizadas del sistema hidrocínético en los ríos Portoviejo (Tabla 9), Cañar (Tabla 10) y Chanchan (Tabla 11). La cantidad de energía que se producirá por día y la cantidad de energía producida en base a la velocidad promedio durante los meses de prueba.

Mes	RIO PORTOVIJO - RESULTADOS							
	PUERTO CAÑITA				LOS RIOS			
	V	P	E ₁	E ₂	V	P	E ₁	E ₂
Oct/21	0,655	14,544	198,916	5,968	0,603	6,447	154,715	4,642
Nov/21	0,747	21,561	294,767	8,846	0,616	6,868	164,832	4,945
Dic/21	0,657	14,650	200,359	6,011	0,634	7,519	180,463	5,414
Ene/22	0,670	15,562	212,827	6,384	0,623	7,128	171,072	5,132
Feb/22	0,757	22,387	306,174	9,185	0,635	7,534	180,807	5,424
Mar/22	0,774	24,002	328,260	9,848	0,643	7,828	187,872	5,636
Abr/22	0,755	22,286	304,788	9,144	0,626	7,213	173,114	5,193
May/22	0,802	26,654	364,531	10,936	0,671	8,880	213,113	6,393
Jun/22	0,828	29,344	401,321	12,040	0,642	7,803	187,270	5,618
Jul/22	0,629	12,834	175,515	5,266	0,627	7,249	173,930	5,220

Tabla 9.- Resultados de potencia en watts (P), energía diaria en Wh (E₁) y energía mensual en kWh (E₂), en base la velocidad del río (V).

Mes	RIO CAÑAR - RESULTADOS							
	JESUS MARIA				SUYA GRANDE			
	V	P	E ₁	E ₂	V	P	E ₁	E ₂
Oct/21	1,484	169,053	4,057	121,718	1,453	158,477	3,803	114,103
Nov/21	1,420	147,919	3,550	106,502	1,259	103,177	2,476	74,287
Dic/21	1,421	148,340	3,560	106,805	1,204	90,282	2,167	65,003
Ene/22	1,377	134,881	3,237	97,114	1,482	168,237	4,038	121,131
Feb/22	1,491	171,332	4,112	123,359	1,419	147,567	3,542	106,248
Mar/22	1,548	191,717	4,601	138,037	1,420	147,870	3,549	106,466
Abr/22	1,399	141,397	3,394	101,806	1,378	135,117	3,243	97,284
May/22	1,542	189,655	4,552	136,551	1,357	129,019	3,097	92,894
Jun/22	1,356	128,934	3,094	92,832	1,341	124,763	2,994	89,830

Tabla 10.- Resultados de potencia en watts (P), energía diaria en kWh (E₁) y energía mensual en kWh (E₂), en base la velocidad del río (V).

Mes	RIO CHANCHAN - RESULTADOS							
	CUMANDA				VENTURA			
	V	P	E ₁	E ₂	V	P	E ₁	E ₂
Oct/21	1,286	109,895	2,638	79,124	1,655	234,169	5,620	168,602
Nov/21	1,463	161,743	3,882	116,455	1,677	243,720	5,849	175,478
Dic/21	1,458	160,098	3,842	115,271	1,645	229,958	5,519	165,570
Ene/22	1,639	227,703	5,465	163,946	1,767	285,042	6,841	205,230
Feb/22	1,633	225,110	5,403	162,079	1,821	312,350	7,496	224,892
Mar/22	1,615	217,563	5,222	156,645	1,746	275,203	6,605	198,146
Abr/22	1,533	186,187	4,469	134,055	1,716	261,275	6,271	188,118
May/22	1,717	261,724	6,281	188,441	1,520	181,418	4,354	130,621
Jun/22	1,238	98,098	2,354	70,631	1,449	157,102	3,771	113,114

Tabla 11.- Resultados de potencia en watts (P), energía diaria en kWh (E₁) y energía mensual en kWh (E₂), en base la velocidad del río (V).

D. Análisis económico.

En las tablas se muestran los costos para el análisis económico para la implementación de la turbina tipo Gorlov para conocer la factibilidad para generar energía en los ríos estudiados. En función de la inversión inicial (Tabla 12), costo de O&M (Tabla 13) y costo de energía (Tabla 14).

INVERSION INICIAL		
PARÁMETRO	VALOR	OBSERVACION
Costo de fabricación y manufactura (C _m)	\$1400,00	700 USD/kW
Costo de Investigación y desarrollo (C _{R&D})	\$1400,00	700 USD/kW
Costo de materiales (C _{mat})	\$3622,46	
Costo de Generador (C _{gen})	\$1559,22	
Costo de ensamble y montaje	\$1995,42	25% (C _m +C _{R&D} +C _{mat} +C _{gen})
Costo misceláneo	\$159,63	2% (C _m +C _{R&D} +C _{mat} +C _{gen})
Total	\$10136,73	
Cost (USD/kW)	\$5068,365	

Tabla 12.- Cálculo de costo de inversión inicial estimado [27].

COSTOS O&M		
Valor cobrado	Años	Valor
1,5% Inversión Inicial	1 - 5	\$ 152,05
1,5% Inversión Inicial + 1,5% del costo O&M	6 - 10	\$ 154,33
1,5% Inversión Inicial + 3% del costo O&M	11 - 15	\$ 156,61
1,5% Inversión Inicial + 4,5% del costo O&M	16 - 20	\$ 158,89
1,5% Inversión Inicial + 6% del costo O&M	21 - 25	\$ 161,17

Tabla 13.- Cálculo del costo de operación y mantenimiento [27].

DATOS ENERGÉTICO/INGRESOS			
PARÁMETROS	CAÑAR	PORTOVIJEJO	CHANCHAN
Precio promedio (USD/kWh)	0,0908	0,09083	0,09083
Precio (USD/kWh)	0,0908	0,09083	0,09083
Potencia (W)	144,38	9,247	206,823
Días/mes (d)	30	30	30
horas/mes (h)	720	720	720
Energía Bruta (kWh)	103,95	6,658	148,91
Factor de planta	0,70	0,7	0,7
Energía neta (kWh)	72,77	4,66	104,24
Ingresos Brutos (USD/mes)	6,61	0,42	9,47
Ingresos Brutos (USD/año)	79,31	5,08	113,62

Tabla 14.- Cálculo ingreso neto con base a la potencia generada en los ríos estudiados [27][28].

Se realizo el análisis económico con las siguientes condiciones:

- Inversión inicial = \$10136,73. Considerando la estimación de costo del año 2020.
- Valor residual del 15% de la inversión \$1520,50
- Tasa de interés de 9%.

- Horizonte de análisis de 15 años.
- Costo de O&M, con el 1,5% inicial e incrementando cada 5 año 1,5% del costo de inversión.

Los resultados descritos en las tablas. Demuestran que el proyecto en el río Cañar (Tabla 15), río Portoviejo (Tabla 16) y río Chanchán (Tabla 17). Los proyectos no son rentables con las condiciones planteadas en el estudio presentado.

Año/Concepto	+ Ingresos por venta netas (kWh)	- Inversión inicial	- Costo O&M	= Utilidades netas
1	79,31	777,15	152,051	-849,89
2	79,31	777,15	152,051	-849,89
3	79,31	777,15	152,051	-849,89
4	79,31	777,15	152,051	-849,89
5	79,31	777,15	152,051	-849,89
6	79,31	777,15	154,332	-852,17
7	79,31	777,15	154,332	-852,17
8	79,31	777,15	154,332	-852,17
9	79,31	777,15	154,332	-852,17
10	79,31	777,15	154,332	-852,17
11	79,31	777,15	156,612	-854,45
12	79,31	777,15	156,612	-854,45
13	79,31	777,15	156,612	-854,45
14	79,31	777,15	156,612	-854,45
15	79,31	777,15	156,612	-854,45

Tabla 15.- Análisis económico de factibilidad en el río Cañar.

Año/Concepto	+ Ingresos por venta netas (kWh)	- Inversión inicial	- Costo O&M	= Utilidades netas
1	5,08	777,15	152,051	-924,12
2	5,08	777,15	152,051	-924,12
3	5,08	777,15	152,051	-924,12
4	5,08	777,15	152,051	-924,12
5	5,08	777,15	152,051	-924,12
6	5,08	777,15	154,332	-926,40
7	5,08	777,15	154,332	-926,40
8	5,08	777,15	154,332	-926,40
9	5,08	777,15	154,332	-926,40
10	5,08	777,15	154,332	-926,40
11	5,08	777,15	156,612	-928,68
12	5,08	777,15	156,612	-928,68
13	5,08	777,15	156,612	-928,68
14	5,08	777,15	156,612	-928,68
15	5,08	777,15	156,612	-928,68

Tabla 16.- Análisis económico de factibilidad en el río Portoviejo.

Año/Concepto	+ Ingresos por venta netas (kWh)	- Inversión inicial	- Costo O&M	= Utilidades netas
1	113,62	777,15	152,051	-815,58
2	113,62	777,15	152,051	-815,58
3	113,62	777,15	152,051	-815,58
4	113,62	777,15	152,051	-815,58
5	113,62	777,15	152,051	-815,58
6	113,62	777,15	154,332	-817,86
7	113,62	777,15	154,332	-817,86
8	113,62	777,15	154,332	-817,86
9	113,62	777,15	154,332	-817,86
10	113,62	777,15	154,332	-817,86
11	113,62	777,15	156,612	-820,14
12	113,62	777,15	156,612	-820,14
13	113,62	777,15	156,612	-820,14
14	113,62	777,15	156,612	-820,14
15	113,62	777,15	156,612	-820,14

Tabla 17.- Análisis económico de factibilidad en el río Chanchán.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES

Para analizar el comportamiento de la curva de potencia generada por las turbinas hidrocínéticas en función de la velocidad del río, se requiere de un historial completo de caudales. De esta manera podemos obtener los parámetros necesarios para modelar el sistema. De tal forma que al analizar el comportamiento del río mediante gráficas se pueda determinar la energía que producen las turbinas, para futuros trabajos de investigación.

A pesar de que en Ecuador existen una diversidad de ríos caudalosos, estos no han sido aprovechados para generar electricidad, mediante un sistema hidrocínético. Debido a la poca información que se tiene de esta tecnología, no se ha implementado en el país.

En conclusión, basándose en los resultados obtenidos del caso de estudio, implementar una micro central eléctrica con turbinas tipo Gorlov de eje vertical, no es factible invertir recursos en los ríos Portoviejo, Cañar y Chanchán. Por la baja producción de energía eléctrica anual debido a la velocidad de flujo promedio de 0.68 m/s, 1.41 m/s y 1.59 m/s respectivamente. Por otro lado, si se realiza una implementación en serie de múltiples turbinas de las mismas características en los ríos Cañar y Chanchán. Se puede llegar a producir por cada unidad generadora una potencia de 3.47 kWh y 4.96 kWh respectivamente por día. Teniendo como resultado una implementación factible, sin afectar el ecosistema.

2. RECOMENDACIONES

Para la adquisición de datos más confiables, se recomienda solicitarlos u obtenerlos del centro de estudios meteorológicos e hidrológicos, que puedan proporcionar datos en tiempo real e historiales de los mismos dependiendo la ubicación del caso en estudio, ya que los centros comparten la información con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

Para las pruebas ejecutadas en este artículo se llevó a cabo una investigación exhaustiva, de las características de las turbinas hidrocínéticas verticales y la hidrografía de los ríos necesarios para elaborar la simulación. Por la falta de investigación en el Ecuador de esta tecnología, no se ha explotado este tipo de energía. Se recomienda realizar otros estudios en varios sectores del país, para discutir sobre los pros y contras de la misma.

REFERENCIAS

- [1] R. Parra Narváez, "Factor de emisión de CO₂ debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001-2014," *ACI Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 7, no. 2, 2015.
- [2] D. Fouquet, "Policy instruments for renewable energy - From a European perspective," *Renew. Energy*, vol. 49, no. 11, pp. 15–18, 2013.
- [3] D. M. Rivadeneira, *Modelación y simulación de la operación de generadores que emplean turbinas hidrocínéticas en ríos de bajo caudal*. 2015.
- [4] B. Kirke, "Hydrokinetic and ultra-low head turbines in rivers: A reality check," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 52, pp. 1–10, 2019.
- [5] P. G. Eléctrica, "Turbinas hidrocínéticas una alternativa para generación eléctrica," pp. 2–5, 2016.
- [6] I. F. S. dos Santos, R. G. R. Camacho, G. L. Tiago Filho, A. C. B. Botan, and B. A. Vinent, "Energy potential and economic analysis of hydrokinetic turbines implementation in rivers: An approach using numerical predictions (CFD) and experimental data," *Renew. Energy*, vol. 143, pp. 648–662, 2019.
- [7] M. J. Khan, G. Bhuyan, M. T. Iqbal, and J. E. Quaicoe, "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1823–1835, 2009.
- [8] M. S. Güney and K. Kaygusuz, "Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 2996–3004, 2010.
- [9] H. J. Vermaak, K. Kusakana, and S. P. Koko, "Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 625–633, 2014.
- [10] B. Kirke, "Hydrokinetic turbines for moderate sized rivers," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 58, pp. 182–195, 2020.
- [11] A. Kumar and R. P. Saini, "Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine - A Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 289–310, 2016.
- [12] S. P. Koko, K. Kusakana, and H. J. Vermaak, "Micro-hydrokinetic river system modelling and analysis as compared to wind system for remote rural electrification," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 126, pp. 38–44, 2015.
- [13] C. Cardona Mancilla, J. A. Casas Monroy, J. Sierra Del Rio, E. L. Chica Arrieta, and D. Hincapié-Zuluaga, "Análisis computacional de una turbina hidrocínética de eje horizontal con y sin difusor," *Rev. CINTEX*, vol. 22, no. 1, pp. 47–57, 2017.
- [14] B. KIRKE and L. LAZAUSKAS, "Variable Pitch Darrieus Water Turbines," *J. Fluid Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 430–438, 2008.
- [15] M. F. Voneschen, *Introducción a la teoría de las turbinas eólicas*. 2009.
- [16] B. John and J. Varghese, "Sizing and techno-economic analysis of hydrokinetic turbine based standalone hybrid energy systems," *Energy*, vol.

- 221, p. 119717, 2021.
- [17] C. A. Ramírez-Gómez, A. J. Saavedra-Montes, and C. A. Ramos-Paja, "Modelado y Estimación de Parámetros de un Sistema de Generación Eólico de Baja Potencia," *TecnoLógicas*, no. November, p. 209, 2013.
- [18] B. John, R. N. Thomas, and J. Varghese, "Integration of hydrokinetic turbine-PV-battery standalone system for tropical climate condition," *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 361–373, 2020.
- [19] E. Sciences, "Tipo Darrieus ; Consideraciones De Diseño," vol. 23, pp. 14–18, 2018.
- [20] P. Barreto, "Instructivo de medición de caudal," *Lab. Calid. Ambient.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–9, 2009.
- [21] MINAGRI, "Manual N° 5 Medición de agua," *Minist. Agric. y Riego Lima*, vol. 2da Ed., p. 32, 2015.
- [22] F. DIKRIANSYAH, "Fabricacion de un modelo de turbina tipo Gorlov a escala de laboratorio," *Biomass Chem Eng*, vol. 3, no. 2, p. 19, 2018.
- [23] A. Gorlov, *Seguridad helicoidal de turbina y pescado*. 2010.
- [24] P. K. Talukdar, "IN-SITU EXPERIMENTS TO ESTIMATE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A DOUBLE-STEP HELICAL-BLADED HYDROKINETIC TURBINE," pp. 2–7, 2018.
- [25] E. L. C.-A. : J. C. Pineda-Ortiz, "Métodos numéricos para el desarrollo de una turbina hidrocínética tipo Gorlov," *UIS Ing*, vol. 19, no. 3, pp. 187–206, 2020.
- [26] R. A. C. M. Juan Carlos Vasquez, "Análisis Técnico - Económico, Diseño y Evaluación Experimental de la implementación de una turbina Hidrocinética para generación de energía," 2017.
- [27] P. G. V. B. Ogayar, *Cost determination of the electro-mechanical equipment of a small hydro-power plant*, 34th ed. 2009.
- [28] ARCERNNR, "Actualización Del Análisis Y Eléctrica Aprobado Con Periodo : Enero Económica Y Tarifas Del Sector Eléctrico," *Periodo enero - diciembre 2021*, p. 47, 2021.