



Evaluación de parámetros de funcionamiento para optimizar el rendimiento de turbinas hidráulicas de tornillo en zonas alto andinas del Perú

Evaluation of operating parameters to optimize the performance of hydraulic screw turbines in high andean zones of Peru

Lazo, Brecio D.¹; Lazo, Danae J.¹ y Condezo, David E.¹

¹Facultad de Ingeniería Mecánica,
Universidad Nacional del Centro del Perú,
Huancayo, Perú.

¹Facultad de Ingeniería Eléctrica,
Universidad Nacional del Centro del Perú,
Huancayo, Perú.

Cómo referenciar:

Lazo, B. D., Lazo, D. J. y Condezo, D. E. (2023). Evaluación de parámetros de funcionamiento para optimizar el rendimiento de turbinas hidráulicas de tornillo en zonas alto andinas del Perú. *Prospectiva Universitaria*, 20(01), 23–30. <https://doi.org/10.26490/uncp>

Resumen

Diversas comunidades de la región Junín como las de Huasicancha, del Alto Cunas, Pariahuanca y muchas otras de la selva peruana, carecen de servicios de energía eléctrica doméstica, no obstante si disponen de recursos hidráulicos susceptibles de explotación para la dotación de energía. En tal sentido, se buscó evaluar parámetros de funcionamiento mediante diseño experimental para optimizar el rendimiento de turbinas hidráulicas en zonas alto Andinas del Perú. Mediante la metodología de diseño VDI 2221 se evaluó diferentes tratamientos de la turbina hidráulica de tornillo que integra un procedimiento continuo de generación de potencia mecánica. Siguiendo un diseño factorial 2^3 , se recopilieron datos para el diseño experimental en el canal de riego del alto cunas. Los datos fueron procesadas y analizadas mediante el software estadístico MiniTab. Los resultados mostraron que los principales factores que influyen en la potencia mecánica fueron: (a) caída del agua, (b) longitud del tornillo, (c) diámetro del tornillo y (d) interacción entre la caída de agua y la longitud del tornillo. Por otra parte, no se encontro influencia significativa de los siguientes factores: (a) interacción entre la caída de agua y el diámetro del tornillo, (b) Interacción entre la longitud del tornillo y el diámetro del tornillo, (c) interacción entre la caída de agua, la Longitud del tornillo y el diámetro del tornillo. Los resultados obtenidos son suceptibles de ser aplicados para la generación de energía eléctrica a lo largo del canal de riego del alto cunas.

Palabras clave: turbina hidráulica, tornillo de Arquímedes, energía mecánica.

Abstract

Several communities in the Junín region, such as Huasicancha, Alto Cunas, Pariahuanca and many others in the Peruvian jungle, lack domestic electricity services, but they do have hydraulic resources that can be exploited to provide energy. In this sense, we sought to evaluate operating parameters through experimental design to optimize the performance of hydraulic turbines in high Andean areas of Peru. By means of the VDI 2221 design methodology, different treatments of the hydraulic screw turbine that integrates a continuous mechanical power generation process were evaluated. Following a 2^3 factorial design, data were collected for the experimental design in the upper cunas irrigation canal. The data were processed

and analyzed using MiniTab statistical software. The results showed that the main factors influencing mechanical power were: (a) water drop, (b) screw length, (c) screw diameter and (d) interaction between water drop and screw length. On the other hand, no significant influence of the following factors was found: (a) interaction between water drop and screw diameter, (b) interaction between screw length and screw diameter, (c) interaction between water drop, screw length and screw diameter. The results obtained can be applied to the generation of electric power along the upper Cunas irrigation canal.

Keywords: hydraulic turbine, Archimedes screw, mechanical energy.

1 Introducción

La interacción de la comunidad científica con los grupos de interés mejora la solución del problema, esa debe ser la intención del resultado de la investigación cuantitativa o cualitativa. La energía en sus diferentes niveles es utilizada por los humanos para diferentes procesos tecnológicos. Los agricultores necesitan energía eléctrica en los puntos de toma de agua para evitar accidentes. La alternativa para resolver el problema de los agricultores es instalar turbinas hidráulicas de tornillo.

El objetivo de la investigación fue experimentar el principio de la turbina hidráulica de tornillo en la generación de energía mecánica. La energía generada se utiliza para la generación de energía eléctrica a lo largo del canal de riego del alto Cunas del valle del Mantaro.

Maldonado (2005), en su tesis titulada Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán-Región Loreto, indica que la dificultad radicaba en el diseño de turbinas para utilizar este recurso en diferentes dimensiones. Se decidió probar una turbina prototipo en la comunidad Paraíso, ubicada en el Distrito de Mazan, como parte de los ensayos de campo. Los datos recopilados se han ajustado a una ecuación de potencia con un exponente aproximado de 3 (2.8366).

Tenorio en su tesis titulada Diseño e Implementación de un Prototipo de una Pico central Hidráulica para uso Rural. La turbina creada y construida logró una eficiencia del 79 %, una cifra que se encuentra dentro de los estándares aceptables establecidos por los fabricantes de turbinas Pelton. Sin embargo, este alto rendimiento se atribuye al ensamblaje preciso y, sobre todo, a las consideraciones apropiadas durante el proceso de diseño.

El estudio de las características de turbina hidráulica en flujo superficial libre contrastó que el rendimiento de la turbina hidráulica mediante el análisis de flujo multifásico es mayor que el rendimiento del análisis de flujo monofásico en las mismas condiciones de operacionalización. Signifi-

ca que el funcionamiento de la turbina hidráulica en flujo superficial libre con poca profundidad de agua aumenta significativamente la relación de velocidad de entrada (Nishi et al., 2017).

Los tornillos de Arquímedes pueden funcionar en cabezas de agua bajas (menos de unos 5 m) y en una gama de caudales con eficiencias prácticas del 60% al 80% y pueden generar hasta 355 kW de potencia. Las Turbinas de Tornillos de Arquímedes AST aumentan el número de lugares adecuados donde es posible desarrollar la energía hidroeléctrica sostenible, incluso en regiones no desarrolladas y de difícil acceso y en pequeñas comunidades. En muchos sitios de baja altura, los AST pueden ser más eficaces en función de los costos, con menores costos de instalación y funcionamiento que los sistemas hidroeléctricos alternativos. Un AST también puede reducir la perturbación de los procesos naturales de sedimentación y erosión y tener menores repercusiones en los peces y otra fauna. Los AST a menudo pueden adaptarse a las presas o embalses existentes sin energía, proporcionando nueva capacidad hidroeléctrica con un impacto ambiental marginal muy reducido. En este examen se esbozan las características de los AST y luego se examina y analiza la forma en que podrían beneficiar la sostenibilidad del desarrollo de la energía hidroeléctrica (YoosefDoost & Lubitz, 2020).

El generador de tornillo de Arquímedes (ASG) permite transformar la energía potencial de un fluido en energía mecánica y es conveniente para sitios hidráulicos de baja carga. Como es una tecnología nueva y en crecimiento con pocas pautas para el diseño y la optimización del rendimiento, la presente contribución propone un nuevo método de investigación experimental y numérico para estudiar el rendimiento de ASG. Para estudiar la estructura de los flujos turbulentos 3D y las pérdidas de energía en un tornillo, se resuelven las ecuaciones de Navier Stokes de un modelo de turbulencia clásico. Como se demostró, la fortaleza de este método es permitir estudiar con precisión el desempeño del ASG solo con los coeficientes habituales en los modelos de cierre turbulento. Estas simulaciones se logran para diver-

sas condiciones de flujo utilizando la geometría de un tornillo a escala de laboratorio. Se muestra que los valores modelados de pares y eficiencias están muy de acuerdo con los experimentales. Además, la simulación numérica parece ser una herramienta confiable para predecir el rendimiento de ASG que se encuentra por encima del 80% (Dellinger et al., 2018).

En esta investigación se experimentó la generación de potencia mecánica para la generación de energía eléctrica desde los canales de riego del valle del Mantaro.

2 Materiales y métodos

2.1 Procedimiento

Se llevó a cabo un experimento factorial 2^3 con diseño de Yates (Gutierrez & De la Vara, 2004) para evaluar la energía mecánica producida por un prototipo de turbina hidráulica con tornillo de Arquímedes en distintas condiciones de caída de agua, longitud y diámetro del tornillo.

Para el diseño del prototipo (figura) se consideró el enfoque estandarizado de la asociación alemana de ingenieros VDI (Verein Deutscher Ingenieure) conocido como VDI 2221/2222 (Pahl & Beitz, 2007). Finalmente el diseño del prototipo contó con los siguientes elementos: (a) soporte estructural, (b) tornillo de Arquímedes (tres kits de experimentación) y (c) disco de medición (torque, revoluciones por minuto).

La energía hidráulica proveniente del canal de riego del alto cunas fue capturado en la localidad de Angasmayo, recorriendo las localidades de Chalhuanas, Chambara, Huayao, Huachac y Sicaya del valle del Mantaro. Las características de la corriente de agua del canal matriz de riego fue de una velocidad de 0.235 m/s, caudal de 1.021 m^3/s y una presión de 1.016 atmósferas.

La producción de la energía mecánica se realizó con el prototipo de la turbina hidráulica de tornillo, el cual fue diseñado para capturar la energía hidráulica del canal de riego, esta fuerza impacta en la hélice de tornillo parra recorrer la longitud según el tratamiento del diseño factorial 2^3 .

2.2 Mediciones

la medición del torque y revoluciones (RPM) en el eje de la turbina hidráulica de tornillo se midió con

un sensor de torque y un tacómetro, respectivamente. La energía mecánica se calculó mediante la ecuación 1, para luego ser codificada en una ficha de registro. La determinación de la potencia mecánica se calculó tomando estos datos y aplicando la ecuación 1.

$$P_c = M \times \omega \quad (1)$$

En la fase de experimentación, la medición de la producción de energía mecánica se realizó en los ocho tratamientos del diseño factorial 2^3 . Para la medición se consideró factores para la experimentación mediante la siguiente denominación:

- A= Caída de agua: 300; 500 mm
- B= Longitud del tornillo: 500; 1000 mm
- C= Diámetro del tornillo: 100; 150 mm

El cálculo de los parámetros de funcionamiento del prototipo se realizó con las siguientes ecuaciones (Charisiadis, 2015).

$$T_t = T(L \times N)/P \quad (2)$$

$$P_{out} = T_t \times \omega \quad (3)$$

$$Q = (N \times V \times \omega)/2\pi \quad (4)$$

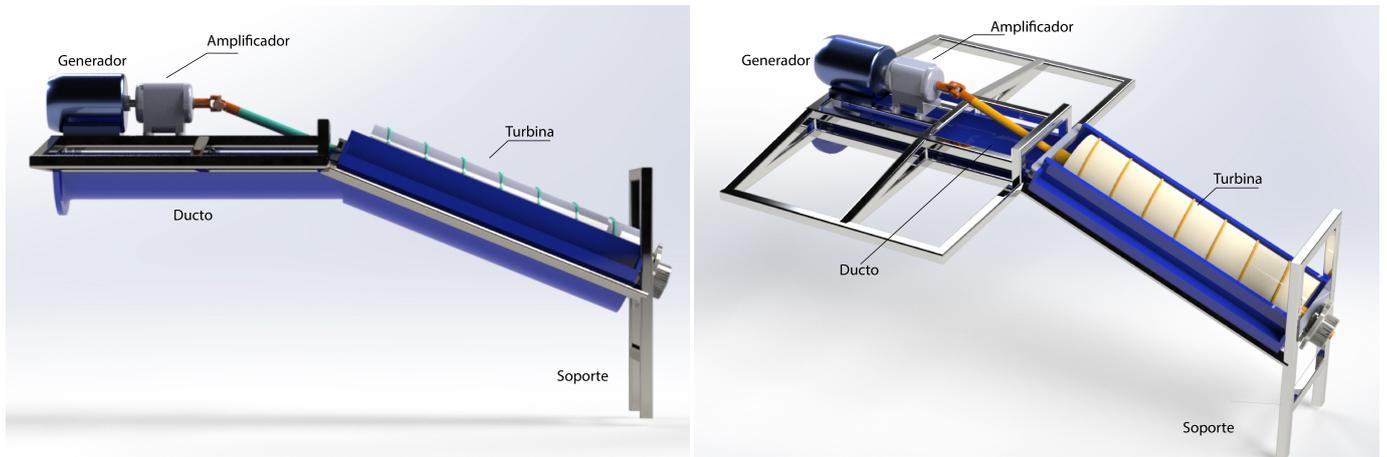
$$h = L \times \sin(\beta) \quad (5)$$

$$P_{avail} = \rho \times g \times h \times Q \quad (6)$$

Donde T_t es el torque total, L longitud del tornillo, N número de aletas del tornillo, P potencia, ω frecuencia angular (rad/seg), Q flujo volumétrico, V velocidad de traslación del cubo, h altura de la cabeza del tornillo, β ángulo de inclinación del tornillo de Arquímedes, P_{avail} Potencia disponible, ρ densidad del agua y g constante gravitacional (9.81m/s²).

La torsión total en el tornillo fue calculada multiplicando la torción de un solo cubo por el número de cubos a lo largo de la longitud del tornillo, definida en la ecuación 2. La potencia de salida fue calculada mediante la ecuación 3. La tasa de flujo volumétrico Q a través del tornillo se calculó basándonos en el volumen de agua en un solo cubo y la velocidad de traslación del cubo a lo largo del eje del tornillo, definida mediante la ecuación 4. La altura de la cabeza del tornillo se calculó mediante la ecuación 5 y la potencia disponible en el flujo fue calculada mediante la ecuación 6.

Figura 1
Prototipo de Turbina Hidráulica de Tornillo



3 Resultados

3.1 Producción de energía durante la experimentación

Los valores de energía mecánica producida por el prototipo se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Resultados de Generación de Energía Mecánica

Combinaciones	Tratamientos			Replicas			Total
	A	B	C	I	II	III	
-1	-	-	-	0.38	0.16	0.14	0.23
a	+	-	-	0.61	0.72	0.68	0.67
b	-	+	-	1.37	1.63	1.54	1.51
ab	+	+	-	1.92	2.21	2.16	2.1
c	-	-	+	0.35	0.4	0.39	0.38
ac	+	-	+	0.67	0.79	0.77	0.75
bc	-	+	+	1.55	1.82	1.75	1.71
abc	+	+	+	2.23	2.63	2.52	2.46

Nota. Arreglo factorial 2³. Los valores de energía mecánica de las réplicas y el total se encuentran en kW.

Con estos datos, se realizó un análisis de varianza para determinar la influencia de los factores y sus interacciones en la generación de energía mecánica. Esto fue fundamental para determinar el análisis factorial y confirmar la hipótesis formulada en el estudio.

Tabla 2
Efectos y Coeficientes Estimados Para Energía Mecánica

Término	Efecto	Coeficiente	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		1.2254	0.0259	47.34	.000	
A	0.5357	0.2678	0.0259	10.35	.000	1.00
B	1.4386	0.7193	0.0259	27.79	.000	1.00
C	0.1952	0.0976	0.0259	3.77	.002	1.00
A*B	0.1314	0.0657	0.0259	2.54	.022	1.00
A*C	0.0213	0.0106	0.0259	0.41	.686	1.00
B*C	0.0811	0.0406	0.0259	1.57	.137	1.00
A*B*C	0.0611	0.0305	0.0259	1.18	.255	1.00

Nota. EE: Error Estándar. El resumen del modelo incluye S = 0.1268, R-cuadrado = 98.26%, R-cuadrado ajustado = 97.50% y R-cuadrado predicho = 96.09%.

El análisis de varianza determinó que los factores caída de agua, longitud del tornillo y el diámetro del tornillo, tuvieron un efecto significativo en la generación de energía mecánica. Contrariamente, las interacciones AB (caída de agua-longitud del tornillo), AC (caída de agua-diámetro del tornillo) y BC (longitud del tornillo-diámetro del tornillo) no presentaron un efecto significativo en la generación de energía mecánica.

Por otro lado, tampoco las interacciones entre ABC (caída de agua-Longitud del tornillo-diámetro del tornillo) presentaron un efecto significativo en la generación de energía mecánica. El análisis de varianza se presenta en la tabla 3.

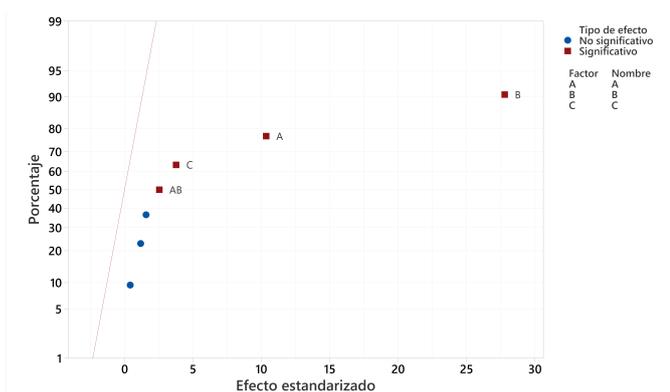
Tabla 3
Análisis de Varianza de la Energía Mecánica Generada

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	14.5366	2.0767	129.14	.000
Lineal	3	14.3684	4.7895	297.83	.000
A	1	1.7217	1.7217	107.06	.000
B	1	12.4183	12.4183	772.22	.000
C	1	0.2285	0.2285	14.21	.002
Interacciones de 2 términos	3	0.1458	0.0486	3.02	.060
A*B	1	0.1036	0.1036	6.44	.022
A*C	1	0.0027	0.0027	0.17	.686
B*C	1	0.0395	0.0395	2.46	.137
Interacciones de 3 términos	1	0.0224	0.0224	1.39	.255
A*B*C	1	0.0224	0.0224	1.39	.255
Error	16	0.2573	0.0161		
Total	23	14.7939			

Nota. Significancia de 5%.

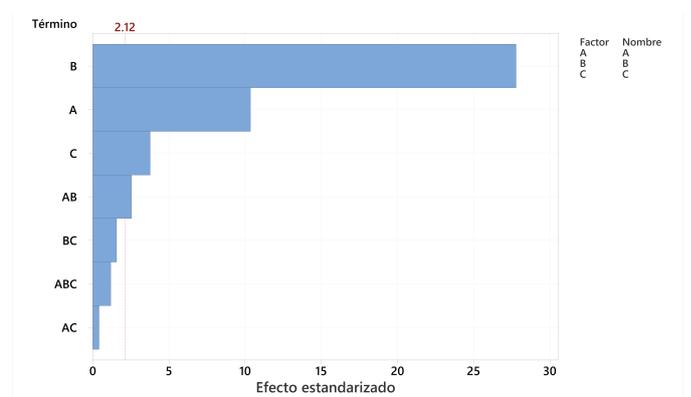
La figura 2 muestra que los puntos alejados de la línea suelen representar efectos significativos. Estos efectos suelen ser más pronunciados y están más distantes de la línea de ajuste en comparación con los efectos menos relevantes. Aquellos efectos que no son significativos tienden a ser más sutiles y se acercan más al valor cero.

Figura 2
Distribución Normal de Efectos Estandarizados para Energía Mecánica



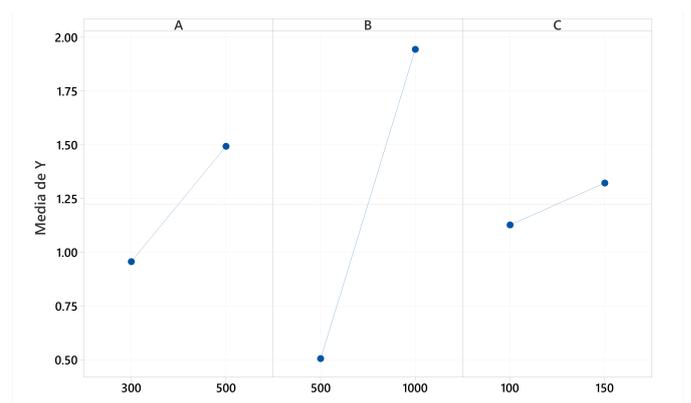
Por otro lado, el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados (figura 3) mostró que los factores longitud del tornillo, caída de agua, diámetro del tornillo y la interacción caída de agua - longitud del tornillo son elementos significativos en la generación de potencia mecánica.

Figura 3
Diagrama de Pareto Sobre Efectos Estandarizados Para Potencia Mecánica



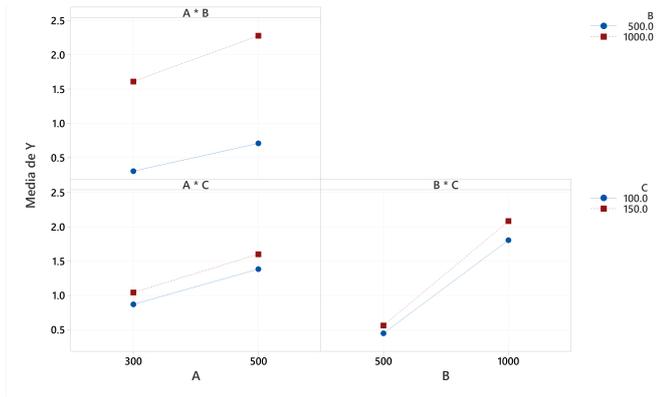
Se realizó un análisis de efectos principales para determinar la influencia de los factores en la generación de energía mecánica. La figura 4 muestra que la caída de agua, la longitud y el diámetro del tornillo presentan influencia positiva sobre la potencia mecánica en el prototipo.

Figura 4
Efectos Principales para la Potencia Mecánica



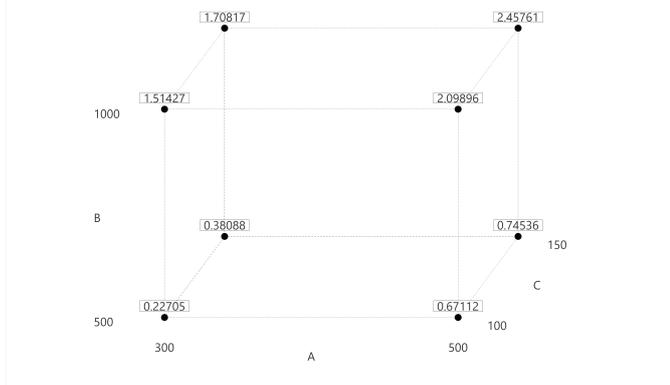
Por otro lado, la figura 5 muestra el análisis de interacciones entre los factores, el cual evidenció que ninguna interacción presentó influencia significativa sobre la potencia mecánica.

Figura 5
Interacción para la Potencia Mecánica



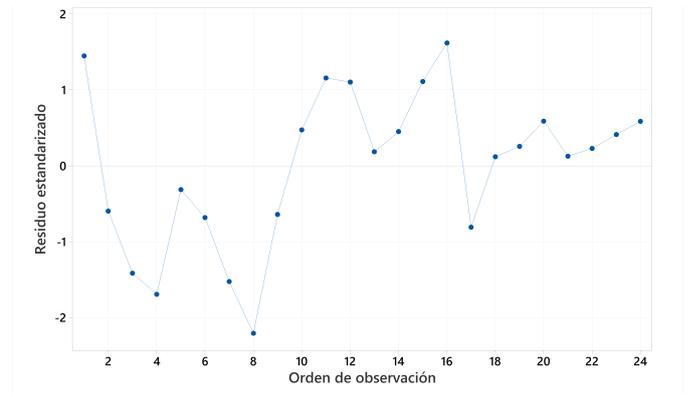
Un análisis mediante gráfica de cubos (figura 6) mostró que el máximo valor de la potencia mecánica se obtiene con caída de agua positiva, longitud del tornillo positiva y diámetro del tornillo positivo.

Figura 6
Gráfica de Pareto Sobre Efectos Estandarizados para Potencia Mecánica



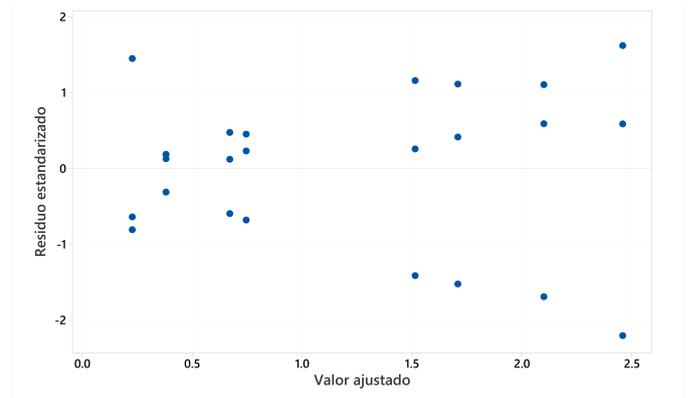
Un análisis de residuos según orden de observación presentado en la figura 7, muestra todos los residuos en el orden en el que se colectaron los datos y se utilizan para hallar errores no aleatorios, especialmente de efectos relacionados con el tiempo, ayudó también a revisar el supuesto que establece que los residuos no se correlacionan unos a otros.

Figura 7
Residuos Vs. Orden para Potencia Mecánica



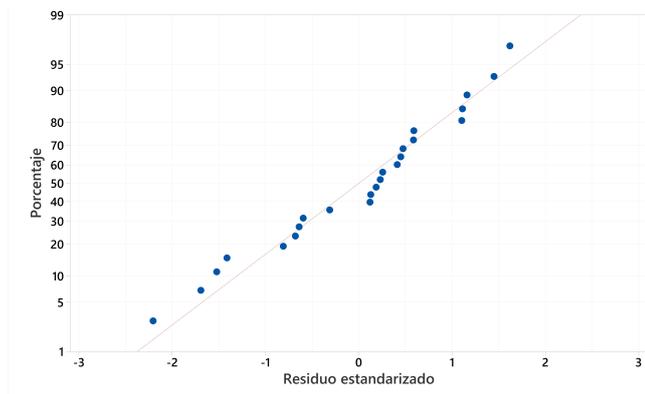
Asimismo, se evaluó la relación entre residuos y valores ajustados (figura 8), en la que se observó una distribución aleatoria alrededor del cero. Cuando un punto se aleja considerablemente del resto, podría tratarse de un valor atípico. Si la dispersión de los residuos aumenta conforme crecen los valores ajustados, esto podría indicar una violación del supuesto de una varianza constante.

Figura 8
Residuos Contra Valores Ajustados Para Potencia Mecánica



Se realizó también un análisis de probabilidad normal de residuos (figura 9), la cual mostró que los puntos tienden a conformar una línea recta, lo cual evidenció que los residuos se distribuyeron normalmente.

Figura 9
Probabilidad Normal para Potencia Mecánica



4 Discusiones

4.1 Generación de energía mecánica

De acuerdo con los tratamientos aplicados, se confirma la generación de energía mecánica debido a la influencia de los factores intervenidos. Los efectos más relevantes se encuentran en los factores A, B, C y la interacción AB. Así, una vez que la turbina de tornillo alcanza una velocidad de 94.35 revoluciones por minuto, genera una potencia mecánica de 2.21 kW. Los tornillos de Arquímedes pueden funcionar con bajas caídas de agua (menos de unos 5 m) y una gama de caudales con eficiencias prácticas del 60% al 80% y pueden generar hasta 355 kW de potencia (YoosefDoost & Lubitz, 2020).

Según la respuesta del DOE en p-value, la mejor repuesta de potencia mecánica producida se logra con el tratamiento ab. Sobre esta configuración se debe incluir el tratamiento de los demás factores es decir en base a un solo rotor. Los aspectos geométricos de un tornillo de Arquímedes se definen mediante ciertos factores externos, como su radio exterior, longitud y ángulo de inclinación, y factores internos, como su radio interior, número y espaciado de las paletas.

Los factores externos suelen ser fijados por la ubicación del tornillo y la cantidad de agua que debe ser transportada. En contraste, los factores internos pueden ser seleccionados a discreción para mejorar

la eficiencia del tornillo (Charisiadis, 2015)

4.2 Impacto ambiental

La utilización de la energía hidráulica a baja velocidad y presión produce bajo impacto a la biodiversidad (biótica y abiótica), tal como se menciona en los textos de (Pichs-Madruga et al., 2011). Evaluación de resultados de Potencia mecánica Los residuos obtenidos se encuentran entre 2,0 y -2,0 demostrando claramente que el procedimiento de experimentación fue correcto, no encontrando valores que contradigan al teorema de Chebyshev (Gorgas et al., 2011).

Los principales factores A, B, C y la interrelación AB son significativas en el sistema ya que todos se encuentran en el lado derecho de la gráfica de Pareto de efectos estandarizados. Del mismo modo esto se puede comprobar en la validación de la hipótesis con la comparación de un nivel de significancia de los valores p (Walpole et al., 2012). Consecuencias teóricas Con un nivel de significancia del 5% y al comparar los valores p (ver Tabla 6), se evidencia que la hipótesis alternativa es válida para A, B, C y AB, lo que demuestra su significancia en todos estos factores. Esto sugiere que elementos principales como A, B, C y la interacción doble AB desempeñan un rol crucial en el incremento de la potencia mecánica. Por lo tanto, podemos afirmar que al configurar los componentes mediante el análisis factorial se mejora la generación de potencia mecánica.

4.3 Aplicaciones prácticas

Mediante el uso del análisis factorial, se optimiza el diseño y la fabricación de la turbina hidráulica de tornillo porque nos permite identificar con mayor precisión los factores más relevantes y sus interacciones. Esto contribuye a generar una mayor cantidad de energía sostenible y potencia mecánica. Gutiérrez y De la Vara (2004) han establecido que los diseños factoriales tienen como propósito analizar cómo afectan varios factores a una o más respuestas cuando hay interés en todos los factores por igual. Buscan encontrar una combinación de niveles de estos factores que optimice el rendimiento del proceso.

Referencias

- Charisiadis, C. (2015). *An Introductory Presentation to the Archimedean Screw as a Low Head Hydropower Generator*. <https://energiazero.org/cartelle/idroelettrico//archimede//Archimedean%20Screw%20Turbine%20book.pdf>
- Dellinger, G., Garambois, P. A., Dellinger, N., Dufresne, M., Terfous, A., Vazquez, J., & Ghenaim, A. (2018). Computational Fluid Dynamics Modeling for the Design of Archimedes Screw Generator. *Renewable Energy*, 118, 847-857. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.093>
- Gorgas, J., Nicolás, G., López, C., & Calvo, J. Z. (2011). *Estadística Básica Para Estudiantes de Ciencias*. Gutierrez, H., & De la Vara, R. (2004). *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill.
- Maldonado, F. M. (2005). *Diseño de Una Turbina de Río Para La Generación de Electricidad En El Distrito de Mazán-Región Loreto*. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/maldonado_qf/maldonado_qf.pdf
- Nishi, Y., Sato, G., Shiohara, D., Inagaki, T., & Kikuchi, N. (2017). Performance Characteristics of Axial Flow Hydraulic Turbine with a Collection Device in Free Surface Flow Field. *Renewable Energy*, 112, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.047>
- Pahl, G., & Beitz, W. (2007). *Engineering Design a Systematic Approach*.
- Pichs-Madruga, R., Edenhofer, O., Sokona, Y., & von Stechow, K. S. P. E. P. M. G. H. S. K. S. S. T. Z. C. (2011). *Informe Especial Sobre Fuentes de Energía Renovables y Mitigación Del Cambio Climático*. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, Keying. (2012). *Probabilidad y Estadística Para Ingeniería y Ciencias*. Prentice Hall.
- YoosefDoost, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes Screw Turbines: A Sustainable Development Solution for Green and Renewable Energy Generation-a Review of Potential and Design Procedures. *Sustainability*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/SU12187352>