

## Aprovechamiento del potencial hidro energético en una mini hidroeléctrica aislada

**Celestino Oro Ortiz**

E-MAIL: oro@uo.edu.cu

Centro de estudio de energía. Universidad de Oriente, Cuba

**Isabel X. García Rodríguez**

E-MAIL: isabelx@uo.edu.cu

Departamento Manufactura y Materiales, Universidad de Oriente, Cuba

**Manuel Cantos Macías**

E-MAIL: manuelcantosmacias@gmail.com

Universidad Tecnológica de Manabí, Ecuador

### RESUMEN

El trabajo presenta un estudio de caso en una instalación hidroeléctrica con problemas de agotamiento de agua. El objetivo fue evaluar el aprovechamiento del potencial hidro energético disponible aplicando una metodología integradora contribuyendo a la mejora de la eficiencia energética y el uso de los recursos hídricos en el proceso de transformación de la energía hidráulica en eléctrica. Los resultados demuestran la existencia de sobreconsumo del agua disponible y sobredimensionamiento de la transmisión mecánica, ambos constituyen problemas de operación. La solución al problema aunque sencilla aportó una metodología que integra conocimientos de dinámica de los fluidos, turbinas hidráulicas, máquinas eléctricas y elementos de máquinas. El problema analizado constituye un ejercicio integrador para la enseñanza de pregrado y postgrado en el área de Hidroenergía y el uso racional de recursos hídricos.

**PALABRAS CLAVES:**

aprovechamiento, aislada, mini hidroeléctrica y potencial

## Exploitation of the hydro-energy potential in an isolated mini-hydroelectric

### ABSTRACT

The paper presents a case study of a hydroelectric facility with water depletion problems. The objective was to evaluate the use of the available hydro-energy potential by applying an integrating methodology contributing to the improvement of energy efficiency and the use of water resources in the process of transforming hydraulic energy into electricity. The results demonstrate the existence of overconsumption of available water and oversizing of the mechanical transmission, both of which constitute operating problems. The solution to the problem, although simple, provided a methodology that integrates knowledge of fluid dynamics, hydraulic turbines, electrical machines and machine elements. The analyzed problem constitutes an integrating exercise for undergraduate and postgraduate teaching in the area of Hydroenergy and the rational use of water resources.

**KEYWORDS:** exploitation, isolated, mini hydroelectric and potential.

## 01 INTRODUCCIÓN

A escala global, la energía hidroeléctrica es la forma de energía renovable más utilizada, con más de 1,2 Tera vatios (TW) de capacidad instalada. Sin embargo, la potencia instalada a nivel mundial de las pequeñas hidroeléctricas (hasta 10 MW) se estima en 78 gigavatios (GW) en 2016. Las minicentrales representan aproximadamente el 1,9% de la capacidad total de energía del planeta (Cayetano et al. 2017).

En las mini y micro centrales hidroeléctricas autónomas ubicadas en regiones montañosas de Cuba, los consumidores no aprovechan todo el potencial energético disponible en el recurso hídrico producto de la mala calidad de la energía generada en estas centrales según las normas técnicas vigentes (Peña y Fariñas, 2020).

Las mini y micro centrales hidroeléctricas de Cuba a menudo presentan problemas de operación, las principales causas son: pobre control de la frecuencia y la potencia, así como deficiente distribución de la demanda (HIDROENERGIA, 2018). Los factores de diseño también implican problemas en la operación como: excesiva relación entre la longitud de la tubería y la carga hidráulica (L/H), momento de inercia ( $GD^2/4g$ ) inadecuado, entre otros. Estos aspectos propician baja calidad de la energía y una baja eficiencia energética, que trae como consecuencia que los hidro grupos operen fuera de su punto de operación óptimo (Peña y Fariñas, 2020).

En este artículo se hace un estudio de caso de una mini hidroeléctrica aislada, que presenta problemas con la disponibilidad del agua para la generación (el agua se agota rápidamente), la misma presta servicio a una comunidad rural, para ello cuenta con una turbina de fabricación cubana 650X65 acoplada a un generador sincrónico de 1800 rpm.

Entre las barreras que actualmente tiene el desarrollo de la hidroenergía está la disminución de los recursos hídricos, por efectos del cambio climático. Esta futura disminución de las aportaciones hidrológicas perturbará sobre todo a las centrales hidroeléctricas de tipo fluyente, sin capacidad de regulación, traduciéndose en una disminución de horas equivalentes de funcionamiento (Cayetano, 2017).

Dos cuestiones resaltan la importancia del estudio, el uso racional del agua y la eficiencia energética de la instalación. Operar la turbina fuera de los parámetros óptimos de diseño no solo repercute en la calidad de la energía eléctrica generada, conduce entre otros problemas a un inadecuado consumo de agua.

Acerca de los métodos para lograr los parámetros óptimos en las mini hidroeléctricas aisladas se propone el almacenamiento de energía (Yadav y Mathew, 2014), empleo de sistemas híbridos (Khodadoost, 2017), regulando el caudal de agua de entrada a la turbina y la carga (Dreidy et al. 2017). Sin embargo, el proyecto y la explotación de las pequeñas centrales hidroeléctricas es el resultado de la aplicación de diferentes ciencias, resulta imposible tratar de resolverlos mediante el análisis fraccionado (Sharma and Singh, 2013).

La investigación bibliográfica realizada demuestra que el tema del aprovechamiento óptimo del potencial hidro energético depende en gran medida de la regulación de los parámetros de trabajo, lo cual resulta complejo para mini hidroeléctricas aisladas, no obstante, no existen evidencias del comportamiento de los parámetros de operación de las turbinas 650X65 en relación con el potencial hidro energético disponible para lograr su aprovechamiento eficiente.

El objetivo del trabajo fue evaluar el aprovechamiento del potencial hidro energético disponible aplicando una metodología integradora que contribuye a la mejora de la eficiencia energética en el proceso de transformación de la energía hidráulica en eléctrica.

## 02 PROCEDIMIENTO

El procedimiento empleado consistió en calcular los parámetros de diseño del equipamiento teniendo en cuenta el salto hidráulico disponible, luego se comparan los parámetros óptimos de trabajo de la turbina 650x65 (empleada en la mini hidroeléctrica), evaluando las posibles causas del agotamiento rápido del agua. Para lograr el objetivo propuesto se aplicaron los métodos de investigación y materiales siguientes:

### INVESTIGACIÓN DE CAMPO

- Analizador de vibraciones VibXpert II
- Cinta métrica
- Revisión documental
- Artículos de revistas
- Libros

### MÉTODO MATEMÁTICO

Para determinar los parámetros de diseño de la turbina se aplicaron las ecuaciones fundamentales de hidrodinámica y el criterio de semejanza (Mataix, 1989):

La velocidad del chorro de agua que sale del inyector de la turbina, se determina (1)

$$V = \varphi \sqrt{2gH} \quad (1)$$

Donde:

$\varphi$ -Coeficiente de la tobera (0,97-0,99)

$V$ -Velocidad absoluta del chorro (m/s)

$g$ - Aceleración de la gravedad

$H$ - Altura hidráulica neta (m)

El caudal volumétrico de agua, se determina (2)

$$Q = V \cdot A_{ch} \quad (2)$$

Donde:

$Q$ -Caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/s)

$A_{ch}$ -Área del chorro (m<sup>2</sup>)

El diámetro del chorro, se determina (3)

$$d_{ch} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot V}} \quad (3)$$

La velocidad específica de la turbina, se determina (4)

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (4)$$

Donde

$n_s$ -Velocidad especifica

$P$ -potencia de salida en kW

$n$ -Velocidad de rotación de la turbina rpm

$H$ -carga hidráulica en m

El torque desarrollado por la turbina, se determina (5)

$$T = Q \cdot \rho \cdot g \cdot r (V - U)(1 - \cos \beta) \quad (5)$$

Donde:

$T$ -Torque que desarrolla la turbina

$V$ -velocidad absoluta del chorro (m/s)

$U$ -Velocidad tangencial (m/s)

$Q$ - Caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/s)

$\rho$  -densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

$r$ - radio del rodete (m)

$g$ - Constante de gravitación (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$\beta$ - Angulo de incidencia del chorro en el alabe

La potencia de salida, se determina (6)

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_0 \quad (6)$$

Donde

$P$ -Potencia de salida (W)

$Q$ - Caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/s)

$\rho$  -densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>)

$g$ - Constante de gravitación (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$H$ - Altura hidráulica neta (m)

$\eta_0$ - Eficiencia global

La Ley de la carga hidráulica neta, según (7)

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{H_1}{H_2} \quad (7)$$

Donde

$n_1$ -Numero de revoluciones de la turbina en el estado 1

$n_2$ - Numero de revoluciones de la turbina en el estado 2

$H_1$ -Carga hidráulica neta en el estado 1

$H_2$ -Carga hidráulica neta en el estado 2

La Ley del Caudal volumétrico (8)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt{H_1}}{\sqrt{H_2}} \quad (8)$$

Donde

$Q_1$ - Caudal volumétrico en el estado 1

$Q_2$ -Caudal volumétrico en el estado 2

La Ley de la Potencia en el eje de la turbina (9)

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^3 \quad (9)$$

Donde

$P$ - Potencia de salida para el estado 1 y 2

En (7)-(8) y (9) los subíndices 1 y 2 identificados como estado 1 y 2, corresponden en el primer caso a las revoluciones por minuto óptimas tomadas del catálogo emitido por el fabricante de la turbina y el segundo caso a las obtenidas en la investigación de campo mediante el analizador de vibraciones.

Se verifica la relación de transmisión según (10)

$$i_t = \frac{n_T}{n_G} = \frac{D_G}{D_T} \quad (10)$$

Donde

$i_t$ -Relación de transmisión

$n_T$ -Número de revoluciones de la turbina

$n_G$ -Número de revoluciones del generador

$D_T$ -Diámetro de la Polea de la turbina

$D_G$ -Diámetro de la Polea del generador

El diámetro de las poleas de la turbina y del generador eléctrico se obtiene en la investigación de campo empleando la cinta métrica.

## 03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA TURBINA

El resultado de aplicar (1)-(2)-(3) y (4) teniendo en cuenta una carga hidráulica neta de 100 metros:

- Velocidad del chorro 42,96 m/s
- Diámetro del chorro es 0,0646 m
- Caudal volumétrico 142,6 L<sup>3</sup>/s
- Velocidad específica 20,1 rpm

Mediante la revisión documental se obtiene la característica de trabajo de la turbina de fabricación cubana 650X65, la tabla 1 muestra los parámetros óptimos para un salto hidráulico de 100 m dada por Madruga et al. (1986).

Tabla 1. Parámetros óptimos de la turbina 650X65.

Salto(m)	Caudal (L/s)	Potencia (kW)	Velocidad de rotación (r.p.m)
100	141,2	117,74	586

### PARÁMETROS EN OPERACIÓN

Empleando el analizador de vibraciones VibXpert II, se obtuvo el diagrama que muestra el espectro de velocidad de vibración de la turbina, en la figura 1, se observa que la turbina gira a una velocidad angular de 650 r.p.m

Aplicando (5)-(6)-(7)-(8) y (9) se obtiene:

- Incremento del Caudal 1,11 veces.
- Incremento de la potencia en el eje 1,37 veces.

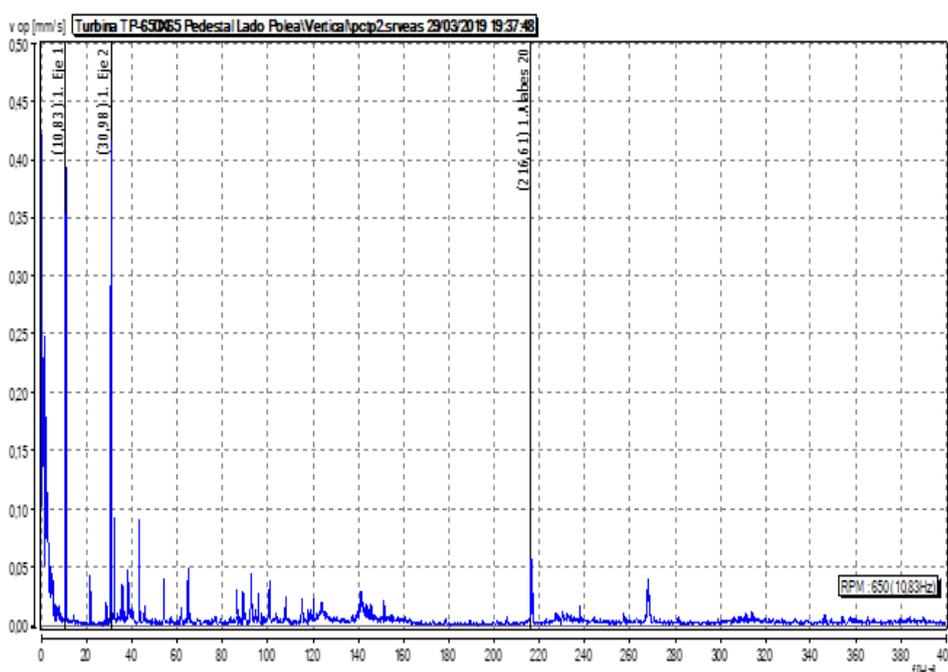


Figura 1. Espectro de velocidad de vibración de la turbina

### PARÁMETROS DE LA TRANSMISIÓN

Fueron medidos con la cinta métrica el diámetro de la polea de la turbina y del generador eléctrico, el resultado se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Diámetro de las poleas de la transmisión

Polea de la turbina (mm)	Polea del generador (mm)
915	320

Empleando (8), se obtiene un valor de relación de transmisión de 0,35.

### DISCUSIÓN

El valor de la velocidad específica obtenido (20,1 rpm) corresponde a una turbina Pelton de un inyector. La velocidad específica para las Turbinas Pelton de un inyector se encuentra en el rango 5-30 rpm (Fernández, 2017). La Turbina 650X65 es una turbina Pelton de un inyector, los resultados demuestran que es la apropiada para la instalación objeto de estudio. Descartándose la posibilidad

de que una inadecuada selección de la máquina incida en el agotamiento del agua que se produce actualmente en la mini hidroeléctrica.

La turbina a máxima carga gira a una velocidad angular de 650 r.p.m. La turbina 650X65 es de fabricación cubana y su documentación técnica data de la década de los 80, Madrugá et al. (1986) muestran que, una turbina 650x65 con un salto de 100 m, un caudal de 141,2 L/s y una potencia de 117,74 kW tiene una velocidad óptima de 586 r.p.m. Las turbinas se diseñan para un valor de carga y gasto predeterminados que definen su zona de operación por tanto cualquier variación de estos parámetros se compensa abriendo o cerrando los dispositivos de control del gasto (Peña y Fariñas 2020). Al respecto Fernández (2017) plantea, cuando el salto neto (carga hidráulica neta) es constante, el caudal es rigurosamente independiente de la velocidad angular, solamente depende del grado apertura del inyector. Este análisis evidencia problemas de operación, siendo el grado de apertura del inyector, la causa de sobreconsumo de agua en la instalación.

La relación de transmisión es de 0,35. Según el criterio de Coz et al. (1996) ese valor es elevado, los autores plantean que en las mini hidroeléctricas aisladas cuando se usan generadores asincrónicos la relación de transmisión no debe ser mayor de 0,25. Acerca del funcionamiento de los generadores asincrónicos Eraso y Escobar (2018) explican que, a mayor velocidad del rotor, mayor es la potencia que puede generar la máquina. Otro punto de vista es el de Fernández (2017) que plantea, el comportamiento del torque con relación a la velocidad de rotación de la turbina es parabólico, desde el arranque hasta cierto valor óptimo (máximo valor de velocidad), el torque se incrementa, posteriormente un incremento de velocidad no garantiza un incremento del torque. Estas consideraciones demuestran en primer lugar que una relación de transmisión de 0,25 garantizará mayor potencia eléctrica en el generador y en segundo lugar que mantener la turbina trabajando a 650 rpm, no garantiza un incremento de potencia en el generador eléctrico.

A los efectos del estudio se identifican como potencial hidro energético: la carga hidráulica neta, el caudal volumétrico y la potencia de salida. La elección de la tecnología de la turbina está dictada por los parámetros hidráulicos y topográficos y, por lo tanto, es altamente inflexible (Peña y Fariñas, 2020). Independientemente de la necesidad de actualizar los estudios hidrológicos del sitio en que se encuentra ubicada la turbina objeto de estudio debido a los posibles efectos del cambio climático, el estudio realizado demuestra que en la instalación objeto de estudio existen problemas de operación (grado de apertura del inyector) que incide en el sobreconsumo del agua disponible en las condiciones actuales y el sobredimensionamiento de la transmisión mecánica que incide en la potencia entregada por el generador eléctrico.

Muchas mini centrales hidroeléctricas en Cuba prestan servicio eléctrico a zonas rurales, algunas aisladas y sin embalse regulador, sin embargo la mayor cantidad de investigaciones existentes en esta área del conocimiento se enmarca en el control automático de los parámetros de operación, sin embargo, los factores que inciden en el aprovechamiento eficiente del potencial hidroenergético tienen un carácter multifactorial.

La investigación realizada aporta una metodología interdisciplinaria para evaluar el aprovechamiento del potencial hidroenergético en una instalación aislada y un ejercicio integrador para la enseñanza de pregrado y postgrado en el área de Hidroenergía, ambas constituyen soluciones interesantes ante los desafíos que se presentan en el área de la energía renovable y el uso racional de los recursos hídricos.

## 04 CONCLUSIONES

Se evidencia un sobreconsumo de agua debido a problemas de operación relacionados con el grado de apertura del inyector.

Se demostró la existencia de sobredimensionamiento en la transmisión mecánica.

Se presenta la solución de un problema integrador para la enseñanza de pregrado o postgrado en el área del conocimiento en Hidroenergía.

## 04 REFERENCIAS

- Cayetano E., Marín García R. y Aparicio A.** (2017). "El surgimiento de la energía minihidráulica en España y su situación actual. Revista de Geografía Norte Grande, ISSN 0718-3402, No 67: 115-143. España
- Peña L. y Fariñas E.** (2020). "Mejoras en la eficiencia energética de las mini hidroeléctricas aisladas mediante la regulación combinada flujo-carga lastre". Revista Ingeniería Energética, ISSN 1815-5901, vol 21. Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba.
- HIDROENERGÍA** 2018. "Estado de las Instalaciones actualizado 30-12-2018". Reporte Interno. Empresa de Hidroenergía: Unión Eléctrica. Cuba. Disponible en: <https://webstore.iea.org/download/tableofcontents/1173>
- Yadav R.K. and Mathew L.** (2014). "Load Frequency control of an Isolated Small Hydro Power Plant with Reduction in Dump Load Rating By Using Variable Structure Control". International Journal of Engineering Science Invention. ISSN 2319-6734, V3, p.8-15.EU.
- Khodadoost A., Karami H., Gharehpetian G. and Hejazi M.** (2017). "Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids". Renewable and Sustainable Energy Reviews. ISSN 1364-0321 v.69, p.9-18. Teheran, Iran. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.166>
- Dreidy M., Mokhlis H. and Mekhilef S.** (2017). "Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, ISSN 1364-0321 V.69,p.144-155.Malaysia. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.170>
- Sharma H. and Singh J.** (2013). "Run off River Plant: Status and Prospects". International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). ISSN 2278-3075, Volume 3, p. 210-213. Issue-2, Canada.
- Mataix C.** (1989). "Mecánica de los fluidos y maquinas hidráulicas". Segunda edición. Ediciones del Castillo S.A., p.pp.355-486. México. ISBN:84-219-0175-3
- Madruza E., Fernández A. y Ledon N.** (1986). "Turbinas de fabricación cubanas". Revista Energía., No 4, p. 2-4. Cuba. ISSN 0138-8266
- Fernández Diez P.** (2017). "Turbinas Hidráulicas". Biblioteca sobre ingeniería energética. Universidad de Cantabria, p.pp35-52.España [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf)

- Peña L., Fariñas E., Domínguez H. y Fon J.** (2020). "Ajuste del punto de operación de micro-turbinas hidráulicas a través del método de regulación de velocidad combinada". Revista Tecnología Química, vol.40, No.1, p. (152-168).Cuba. ISBN: 2224-6585
- Coz F., Sánchez T., Vianni B., Segura J., Rodríguez L., Miranda H., Castromonte E., Guerra J., Quiroz L., Gaitan J., Moreno L. y Muñoz J.**(1996)." Manual de mini y microcentrales Hidráulicas: una guía para el desarrollo de proyectos". 1ra edición. Intermediate Technology Development Group, ITDG, ISBN:1853392782; p.pp131-177.Peru
- Eraso F. y Escobar E.** (2018). "Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres-Nariño". Revista Científica, ISSN 2344-8350, vol. 1 (31), pp.19-31.Bogota, Colombia. <https://doi.org/10.14483/23448350.12304>

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Celestino Oro Ortiz** <https://orcid.org/0000-0002-5482-5070>

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

**Isabel Xiomara García Rodríguez** <https://orcid.org/0000-0003-00080-2612>

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final.

**Manuel Cantos Macías** <https://orcid.org/0000-0001-7589-0210>

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final.