

Potencial hidroeléctrico en cuencas hidrográficas de montaña sujetas a regulaciones ambientales cubanas: apuntes para su aprovechamiento

Hydroelectric potential in mountain hydrographic basins subject to Cuban environmental regulations: Notes for its use.

Liber Galbán-Rodríguez^{1*} , Paula Sánchez-López¹ , Ángel Luis Brito-Souvanell²  & Ariadna Herrera-Hernández¹ 

liberg@uo.edu.cu*, paulasanchez@uo.edu.cu, albrito@uo.edu.cu, ariadna.herrera@uo.edu.cu

¹ Universidad de Oriente, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Hidráulica Santiago de Cuba, Cuba 

² Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Centro de Estudios de Eficiencia Energética.

Santiago de Cuba, Cuba 

Manuscrito recibido: 20 diciembre 2022;

Recibido en formato revisado: 12 junio 2023;

Aceptado: 12 junio 2023

Resumen

Beneficiar y mejorar el servicio eléctrico a los moradores en zonas intrincadas y montañosas expuestas a regulaciones ambientales es una tarea compleja debido al cuidado necesario que se debe tener en la reducción al mínimo posible de los impactos ambientales que pueden generar los proyectos hidroeléctricos. La presente investigación como objetivo fundamental determinar y caracterizar el potencial hidroeléctrico de la cuenca alta del río "La Magdalena" del Municipio Guamá, en la provincia de Santiago de Cuba, ubicada en una zona ambientalmente protegida por el Estado cubano. Para ello se diseñó un procedimiento básico que tuvo como resultados fundamentales, la caracterización general de la Cuenca, la determinación del caudal ecológico y caudal óptimo aprovechable; así como el potencial hidroeléctrico de la cuenca y las recomendaciones en cuanto al tipo de turbina hidráulica a instalar en la zona para garantizar la electrificación.

Palabras clave: potencial hidroeléctrico; cuencas hidrográficas de montaña; regulaciones ambientales; aprovechamiento; La Magdalena.

Abstract

Benefiting and improving the electrical service to residents in intricate and mountainous areas exposed to environmental regulations is a complex task due to the necessary care that must be taken in minimizing the environmental impacts that hydroelectric projects can generate. The main objective of this research is to determine and characterize the hydroelectric potential of the upper basin of the "La Magdalena" river in the Guamá Municipality, in the province of Santiago de Cuba, located in an area environmentally protected by the Cuban State. For this, a basic procedure was designed that had as fundamental results, the general characterization of the Basin, the determination of the ecological flow and optimal usable flow; as well as the hydroelectric potential of the basin and the recommendations regarding the type of hydraulic turbine to be installed in the area to guarantee electrification.

Keywords: hydroelectric potential; mountain hydrographic basins; environmental regulations; exploitation; La Magdalena.

How to cite this article:

Galbán-Rodríguez, L., Sánchez-López, P., Brito-Souvanell, L.A. y Herrera-Hernández, A., (2023). Potencial hidroeléctrico en cuencas hidrográficas de montaña sujetas a regulaciones ambientales cubanas: apuntes para su aprovechamiento. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, 53, pp. 38 - 48.

DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.106449>.

1. Introducción

Hoy energía hidroeléctrica proporciona casi un quinto de la electricidad de todo el mundo, China, Canadá, Brasil, Estados Unidos y Rusia fueron los cinco mayores productores de este tipo de energía en 2020 (IRENA, 2021) (Tabla 1) (Fig. 1).

Las centrales hidroeléctricas generalmente se ubican en regiones donde existe una combinación adecuada de lluvias y desniveles geológicos favorables para la construcción de represas. La energía hidráulica se obtiene a partir de la energía potencial y cinética de las masas de aguas que transportan los ríos provenientes de la lluvia y del deshielo. En su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar el agua por una turbina hidráulica

la cual transmite la energía a un alternador que la convierte en energía eléctrica (Fig. 2). Otro más consiste en hacer en el río una presa pequeña y desviar parte del caudal por un canal con menor pendiente que el río, de modo que unos kilómetros más adelante habrán ganado una cierta diferencia de nivel con el cauce y se hace caer el agua a él por una tubería con una turbina especial. Esta forma de energía es clave en el desarrollo de forma sustentable y ecológica de satisfacer la creciente demanda de energía en el mundo posindustrial. La energía hidráulica y otras formas de electricidad renovables se contemplan cada vez más como una opción necesaria en el mundo futuro (Galileo.edu, 2017).

Tabla 1.

Países mayores productores de hidroenergía en 2020.

País	Producción hidroeléctrica anual (TWH)	Capacidad instalada (GW)	Factor de capacidad	% de la producción mundial	% en generación de electricidad doméstica
China	1232	352	0.37	28.5%	17.2%
Brasil	389	105	0.56	9.0%	64.7%
Canadá	386	81	0.59	8.9%	59.0%
Estados Unidos	317	103	0.42	7.3%	7.1%
Rusia	193	91	0.42	4.5%	17.3%
India	151	49	0.43	3.5%	9.6%
Noruega	140	33	0.49	3.2%	95.0%
Japón	88	50	0.37	2.0%	8.4%
Vietnam	84	18	0.67	1.9%	34.9%
Francia	71	26	0.46	1.6%	12.1%

Fuente: IRENA, 2021.

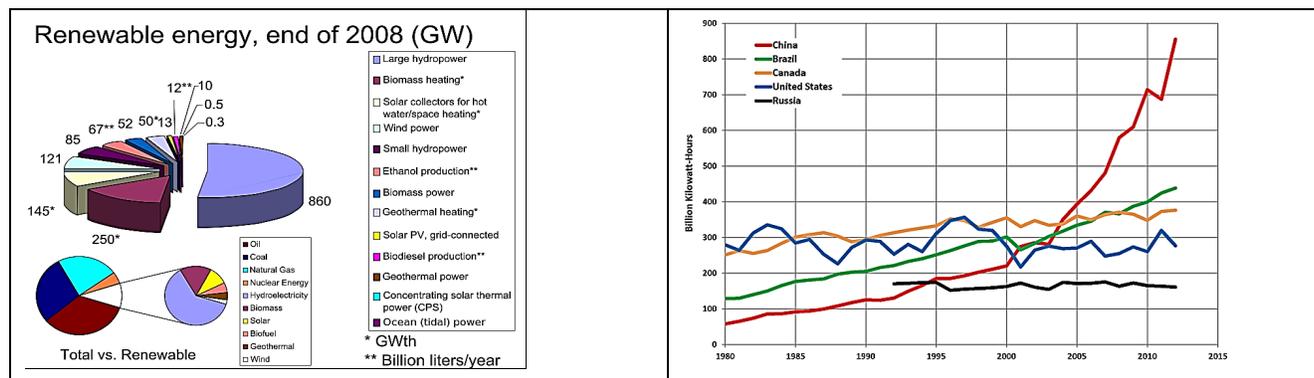


Figura 1. Distribución mundial de la producción de energías renovables (arriba). Tendencia al crecimiento de la producción de hidroenergía en los países mayores productores (debajo).

Fuente: REN21, 2016.

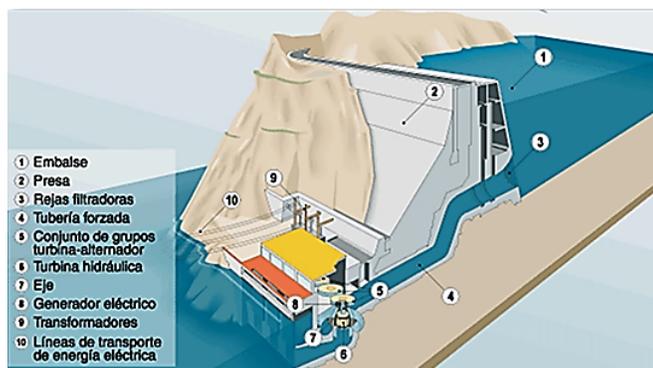


Figura 2. Esquema clásico de una central hidroeléctrica aguas debajo de una represa.

Fuente: Sánchez, 2019

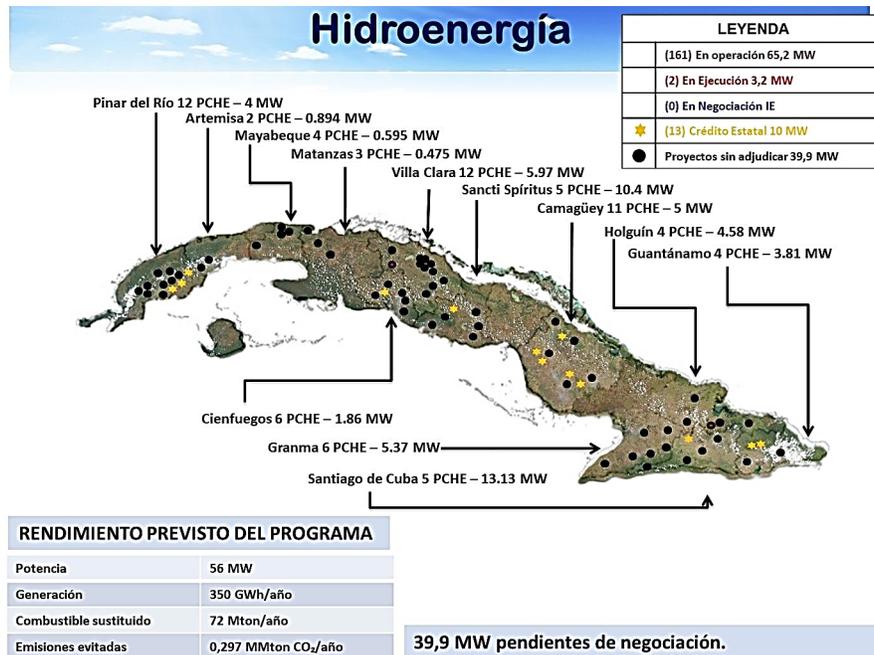


Figura 3. Distribución por provincias de la producción hidroeléctrica en Cuba. Fuente: MINEM, 2022.

Cuba, antes de la década de 1980, contaba con un pequeño número de instalaciones, entre ellas la hidroeléctrica Hanabanilla, la del Guaso y la de San Blas, y algunas mini hidroeléctricas. Conforme al desarrollo de la voluntad hidráulica, dirigida al máximo aprovechamiento, al acceso al recurso del agua y protección de la población, comenzó la construcción de hidroeléctricas, fundamentalmente mini y micro hidroeléctricas, destinadas a suministrar esta fuente de energía a pobladores del macizo montañoso. Existen actualmente en el país 162 centrales hidroeléctricas con una Potencia total instalada de 71.9 MW que generaron en el 2017 83 GWh, de ellas 34 están conectadas al Sistema energético Nacional (SEN), 128 brindan servicio de forma aislada a 8 486 viviendas, así como a 416 objetivos económicos y sociales. La de mayor potencia es la Central Hidroeléctrica de Hanabanilla con una Potencia instalada de 43 MW. Se estima que el potencial técnico identificado con las tecnologías actuales es de 135 MW de ellos 13.7 MW en transvasés (MINEM, 2022) (Fig. 3).

Cuba cuenta con una estructura productiva dentro de la Industria Sideromecánica cubana, la Fábrica Aguilar Noriega (Planta Mecánica) de Santa Clara, especializada en la fabricación, reparación y ensamble de turbinas hidráulicas, reguladores de velocidad, compuertas mecánicas y conformación de tuberías, entre otras. Por otro lado, se lleva a cabo un ambicioso programa de sustitución paulatina de la matriz energética de fueloil a otras formas de producción de energía eléctrica que emplean energías renovables. Este programa incluye la construcción de nuevas presas e hidroacumuladoras, entre otros objetivos. En el país se aplican variantes para la modernización de las instalaciones existentes, que en su gran mayoría tienen más de 20 años de explotación y cuentan con tecnología obsoleta (MINEM,

2022).

En la instalación de las mini hidroeléctricas es necesario conocer el potencial hidroeléctrico de la cuenca, en la cual se va a ubicar, por lo que resulta indispensable hacer un estudio detallado de este parámetro, por el empeño en el aprovechamiento de las energías renovables. En este caso, la energía hidroeléctrica, ya sea para el cuidado del medio ambiente, o para dar respuesta a problemáticas como la de cubrir la demanda de energía eléctrica en zonas que no estén conectadas al sistema eléctrico nacional, y además su viabilidad por el bajo costo económico que presupone la explotación de estas centrales (MINEM, 2022). Este estudio se convierte en una situación compleja cuando los aprovechamientos hidroeléctricos que se planifican están ubicados en cuencas hidrográficas de montaña sujetas a regulaciones ambientales, especialmente por los posteriores impactos al medioambiente. En este sentido se pueden generar los siguientes impactos (Méndez, 2012):

- Inundación de grandes áreas de ecosistemas, generalmente fértiles y que en zonas tropicales suelen ser muy valiosas.
- Extinción de la flora endémica y la fauna autóctona, en la mayoría de los casos.
- Desplazamientos de poblaciones y asentamientos humanos.
- En los embalses, que se crean, se registran incrementos de enfermedades parasitarias.
- Modificación del ciclo o flujo hidrológico de la zona.
- Cambio significativo de la calidad del agua, ya que esta se contamina con elementos biógenos, herbicidas y pesticidas provenientes de cultivos y explotación agropecuaria.

- Alteraciones en las migraciones de los peces cuando se interrumpen los cauces normales de los ríos.
- Erosión en las riberas de los embalses, según las condiciones geológicas locales, fundamentalmente las riberas escarpadas.
- Cambios en las condiciones de vida de los organismos que habitan los ríos y embalses.
- Disminución en el aporte de sedimentos, nutrientes y agua a los estuarios y al mar. Se necesitan caudales ecológicos para mantener la vida aguas abajo del embalse.
- Se generan ascensos del nivel freático, que afloran en lugares no deseados.

En este caso se hace necesario acudir a estudios hidrológicos detallados que tienen en cuenta las consideraciones ecológicas y paisajísticas y en lo sucesivo otras consideraciones internacionales para el aprovechamiento óptimo de los caudales, y cálculos hidroenergéticos. En la presente investigación se expone un procedimiento general para la determinación del potencial hidroeléctrico de la cuenca hidrográfica del río La Magdalena, ubicada en el Gran Parque Nacional Sierra Maestra, que hoy constituye una Región Especial de Desarrollo Sostenible que contiene a los parques nacionales Desembarco del Granma, Turquino y la Bayamesa, además de varias áreas protegidas de significación local (Decreto Ley N° 331, 2015).

2. Método

Para la generación de hidroenergía en la cuenca alta del río La Magdalena se deben realizar los siguientes pasos:

1. Caracterización general de la cuenca de estudio y selección de las coordenadas de cierre.
2. Actualización de la demanda eléctrica actual y futura de la comunidad.
3. Determinación del caudal óptimo aprovechable para la producción de hidroenergía.
4. Selección del tipo de cierre según las características topográficas y caudales determinados.
5. Selección de la máquina eléctrica que producirá la energía.
6. Proyección de los pasos básicos para la construcción del cierre y la estación de producción de hidroenergía.

En este caso el estudio hidrológico previo tiene tres etapas:

1. Determinación de los caudales naturales en el cierre seleccionado para la construcción de la hidroeléctrica.
2. Determinación de los caudales ecológicos del río
3. Determinación del caudal óptimo aprovechable para la producción de hidroenergía.

Es preciso acotar que, para determinar el caudal óptimo aprovechable para la producción de hidroenergía, se realiza un estudio hidrológico empleando distintos métodos directos e indirectos, entre estos se pueden mencionar los siguientes:

- Método racional

- Método de las curvas numéricas.
- III Variante de José Luis Batista.
- Fórmula Clásica.
- Fórmulas Hidrometeorológicas
- Entre otros.

En función de lograr una mayor precisión se recomienda escoger una media de caudal de escurrimiento entre los métodos aplicados y su rectificación con métodos directos.

El concepto de caudal ambiental o caudal ecológico se refiere a la idea del volumen y calidad de agua que se debe mantener en un río para conservar su funcionamiento ecológico y asegurar así el ciclo de vida de los organismos que lo habitan. Está relacionado con conservar, adecuar o restaurar el funcionamiento ecológico y los servicios ambientales que proveen los sistemas naturales (calidad de agua, amortiguación de las inundaciones y sequías, protección y conservación de la biodiversidad, estética, circulación de elementos químicos naturales, entre otros) (Salas y Mendoza, 2021).

El caudal ecológico tiene que mantener un adecuado hábitat, una temperatura, un oxígeno disuelto y unas características químicas para los organismos acuáticos, agua bebible para los animales terrestres y la humedad de los suelos para plantas. La determinación del caudal ecológico se enfoca en la época seca y la época húmeda, ya que se considera un superávit de agua al ecosistema en la época de lluvias. Se deben estimar los caudales promedios en la época seca y época de humedad en la zona de estudio que asemejen las condiciones iniciales de la cuenca antes de ser manipulada por represas y canales de derivación.

Este caudal ecológico se puede calcular a través del método de “Modelamiento hidrológico distribuido” (Mendoza *et al*, 2002), el cual toma en cuenta distribución de temperatura y precipitación. Puede predecir impactos de cambio climático y cambios en el caudal medio anual del río; además de poder ser calibrado con valores de la cuenca y sub-cuencas (Fig. 4).

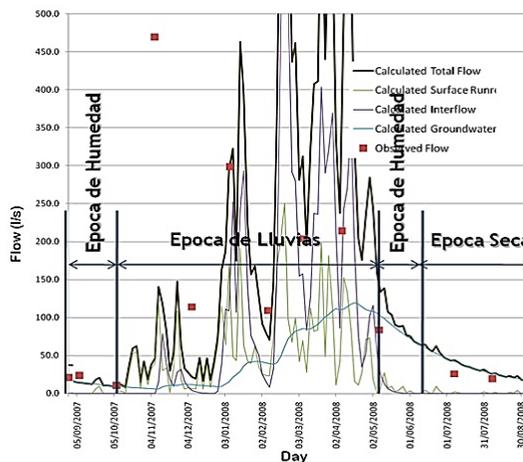


Figura 4. Ejemplo que se muestra en el método de “Modelamiento hidrológico distribuido” para determinación de caudales en la época húmeda y época seca con la curva de recesión luego del de las lluvias.

Fuente: <http://gidahatari.com/ih-es/caudal-ecologico>

El método propone de forma general que el cálculo del caudal ecológico se puede realizar considerando los siguientes elementos:

- Un cálculo más preciso y más complejo. Toma en cuenta la distribución de la temperatura y la precipitación. Puede predecir impactos de cambio climático y puede ser calibrado con valores de la cuenca y sub-cuencas.
- Modelo hidrológico total (“lump”): Es un cálculo más sencillo y rápido, sólo puede ser calibrado sobre una cuenca. No toma en cuenta las distribuciones de temperatura y precipitación.

Otro enfoque define el caudal ecológico y sus metodologías para evaluarlo. Los principales cálculos a realizar son (según la numeración del documento) (Cavero, 2013):

- Para cursos de agua con caudales medios anuales menores a 20 m³/s, el caudal ecológico será como mínimo el 10 % del caudal medio mensual para la época de avenida, y para la época de estiaje será de un 15 % del caudal medio mensual.
- Para cursos de agua con caudales medios anuales iguales o mayores a 20 m³/s y menores o iguales a 50 m³/s, el caudal ecológico se determinará como un porcentaje del caudal medio mensual siendo este el 10 % para la época de avenidas, y para la época de estiaje será de un 12 % del caudal medio mensual.
- Para cursos de agua con caudales medios anuales mayores a 50 m³/s, el caudal ecológico corresponderá al 10 % del caudal medio mensual para todos los meses del año.

Una vez seleccionado el caudal ecológico y el caudal medio de la cuenca, los autores proponen proceder a

determinar el caudal óptimo de explotación hidroenergética de la siguiente manera:

$$Q_{op} = Q_m - Q_{ec} \quad (1)$$

Donde:

Q_{op} ---Caudal óptimo aprovechable

Q_m ---Caudal medio de la cuenca

Q_{ec} ---Caudal ecológico

3. Resultados y discusión

El río La Magdalena nace en la Sierra Maestra a 880 msnm, desemboca en el mar Caribe donde se ubica la comunidad del mismo nombre (Fig. 5), en el municipio Guamá que pertenece a la provincia Santiago de Cuba.

3.1 Caracterización general de la cuenca hidrográfica del río “La Magdalena” y selección de las coordenadas de cierre.

El clima del territorio es tropical, aunque al estar situado al sur de la Sierra Maestra, predominan las condiciones de sequedad. La más extensa serranía cubana sirve de barrera natural a los vientos alisios que vienen cargados de humedad desde el Océano Atlántico. Al encontrarse con estas montañas, se ven obligados a elevarse, por tanto, se condensan y se precipitan en su ladera norte, y al descender secos por la ladera sur, lugar donde se encuentra la localidad La Magdalena, lo propician mayores condiciones de sequedad. También la ladera sur de la Sierra Maestra está todo el año frente al Sol, lo que acentúa esas condiciones de escasa humedad. La temperatura promedio es de 26 grados Celsius, siendo ligeramente más bajas en las zonas altas (Fig. 6).



Figura 5. Mapa de ubicación geográfica de la comunidad La Magdalena en el municipio Guamá.

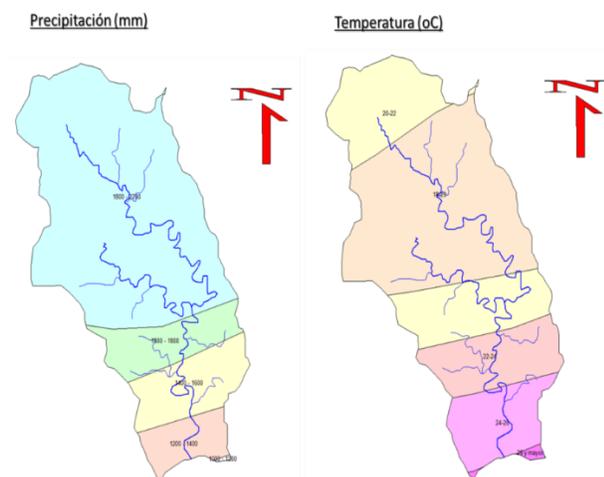


Figura 6. Imágenes del mapa de precipitaciones y temperatura de la cuenca hidrográfica del río La Magdalena en el municipio Guamá. (Geocuba. 2010)

El río La Magdalena es uno de los ríos más importantes del municipio Guamá. La cuenca hidrográfica tiene un área de 138 km², corre en dirección norte-sur y tiene 15 afluentes con pendientes abruptas que forman cañones y estas se suavizan hacia su desembocadura, la pendiente media de la cuenca es de 184 % y la altura media de la cuenca es de 144 m. El río tiene una longitud de 27 km, su pendiente media es de 9.9 % y tiene una densidad de drenaje de 1.06 Km/Km². Sus aguas son aprovechadas para el abasto a los pobladores dispersos por la zona. Las redes hidrográficas son pequeñas y en ocasiones aparecen diminutas micro cuencas pertenecientes a afluentes intermitentes. Por su longitud clasifica como un río corto y de escaso caudal al encontrarse en una zona en la que predominan condiciones climáticas de sequía. En la época de lluvia, sobre todo en temporada ciclónica, el río crece llegando a alcanzar 5 metros de altura de la columna de agua por encima de su nivel de aguas normales, sobre todo en su zona baja próxima a la

desembocadura, y puede arrastrar con todo lo que encuentre a su paso, incomunicando diversas comunidades aguas arriba en la cuenca hidrográfica (Fig. 7) (Durán, 2018).

La población en la cuenca asciende aproximadamente a 1.419 habitantes en 2020, distribuidos en tres asentamientos rurales. La comunidad Magdalena fue creada entre los años de 1992 y 1993. La economía de la localidad se basa fundamentalmente en las labores agropecuarias, como la cría de ganado vacuno, los cultivos varios y la explotación forestal. Este territorio tiene un relieve montañoso, con un rango de alturas que oscilan entre los 75 m y 220 m. El elevado grado de disección vertical y horizontal del territorio y el predominio de superficies con fuertes pendientes, influyen decisivamente en las posibilidades de mecanización, los costos de producción, las condiciones de trabajo, las limitaciones de las maquinarias agrícolas, los sistemas de irrigación y los costos de explotación. (Fig. 7).

3.2 Demanda actual de energía eléctrica en el poblado "La Magdalena"

La demanda de energía eléctrica del poblado la Magdalena tiene una variación a lo largo del día. Esta variación es función de muchos factores, entre los que destacan: tipos de industrias existentes en la zona y turnos que realizan en su producción, climatologías extremas de frío o calor, tipo de electrodomésticos que se utilizan más frecuentemente, tipo de calentador de agua que hay instalado en los hogares, la estación del año y la hora del día en que se considera la demanda.

La generación de energía eléctrica debe seguir la curva de demanda y, a medida que aumenta la potencia demandada se debe incrementar la potencia suministrada. Esto conlleva el tener que iniciar la generación con unidades adicionales, ubicadas en la misma central o en centrales reservadas para estos periodos. (MINEM, 2021).

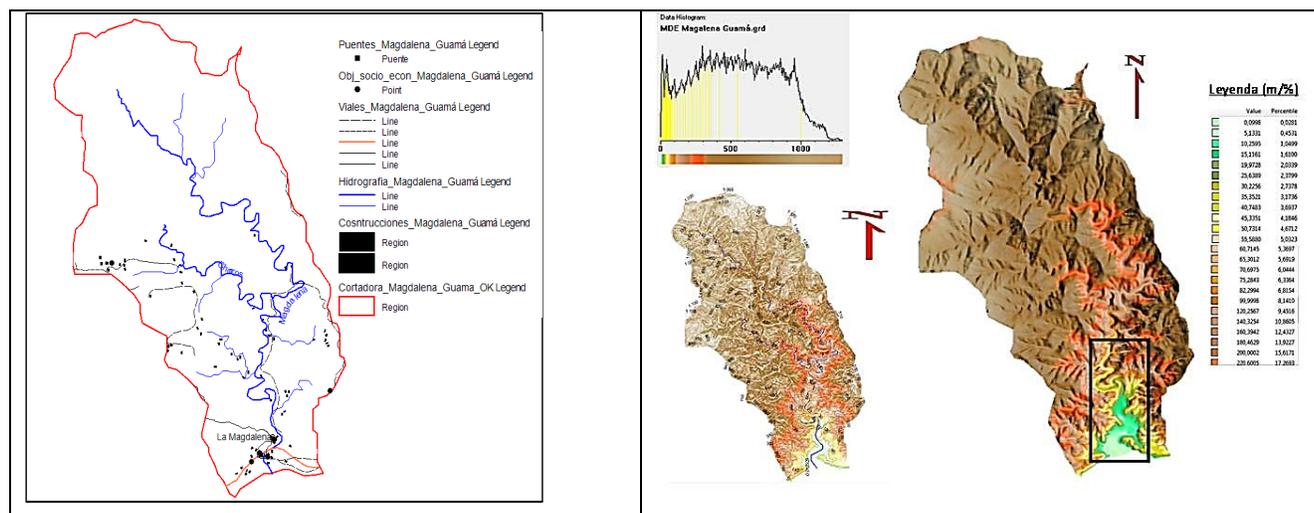


Figura 7. Cuenca hidrográfica del río La Magdalena en el municipio Guamá. Arriba: Hidrografía y objetos socioeconómicos ubicados en ella. Debajo: Imagen del mapa de relieve y modelo digital de elevación de la cuenca, especificando en un recuadro el área de trabajo del proyecto en la comunidad de igual nombre (Geocuba. 2010).

Para calcular la demanda eléctrica de una comunidad dada, se tienen en cuenta los factores antes mencionados, calculando para cada uno de ellos la demanda específica, luego la sumatoria de todas estas demandas específicas, determina la demanda eléctrica general de la comunidad. (MINEM, 2021).

Según el Ministerio de Energía y Minas de Cuba, durante el año 2020, el consumo promedio del sector residencial en Cuba es de 185 kWh mensuales, equivale a un consumo promedio diario de 6.16 kWh. Estos se distribuyen generalmente del consumo promedio de los equipos electrodomésticos, las luminarias y los gastos internos del sistema de cableado (MINEM, 2021).

En el caso de la comunidad La Magdalena cuenta actualmente con 225 viviendas con una población de 1419 habitantes, y no existen consumidores industriales que requieran energía eléctrica en la actualidad, por lo tanto, para calcular la demanda eléctrica diaria de la comunidad se realiza multiplicando la demanda de una vivienda por esta cifra:

$$Ddc = Cv * 6.16 \text{ kW/h} = 1386 \text{ kW/h} \quad (2)$$

Donde:

Ddc --- Demanda diaria de la comunidad

Cv ---- Cantidad de viviendas

6.16 kWh --- Demanda diaria de una vivienda en Cuba.

En el trabajo se realiza una aproximación al cálculo de la demanda futura, debido a que en comunidades como está la tendencia es que, una vez electrificadas, otros pobladores aislados de la zona montañosa migran hacia allí incrementando el consumo eléctrico local. Para ello se toman los valores promedio de crecimiento poblacional y de correlación con la cantidad de viviendas que se necesitarán en el futuro. En el caso de la comunidad en análisis Nieto (2020) empleando el Método Aritmético, determinó que para un período de 20 años la comunidad tendría una población de 3.690 habitantes. Por tanto, la cantidad de viviendas futuras sería:

$$Vcf(20 \text{ años}) = \frac{Vca * Pf}{Pa} = 585 \text{ viviendas} \quad (3)$$

Donde:

Vcf(20 años) -- Viviendas futuras de la comunidad en 20 años

Vca – Viviendas actuales

Pf – Población futura

El estimado de la demanda eléctrica futura crece con el tiempo por el desarrollo económico y social. Este pronóstico es incierto, pero resulta necesario a efectos de valorar la sostenibilidad del proyecto hidroenergético en proceso de diseño. De igual manera se multiplica el valor de la demanda actual para una vivienda por la cantidad de viviendas futuras calculada:

$$Ddfc = Cvf * 6.16 \text{ kw/h} = 3603.6 \text{ kw/h} \quad (4)$$

Donde:

Ddc --- Demanda diaria de la comunidad

Cv ---- Cantidad de viviendas

kWh --- Demanda diaria de una vivienda en Cuba.

3.3 Determinación del caudal óptimo aprovechable para la producción de hidroenergía.

La subcuenca específica corresponde al cierre del río La Magdalena, ubicado en la parte alta de la cuenca. Teniendo en cuenta la zona en que está enclavada la hidroeléctrica, caracterizada por ser una zona protegida declarada como “Región Especial de Desarrollo Sostenible” que contiene a los parques nacionales Desembarco del Granma, Turquino y la Bayamesa, además de varias otras áreas protegidas de significado local. Por ende, es un área sujeta a regulaciones ambientales, se hace necesario determinar, tal y como se planteó anteriormente, el caudal óptimo de explotación hidroenergética aplicando la siguiente formulación (1).

En el caso del Caudal medio del río se debe realizar empleando distintos métodos, en esta investigación se seleccionó el método de la fórmula clásica, un método sencillo y confiable ampliamente utilizando internacionalmente en los estudios hidrológicos, según se describe a continuación:

Con el valor del coeficiente de escurrimiento, el de precipitación media de la cuenca y el área de la cuenca se sustituye en la ecuación 1.5 y se obtiene el escurrimiento medio (Fig. 8):

$$W = \frac{C * P * A}{1000} \quad (5)$$

El caudal se obtiene sustituyendo el valor de escurrimiento en la ecuación 6:

$$Qo = \frac{Wo}{31.54} \quad (6)$$

El módulo de escurrimiento se determina a partir de la ecuación 7 sustituyendo los valores de caudal y área de la cuenca:

$$M_0 = (Q_0 / A_c) * 1000 \quad (7)$$

Se sustituyen los valores de escurrimiento y área de la cuenca en la ecuación 8 y se obtiene la lámina de escurrimiento:

$$Y_0 = (W_0 / A_c) * 1000 \quad (8)$$

Se obtiene el valor del coeficiente de escurrimiento (C), de la Tabla 2 de acuerdo con los tipos de suelos, uso del suelo y pendiente. Cuando el área de drenaje presenta diferentes tipos de suelos, vegetación y pendiente media. El coeficiente de escurrimiento (C), se obtendrá para cada área parcial y posteriormente se calculará el promedio ponderado para aplicarlo en la ecuación.



Figura 8. Imagen que muestra la obtención de datos preliminares con el uso de Sistemas de Información Geográfica de forma directa: área de la cuenca, perímetro, coordenadas. Se significa el cierre de la subcuenca para la ubicación de la central hidroeléctrica.

Tabla 2. Valores del coeficiente de escurrimiento. Fuente: Forcadell, 1994.

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
Plano (0-5% pendiente)			
Ondulado (6-10% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Plano (0-5% pendiente)			
Ondulado (6-10% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Escarpado (11-30% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Plano (0-5% pendiente)			
Ondulado (6-10% pendiente)	0.22	0.42	0.60
Escarpado (11-30% pendiente)			
Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

A partir de esto se calculan el caudal ecológico y el caudal, óptimo aprovechable:

Datos de entrada:

- Precipitación media anual (P) = 2000 mm
- Área de la cuenca (A) = 28.25 Km²
- Coeficiente de escurrimiento (c) = 0.30 (Suelo grueso con vegetación de bosques tropicales).

$$W = \frac{2000 * 0.30 * 28.25}{1000} = 16.95$$

$$Q_m = 16.95/31.54 = 0.54 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$M_0 = (0.54/28.25) * 1000 = 19.11$$

$$Y_0 = (16.95/28.25) * 1000 = 600$$

Tabla 3. Resumen los cálculos hidrológicos preliminares de la subcuenca La Magdalena en el área de cierre hidroeléctrico, calculados por el método de las fórmulas clásicas.

Área (km ²)	Perímetro (km)	Precipitación (mm)	W	
28.25	26.63	2000	16.95	
Q _m (m ³ /s)	M ₀	Y ₀	Q _{ec} (m ³ /s)	Q _{op} (m ³ /s)
0.54	19.11	600	0.081	0.46

Debido a que la cuenca presenta un caudal medio anual menor a 20 m³/s, a partir del enfoque de Cavero (2013) enunciado con anterioridad. El caudal ecológico (Q_{ec}) en época de estiaje será de un 15% del caudal medio mensual y en correspondencia con esta concepción se obtiene el caudal óptimo de explotación hidroenergética (Q_{op}) (Tabla 3).

$$Q_{ec} = (15\%) 0.54 = 0.081 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{op} = 0.54 - 0.08 = 0.46 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.4 Selección del tipo de cierre según las características topográficas y caudales determinados.

En el caso de la obra de toma para la generación hidroeléctrica, teniendo en cuenta las actuales posibilidades de aprovechamiento energético del río, se sugiere valorar el empleo de 3 variantes, las cuales se proyectan ejecutar un dique de rocas con hormigón para elevar el tirante del río aproximadamente en las coordenadas (486.779; 141,380) a 200 metros arriba del encuentro con el afluente “El Gato, el cual tendrá función derivadora (Figs. 9 y 10). La deficiencia de estas variantes radica en la distancia río arriba a recorrer y las inversiones a realizar para ejecutar un vial de acceso hoy inexistente en un área con relieve montañoso irregular.

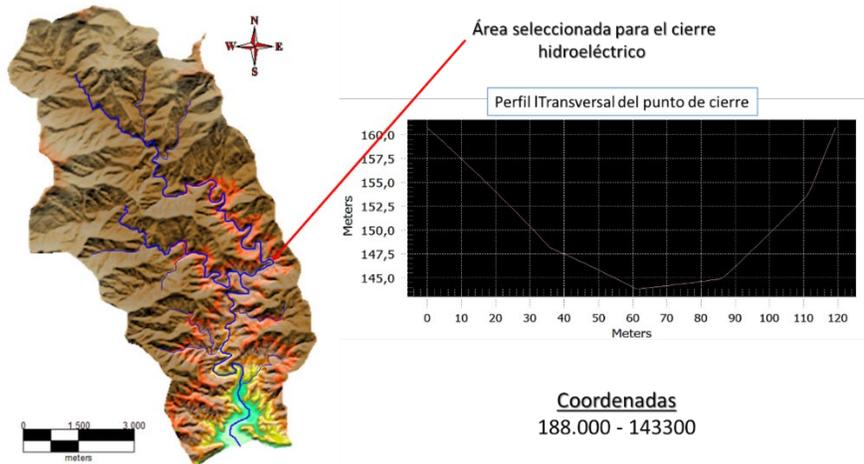


Figura 9. Área seleccionada para el cierre hidroeléctrico mostrando un perfil transversal.

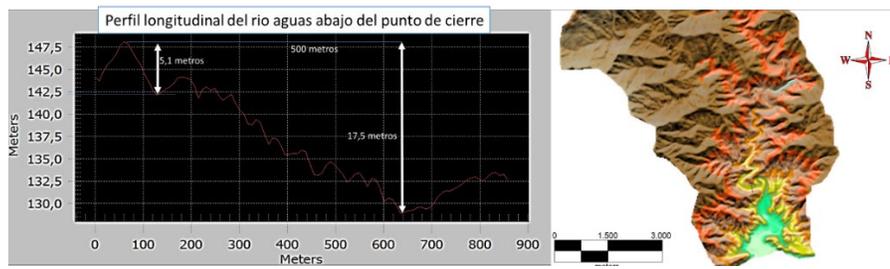


Figura 10. Perfil longitudinal del río aguas abajo del punto de cierre.

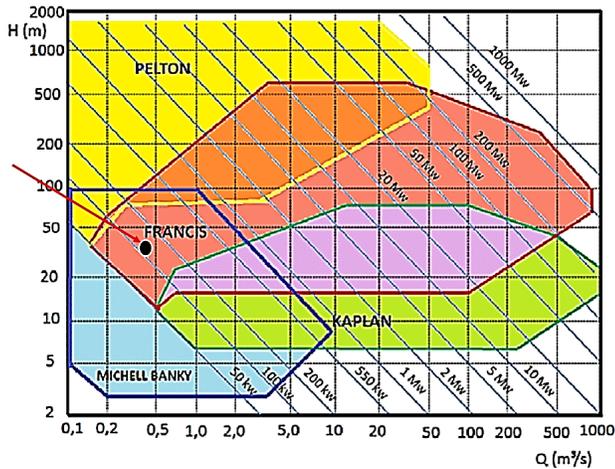


Figura 11. Abaco para determinar el tipo de turbina a emplear según cálculos iniciales, señalando la ubicación de selección primaria.
Fuente: ESHA, 2006.

3.5 Selección de la máquina eléctrica que producirá la energía

Como se expresó anteriormente, para variantes de cierre y aprovechamiento hidroeléctrico por regulación de los escurrimientos, se escoge la primera variante expuesta, o sea

un cierre con regulación, conduciendo aguas abajo hasta la casa de máquinas. Se emplean entonces los datos previos y se selecciona la turbina por su ubicación en el ábaco internacional (Fig. 11) (Tabla 4):

$$Q_{op} = 0.45 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Altura del salto (H)} = 17.5 \text{ m}$$

Esto da como resultado la selección de una turbina tipo Francis.

3.6 Potencia de la mini hidroeléctrica

Las dos características principales de una mini hidroeléctrica, desde el punto de vista de su capacidad de generación de electricidad son:

Tabla 4.

Selección del tipo de turbina dependiendo de la velocidad específica N_s .

Velocidad específica N_s	Tipo de Turbina
DE 5 A 30	Pelton con un inyector
DE 30 A 50	Pelton con varios inyectores
DE 50 A 100	Francis lenta
DE 100 A 200	Francis normal
DE 200 A 300	Francis rápida
DE 300 A 500	Francis doble gemela rápida o express
MÁS DE 500	Kaplan o hélice

- La potencia, que es función del desnivel existente entre el nivel medio del embalse y el nivel medio de las aguas debajo de la mini hidroeléctrica, y del caudal máximo turbinable, además de las características de la turbina y del generador.
- La energía garantizada en un lapso determinado, generalmente un año, que está en función del volumen útil del embalse, de la pluviometría anual y de la potencia instalada.

La potencia de una central mini hidroeléctrica se mide generalmente en kilowatts (kW) y se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$P = 9,81 \cdot \rho \cdot \eta_t \cdot Q \cdot H$$

donde:

- P= potencia en kilowatts (W)
- ρ = densidad del fluido en kg/m³
- η_t = rendimiento de la turbina hidráulica (entre 0.75 y 0.94)
- Q= caudal turbinable en m³/s
- H= desnivel disponible entre la toma y la entrada a la sala de máquinas aguas abajo, en metros

En una mini hidroeléctrica se define:

Potencia media: potencia calculada mediante la fórmula de arriba considerando el caudal medio disponible y el desnivel medio disponible.

Potencia instalada: potencia nominal de los grupos generadores instalados en la mini hidroeléctrica.

Para el caso del cierre propuesto a nivel de ideas conceptuales el valor de potencia media será:

$$P = 9,81 \cdot \rho \cdot \eta_t \cdot Q \cdot H$$

Donde:

$$\eta_t = 0,80 \text{ (para las turbinas Francis de producción nacional)}$$

$$Q = Q_{op} = 0.46 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H = 17,5 \text{ m}$$

$$P = 9,81 \cdot 0,80 \cdot 0.46 \cdot 17,5$$

$$P = 63,2 \text{ Kw/h}$$

Deberá analizarse si suple la demanda de la comunidad a partir de una defectación actualizada de los equipos eléctricos que poseen, actividad que fue imposible realizar en esta etapa, no obstante, las soluciones de bajar la ubicación de la sala de máquinas permitirían aumentar la carga y la potencia a generar.

4. Conclusiones

Para las comunidades que se encuentran enclavadas en zonas intrincadas y montañosas expuestas a regulaciones ambientales cubanas, especialmente de la comunidad La Magdalena en el municipio Guamá, el servicio eléctrico puede resolverse a partir de la producción de hidroenergía

posible a extraer del río de mismo nombre, diseñando proyectos hidroeléctricos que tengan en cuenta de manera adecuada el caudal ecológico en el estudio hidrológico básico inicial que se realiza con esta finalidad.

A partir de esta concepción, se elaboró un procedimiento que detalla los pasos a seguir para llegar a la conocer el caudal ecológico, el caudal óptimo de aprovechamiento hidroenergético en la cuenca alta del río La Magdalena del municipio Guamá, además de otros parámetros básicos que permitieron seleccionar el tipo de turbina que se empleará en dicho proyecto: $Q_{ec} = 0.081 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{op} = 0.46 \text{ m}^3/\text{s}$, Demanda actual de energía eléctrica en el poblado “La Magdalena” en 1386 kW/h, y turbina Francis de baja velocidad como generador de energía, con una potencia máxima de 100 kw.

Referencias

- IRENA. 2021. Renewable capacity statistics 2021. International renewable energy agency. [online]. Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf
- REN21. 2016. Renewables 2016 Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat). [online]. Available at: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf
- Galileo.edu, 2017. Hidroenergía una fuente de energía ambiental y progreso económico y profesional. [en línea]. Disponible en: <https://www.galileo.edu/ire/historias-de-exito/hidroenergia-una-fuente-de-energia-ambiental-y-progreso-economico-y-profesional/>
- MINEM. 2022. Hidroenergía. [en línea]. Disponible en: <https://www.minem.gob.cu/es/actividades/energias-renovables-y-eficiencia-energetica/hidroenergia>
- Méndez-López, M.. 2012. La gestión automatizada de la información operativa en la empresa de hidroenergía para la toma de decisiones basada en indicadores de desempeño ambiental. Tesis MSc. en Informática para la Gestión Medioambiental. Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas. Cuba. [en línea]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7639/MIGM%20-%20Tesis%20-%20Informe%20Completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Decreto Ley N° 331. 2015. Ley de las Zonas con Regulaciones Especiales. [en línea]. Disponible en: <https://www.ecolex.org/es/details/legislation/decreto-ley-no-331-ley-de-las-zonas-con-regulaciones-especiales-lex-faoc154630/?>
- Sánchez-López, P. 2019. Asignatura Energías Renovables. Carrera de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. Cuba.
- Cavero, M. 2013. ¿Qué es el caudal ecológico? [en línea]. Disponible en: <https://gidahatari.com/ih-es/caudal-ecologico>
- Durand, M.T. 2018. Evaluación del potencial hídrico de la Provincia Santiago de Cuba, Cuba. ISBN 978-959-247-156-6.

Geocuba Oriente Sur. 2010. SIG de la Base cartográfica de Santiago de Cuba escala 1:100 000. Cortesía de los autores.

ESHA. 2006. Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica. European Small Hydropower Association.

Salas, Ed. y Mendoza, S., 2021. Caudal Ecológico: su influencia en la supervivencia de los ecosistemas. [en línea]. Disponible en: <https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2021/05/caudal-ecologico-su-influencia-en-la-supervivencia-de-los-ecosistemas/>

Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C. y Ortiz, M.A. 2002. Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones Geográficas*. 47, pp. 36-58. [en línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112002000100004

Forcadell-Ramírez, J.L., 1994. Restauración hidrológico forestal de cuencas y con. TRAGSATEC (Firm), Empresa de Transformación Agraria (Madrid), Agrarios (Madrid). Mundi-Prensa Libros, S.A., 904 P. [en línea]. Disponible en: https://books.google.com/cu/books/about/RESTAURACION%20HIDROL%C3%93GICO_FORESTAL_DE_C.html?id=OsSVAACAAAJ&redir_esc=y

L. Galbán-Rodríguez, graduado como Ing. Geólogo en 1995, de la Universidad de Moa, Holguín, Cuba. Dr. en Ciencias Geológicas, en 2015. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Hidráulica en la Facultad de Construcciones de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. Actual Vicedecano de Investigaciones y postgrado y director general de Conexiones PDL. Ha publicado varios trabajos relacionados con temáticas de ingeniería geológica, gestión de riesgos y desastres, hidrología y estudios de vulnerabilidad ante distintos fenómenos ambientales, presentando numerosos resultados y premios que avalan su trayectoria profesional; entre estos consta el Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba en los años 2014 y 2020, obtenidos junto a varios colaboradores de su país. Es miembro activo de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba- UNAICC y del ejecutivo provincial de la Sociedad de Ingeniería en Geociencias y Química de este colegio profesional en Santiago de Cuba.
ORCID: 0000-0002-2377-9008

P. Sánchez-López, graduada como Ing. Hidrotécnica del Instituto Politécnico de Zhdanov, de Rusia. MSc. en Ing. Hidráulica. Profesora auxiliar del Departamento de Ingeniería Hidráulica en la Facultad de Construcciones de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. Actual metodóloga principal de la carrera. Su experiencia profesional en el Sistema de empresas de Recursos hidráulicos de Cuba, confirma el diseño y supervisión de distintas obras hidrotécnicas ejecutadas en la región oriental del país; así como estudios hidrológicos básicos y diseños de pequeñas centrales hidroeléctricas. En la docencia

universitaria destaca por su experticia en temas complejos de la profesión. Ha publicado varios trabajos relacionados con temáticas de ingeniería hidráulica e hidroenergía, presentando numerosos resultados y premios que avalan su trayectoria profesional; entre estos consta el Premio Nacional del Ministro de Educación Superior de Cuba como Mejor Profesor en la actividad metodológica y de extensión universitaria. Es miembro activo de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba-UNAICC y presidenta provincial de la Sociedad de Ingeniería Hidráulica de este colegio profesional en Santiago de Cuba.

ORCID: 0000-0002-9684-5029

Á.L. Brito-Souvanell, graduado como Ing. Mecánico en el Instituto Politécnico de Zhdanov, de Rusia. Dr. en Ciencias Técnicas. Profesor titular del Departamento de Ingeniería Mecánica en la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. Actual director general de Centro de Estudios de Eficiencia Energética (CEEFE) de esta universidad. Presidente de la sociedad CUBASOLAR, una organización dedicada al estudio y desarrollo de fuentes de energía renovable en Cuba. Ha publicado varios trabajos relacionados con temáticas de ingeniería mecánica, eficiencia energética, fuentes de energía renovable, entre otros, presentando numerosos resultados y premios que avalan su trayectoria profesional; entre estos consta el Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba, obtenido junto a varios colaboradores de su país. Es miembro activo de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba- UNAICC.
ORCID: 0000-0002-5062-4634

A. Herrera-Hernández, graduada como Ing. Hidráulica, año 2021, en la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. Actual especialista principal en la empresa de Acueductos y alcantarillados del municipio Moa en la provincia Holguín, Cuba. A pesar de su corta experiencia profesional, se destacó en su etapa universitaria en investigaciones relacionadas con la temática hidrológica. Sus aportes al trabajo presentado a publicación forman parte de su ejercicio de culminación de estudios. Es miembro activo de la Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba- UNAICC y de la Sociedad de Ingeniería Hidráulica de este colegio profesional en la provincia Holguín.
ORCID: 0000-0002-4320-8317