

*Ideas básicas conceptuales para el aprovechamiento del potencial hidroenergético de la cuenca alta del río “La Magdalena” del Municipio Guamá.*

Informe Referativo

En opción al título de ingeniera hidráulica

**Autora:**

Ariadna Herrera Hernández

**Tutores:**

DrC. Liber Galbán Rodríguez

MSc. Ing. Paula Sánchez López



Santiago de Cuba

2021

# *Agradecimientos*

Le agradezco a Dios sobre todas las cosas porque sin El nada de este trabajo hubiera sido posible. A él le doy gracias por tener paciencia conmigo y por darme cada día de su inmensa paz y misericordia, por realmente darme el privilegio de ser su hija.

A mi madre y mi familia, que siempre me han dado apoyo, me animan y encaminan cada día de mi vida, por mi madre porque es la razón de mi existir.

A mi esposo por su apoyo incondicional

A mis tutores Paula y Liber, por su apoyo incondicional.

Al claustro de profesores de la Carrera Ingeniería Hidráulica por su tiempo, dedicación y desempeño en mi formación profesional.

A mis compañeros de aula con quienes he compartidos momentos inolvidables durante mi estancia en la universidad y que también han colaborado en mi formación académica y profesional.

A todos los que de una forma u otra aportaron en la realización de este trabajo.

Gracias.

# *Dedicatoria*

Este trabajo va dedicado primeramente a mi madre que ha dedicado su vida para educarme y darme lo que he necesitado para llegar hasta aquí.

A mi familia por ayudarme y compartir conmigo mi suerte.

A mi esposo por su apoyo incondicional

A mis amigos que confiaron en mí

Gracias.

# *Resumen*

Beneficiar y mejorar la calidad de vida a los moradores en zonas intrincadas y montañosas es una de las tareas que la revolución cubana viene desarrollando desde hace varios años, El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos ha trabajado en la identificación del potencial hidroenergético aprovechable del país, estudiando los principales ríos de Cuba. La presente investigación tecnológica forma parte de un proyecto nacional de gran envergadura para la construcción a largo plazo de 34 centrales hidroeléctricas en toda Cuba. Tiene como objetivo fundamental determinar y caracterizar el potencial hidroenergético de la de la cuenca alta del río “La Magdalena” del Municipio Guamá, en la provincia de Santiago de Cuba. Dicha investigación permitirá proponer el tipo de turbina hidráulica más apropiada para instalar en esa zona y brindar en un futuro electricidad al poblado “La Magdalena”. Para lograr este objetivo se revisó un cúmulo importante de bibliografía especializada, conjuntos de normas e instrucciones establecidas por el organismo central al respecto, como sitios en internet. Se obtuvieron como resultados fundamentales, la caracterización del potencial hidroenergético de la cuenca “las Magdalena”, establecer una propuesta de turbina hidráulica a instalar en la zona que garantice la electrificación a dicha población, siendo la electrificación de las montañas una brillante tarea lograda que debe seguir en desarrollo.

## **Abstract**

Benefiting and improving the quality of life of the inhabitants in intricate and mountainous areas is one of the tasks that the Cuban revolution has been developing for several years, The National Institute of Hydraulic Resources has worked on the identification of the usable hydro-energy potential of the country, studying the main rivers of Cuba. This technological research is part of a large-scale national project for the long-term construction of 34 hydroelectric plants throughout Cuba. Its main objective is to determine and characterize the hydro-energy potential of the upper basin of the “La Magdalena” river of the Guamá Municipality, in the province of Santiago de Cuba. Said research will make it possible to propose the most appropriate type of hydraulic turbine to install in that area and to provide electricity to the town of “La Magdalena” in the future. To achieve this objective, an important accumulation of specialized bibliography, sets of norms and instructions established by the central organism in this regard, such as internet sites, was reviewed. The fundamental results obtained were the characterization of the hydro-energy potential of the “Las Magdalena” basin, establishing a proposal for a hydraulic turbine to be installed in the area that guarantees the electrification of said population, being the electrification of the mountains a brilliant task achieved that must continue in development.

# *Índice*

No	CONTENIDOS	PÁG.
	<b>Introducción</b>	1
1	<b>Capítulo 1. Hidroenergía</b>	7
1.1	Introducción al uso del agua para generar energía eléctrica.	7
1.2	Ventajas y desventajas de la hidroenergía.	11
1.3	Características actuales de la hidroenergía en Cuba.	12
1.4	Aprovechamiento hidráulico.	14
1.4.1	Centrales hidroeléctricas.	16
1.5	El aprovechamiento hidráulico en cuencas hidrográficas.	20
1.6	Equipos empleados en la generación de hidroenergía	23
1.7	Turbinas hidráulicas.	26
1.8	Generador eléctrico.	31
2	<b>Capítulo 2. Procedimiento general propuesto para el diseño preliminar de aprovechamiento hidroenergético.</b>	34
2.1	Caracterización general de la cuenca hidrográfica del río “La Magdalena”	34
2.2	Demanda actual de energía eléctrica de la comunidad La Magdalena.	38
2.3	Determinación de los coeficientes Óptimo aprovechable para la producción de hidroenergía	41
2.4	Selección del tipo de cierre según las características topográficas y caudales determinados.	44
2.5	Selección de la máquina eléctrica que producirá la energía.	47
2.6	Potencia de la mini hidroeléctrica	48
2.7	Proyección de los pasos básicos para la construcción del cierre y la estación de producción de hidroenergía.	49
	<b>Conclusiones</b>	53
	<b>Recomendaciones</b>	55
	<b>Referencias bibliográficas</b>	57
	<b>Anexos</b>	59

## Listado de figuras

No	NOMBRE DE LA FIGURA	PÁG.
1.1	Distribución mundial de la producción de energías renovables. Tendencia al crecimiento de la producción de hidroenergía en los países mayores productores.	9
1.2	Imagen de la presa de las tres gargantas, mayor central hidroeléctrica del mundo.	10
1.3	Esquema clásico de una central hidroeléctrica aguas debajo de una represa	11
1.4	Central hidroeléctrica.	16
1.5	Central de agua fluyente.	18
1.6	PCHE GUIZA. Provincia Granma.	20
1.7	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.	22
1.8	El más antiguo de los motores hidráulicos construido en una rueda.	25
1.9	Diferentes tipos de ruedas hidráulicas.	26
1.10	Turbinas Kaplan.	27
1.11	Turbinas hélice.	27
1.12	Rodete de una turbina Pelton.	28
1.13	Turbina Francis acoplada a un generador hidráulica	28
1.14	Turbinas Ossberger acoplada a un generador	29
1.15	Generadores eléctricos tipo turbina Kaplan en una hidroeléctrica.	30
1.16	Carta para seleccionar turbinas hidráulicas en función del caudal y el salto.	31
1.17	Abaco para determinar el tipo de turbina a emplear.	31
1.18	Turbinas Hidráulicas tipo Kaplan y Pelton y generador eléctrico, vista en corte.	32
2.1	Mapa de ubicación geográfica de la comunidad Magdalena municipio Guamá.	34
2.2	Mapa de la cuenca hidrográfica del río La Magdalena en el	35

	municipio Guamá.	
2.3	Imagen del mapa de relieve y modelo digital de elevación de la cuenca hidrográfica del río La Magdalena en el municipio Guamá. Esquemas ejemplo posible a emplear con sifón lateral y turbinas axial tipo Kaplan.	36
2.4	Imágenes del mapa de precipitaciones y temperatura de la cuenca hidrográfica del río La Magdalena en el municipio Guamá.	37
2.5	Imágenes del río La Magdalena en el municipio Guamá:	38
2.6	Imagen que muestra la obtención de datos preliminares con el uso de Sistemas de Información Geográfica de forma directa.	42
2.7	Imagen que muestra la obtención de datos preliminares con el uso de Sistemas de Información Geográfica de forma directa.	43
2.8	Área seleccionada para el cierre hidroeléctrico mostrando un perfil transversal	44
2.9	Perfil longitudinal del río aguas abajo del punto de cierre	45
2.10	Esquemas ejemplo posible a emplear con sifón lateral y turbinas axial tipo Kaplan	45
2.11	Imagen ejemplo de un dique de hormigón con aliviadero automático e instalación hidroenergética en canal lateral	46
2.12	Esquema propuesto para el cierre en el río y ejemplo de casa de máquina con turbinas a filo de agua.	47
2.13	Tipos de turbinas hidráulicas.	48

### Listado de tablas

No	NOMBRE DE LA TABLA	PÁG.
1.1	Países mayores productores de hidroenergía en 2020.	8
2.1	Características morfométricas generales de las cuencas obtenidos de la cuenca con el empleo de un SIG.	35
2.2	Consumo promedio de los principales equipos electrodomésticos mensuales en Cuba.	39
2.3	Valores de coeficiente de escurrimiento según el método racional	43

<b>2.4</b>	Resumen los datos necesarios preliminares de la cuenca en el área de cierre hidroeléctrico.	44
<b>2.5</b>	Selección tipo de turbinas dependiendo de la velocidad específica Ns	
<b>2.6</b>	Pasos tecnológicos a seguir para la ejecución del sistema de abastecimientos de agua a la agricultura en la comunidad la Magdalena del municipio Guama.	48

# *Introducción*

*Tesis de grado de Ariadna Herrera Hernández*

## **Introducción:**

La energía hidráulica, contenida en las masas de agua producto de la energía solar transformada debido a los procesos naturales de evaporación y lluvia, puede ser convertida en energía mecánica cuando esas masas líquidas pasan de una cota superior a otra inferior. En los cursos de agua en estado natural, la energía hidráulica se disipa en remolinos, erosión de los cauces y las orillas y en las turbulencias de los arroyos y ríos. Con el propósito de extraer esta energía y convertirlas en otras formas más apropiadas a la actividad humana se crean condiciones propicias por medio de las maquinas hidráulicas para transformar la energía potencial y cinética en energía mecánica, moviendo esta a su vez un generador para producir electricidad. (Galileo.edu, 2017)

La energía extraída del río es renovable y la renovación tendrá lugar de forma natural mientras que en mundo llueva. En Cuba con el triunfo revolucionario el Comandante en Jefe, junto al PCC, se dieron la tarea de generar un desarrollo político, social, educacional y cultural a toda nuestra población, que incluye hasta lo más profundo de la Sierra Maestra. Este empeño sería imposible sin la electrificación de estas zonas y entre las formas de hacerlo esta la construcción de mini-hidroeléctricas en los ríos de estos lugares los cuales no están conectados al sistema eléctrico nacional por su ubicación.

En la instalación de las mini-hidroeléctricas es necesario conocer el potencial hidroenergético 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.

La utilización del agua en Cuba para generar electricidad, que data de principios del siglo XX, recibe un notable aliento al calor del desarrollo de las fuentes renovables de energía. El país cuenta con 180 instalaciones hidrogeneradoras, distribuidas en nueve provincias y 38 municipios, de las cuales 149 prestan servicio de energía eléctrica a ocho mil 629 viviendas que albergan conjuntamente a 34 mil habitantes en zonas rurales y montañosas de

difícil acceso, según Alien Pérez, subdirector del Centro Integrado de Tecnologías del Agua (CITA), del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Sin mejoras en la eficiencia, la demanda mundial de agua superará los suministros actualmente accesibles en un 40% para el año 2030 (2030 Water Resources Group, 2009). Se espera que los niveles históricos de la mejora en la productividad del agua, así como aumentos de la oferta hagan frente a un 40% de esta brecha, pero el 60% restante tiene que venir de la inversión en infraestructura, reforma de la política de aguas y desarrollo de las nuevas tecnologías (PNUMA, 2011).

Hoy en día, la energía utiliza aproximadamente el 8% del total de agua dulce extraída en todo el mundo y hasta un 40% del agua dulce extraída en algunos países desarrollados (WEF, 2011; IRP, 2012). La demanda de energía en las tendencias actuales se incrementará en un tercio desde 2010 hasta 2035, con el 90% ocurriendo en países no pertenecientes a la OCDE (IEA, 2012). Las necesidades de agua para la producción de energía se prevé que crezcan al doble del ritmo de la demanda de energía (IEA, 2012; National Geographic, 2013). Las extracciones de agua estimadas para la producción de energía en el año 2010 fueron de 583 millones de metros cúbicos, de los cuales el 11% (66) era agua consumida – el resto fue extraída pero no regresó a su fuente.

El uso de energías renovables es una de las prioridades en las condiciones de montaña y rurales remotas, (donde antes del triunfo de la revolución, casi no se conocía la electricidad), gracias al gran esfuerzo realizado, la electrificación por todas las vías alcanzó un valor promedio nacional superior a 80% de las necesidades. El costo de la extensión de las redes del sistema electro energético nacional oscila, en dichas condiciones, los 12500 USD por kilómetro, incluyendo todos los materiales y recursos necesarios y se justifica por las actividades económicas o sociales que respalda. El servicio eléctrico con plantas Diesel requiere, además de la inversión inicial, del constante suministro de combustible, lubricantes, partes y piezas consumibles o des gastables, así como de operación y mantenimiento calificado. Sin tener en cuenta el impacto ambiental que se ocasionan en esos ecosistemas. La hidroenergía, por su aporte energético, estabilidad, autonomía, ventajas operacionales y dispersión territorial, es una de las fuentes renovables de energía de importancia en Cuba. La energía hidráulica ya permite dar soluciones

energéticas en zonas rurales, principalmente en las montañas constituyen un gran ahorro de petróleo y mejoran la calidad de vida de estas zonas.

Específicamente el municipio Guamá de la provincia Santiago de Cuba, se caracteriza por poseer un gran número de comunidades rurales aisladas, en las que se desarrollaron en los años 80 del siglo XX, varios proyectos de hidroelectricidad. Hoy debido al crecimiento demográfico experimentado por estas comunidades, estos sistemas no son suficientes, además de no cubrir la demanda en diseño debido al crecimiento de las viviendas y establecimientos en estas comunidades, así como el desarrollo de actividad agrícola extensiva. De acuerdo con las prioridades establecidas por el gobierno municipal de Guamá, una de las comunidades que necesita un estudio integral de sus fuentes de energía a través del agua para mejorar el servicio de electricidad a su población es la Comunidad “La Magdalena”.

**Problema de investigación:** La Comunidad de “La Magdalena” presenta insuficiencias en el servicio de energía eléctrica que dificultan su desarrollo económico y social; no está conectada al sistema nacional de la UNE y se abastece de plantas Diésel 4 horas diarias en horario nocturno, pero a partir de las contingencias energéticas que atraviesa el país este servicio es muy inestable.

**Objeto de investigación:** El uso del agua de la cuenca alta del Rio “La Magdalena” del Municipio Guamá para generar electricidad.

**Campo de acción de investigación:** Potencial hidroenergético

**Objetivos General:** Proponer los pasos metodológicos preliminares para el aprovechamiento de los potenciales hidroenergéticos de la cuenca alta del rio “La Magdalena” del Municipio Guamá.

**Objetivos Específicos:**

1. Realizar la revisión bibliográfica referente al uso de la hidroenergía.
2. Describir las ideas básicas conceptuales para aprovechar la hidroenergía en la subcuenca seleccionada del rio La Magdalena.

**Hipótesis de la investigación:** De conocerse el potencial hidroenergético en el cierre de estudio se puede diseñar una mini hidroeléctrica a filo de agua para generar energía eléctrica al poblado de la Magdalena.

**Resultados esperados:**

Determinar el potencial hidroenergético en el cierre propuesto del río la Magdalena y proponer el tipo de turbina hidráulica para abastecer de electricidad a los usuarios del poblado la Magdalena.

**Métodos de investigación utilizados:**

▪ **Del nivel teórico**

**Histórico-lógico:** para las pesquisas de las investigaciones y estudios desarrollados históricamente con respecto al tema.

**Análisis y síntesis:** para todo el proceso investigativo, tanto en sus fundamentos teóricos como en las argumentaciones de las propuestas, así como la interpretación de los resultados y la elaboración de las conclusiones.

**Hipotético-deductivo:** a partir de realizar la investigación en el río, la necesidad de evaluar las potenciales hidroenergéticas de sus diferentes elementos estructurales por diferentes vías, interpretar los resultados en función de la variante que ofrezca mayor garantía y confiabilidad.

▪ **Del nivel empírico**

**Observación:** Se permitió conocer la realidad mediante la percepción directa de los objetos y fenómenos en sus condiciones naturales, a partir del objetivo previamente establecido y utilizando métodos científicos, nos permitió escoger el diseño más favorable, teniendo en cuenta las condiciones actuales del río a partir de una visita prevista a dichas obras.

**Estructura del informe referativo:**

El presente informe está dividido en las siguientes partes: Introducción, Capítulo I La hidroenergía, Capítulo II Procedimiento general propuesto para el diseño preliminar de aprovechamiento hidroenergético, Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía y Anexos, en las cuales se reflejan las informaciones detalladas de cada elemento relacionado con el tema tratado, la primera está conformada por una presentación de la tesis en la cual aparecen un breve resumen del trabajo en español e inglés, agradecimientos, dedicatoria, la tabla de contenidos, una introducción que aborda la argumentación y el diseño de la investigación. En la segunda contiene la revisión bibliográfica con temas tales como: Introducción al uso del agua para generar energía eléctrica. Ventajas y desventajas de la hidroenergía. Características actuales de la hidroenergía en Cuba. Centrales hidroeléctricas. El aprovechamiento hidráulico en cuencas hidrográficas, los equipos

empleados en la generación de hidroenergía, las turbinas hidráulicas y los generadores eléctricos, se muestran el procedimiento general propuesto para el diseño preliminar de aprovechamiento hidroenergético. La caracterización general de la cuenca hidrográfica del río “La Magdalena”, la actualización de la demanda eléctrica de la comunidad La Magdalena, determinación de los coeficientes de escurrimiento de la cuenca hasta el punto de cierre donde se pretende construir la mini hidroeléctrica, selección del tipo de cierre según las características topográficas y caudales determinados. Selección de la máquina eléctrica que producirá la energía. Proyección de los pasos básicos para la construcción del cierre y la estación de producción de hidroenergía. Se finaliza con la propuesta de generación de cierre de equipos a utilizar en la cuenca alta del río la Magdalena y se verá reflejado el análisis autoral de los resultados de la investigación.

# Capítulo 1

## **CAPÍTULO 1: LA HIDROENERGÍA.**

La hidroenergía es un tipo de energía renovable, llamada así por que tiene como característica, al igual que otros tipos, de producirse a partir de fuentes que no necesitan combustibles fósiles y se encuentran con regularidad en la naturaleza. A continuación se exponen algunos criterios al respecto.

### **1.1 Introducción al uso del agua para generar energía eléctrica.**

La energía hidroeléctrica es electricidad generada aprovechando la energía del agua en movimiento. La lluvia o el agua de deshielo, provenientes normalmente de colinas y montañas, crean arroyos y ríos que desembocan en el océano. La energía que generan esas corrientes de agua puede ser considerable, como sabe cualquiera que haya hecho descenso de rápidos. (Galileo.edu, 2017)

El aprovechamiento del agua como fuente de energía es muy antiguo. Antes de la Era Cristiana se utilizaron los cursos de agua para mover ruedas de molinos o elevar el agua para el riego, sin embargo, recién a fines del siglo XIX comenzó a usarse la energía del agua para generar electricidad. El origen de la energía hidráulica tal y como se conoce en la actualidad tuvo lugar a comienzos de la Revolución Industrial, la primera central hidroeléctrica moderna se construyó en 1880 en gran Bretaña. En el año 1882 apenas tres años después de que Thomas Edison descubriera la primera lámpara eléctrica de carácter práctico para alumbrado se puso en marcha en Appleton (Wisconsin, Estados Unidos) la primera central hidroeléctrica del mundo para servicios comercial. La energía hidroeléctrica debe su mayor desarrollo al ingeniero civil británico John Smeaton, que construyó por primera vez grandes ruedas hidráulicas de hierro colado.

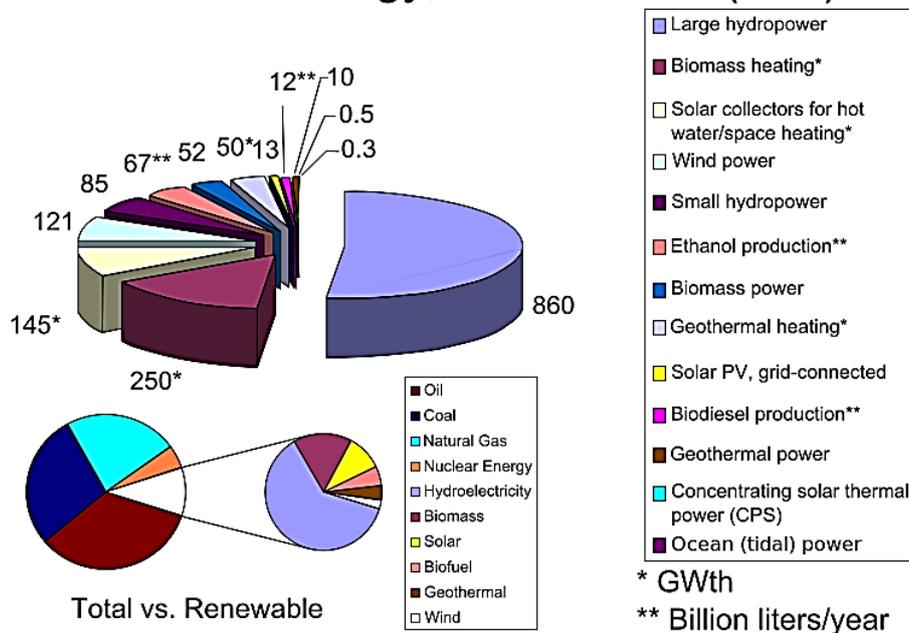
Según las Naciones Unidas, más de dos mil millones de personas no tienen acceso permanente a la electricidad. La falta de medios adecuados de calefacción y de alumbrado en los hogares, dispensarios y escuelas afecta el 40 por ciento de la población del orbe, en particular a los habitantes de las zonas rurales o aisladas de los países subdesarrollados. La electrificación a partir de fuentes renovables permitiría satisfacer las necesidades de esas poblaciones, cuyas comunidades podrían disponer por fin de equipos indispensables para la salud y el desarrollo comunitario. El aprovechamiento de fuentes renovables de energía (eólica, solar, hidráulica y otras) exige el mayor conocimiento posible de las diversas tecnologías existentes.

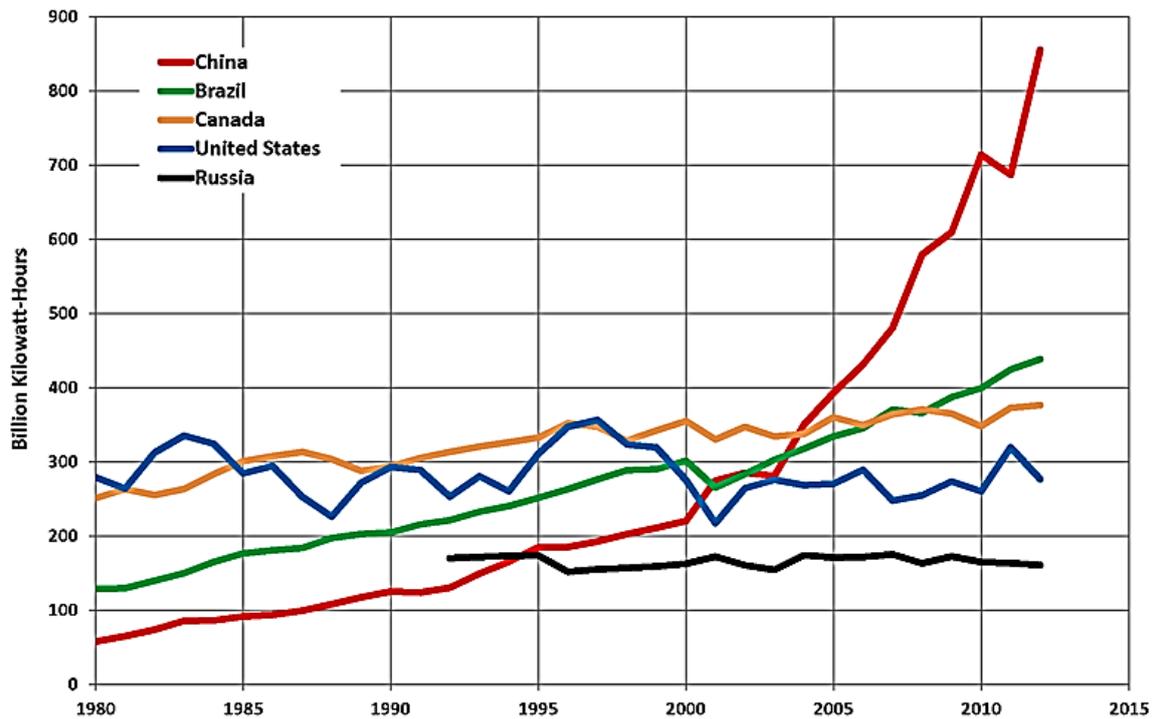
Hoy energía hidroeléctrica proporciona casi un quinto de la electricidad de todo el mundo, China, Canadá, Brasil, Estados Unidos y Rusia fueron los cinco mayores productores de este tipo de energía en 2020 (IRENA, 2021) (Tabla 1.1) (Figura 1.1).

Tabla 1.1 Países mayores productores de hidroenergía en 2020. Fuente: IRENA, 2021.

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%

## Renewable energy, end of 2008 (GW)





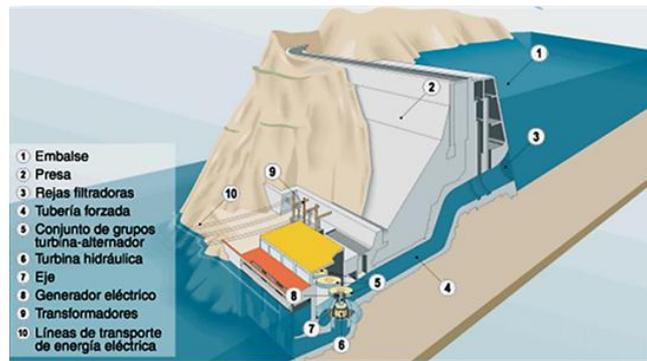
**Figura 1.1** Distribución mundial de la producción de energías renovables (arriba). Tendencia al crecimiento de la producción de hidroenergía en los países mayores productores (debajo). Fuente: REN21, 2016.

Una de las centrales hidroeléctricas de mayor tamaño del mundo se encuentra en los Tres Cañones sobre el río Yangtsé de China. El depósito de estas instalaciones empezó a llenarse en 2003, pero no se esperaba que la central estuviera en pleno funcionamiento hasta 2009. La presa mide 2,3 kilómetros de ancho y 185 metros de alto (Figura 1.2). La energía hidroeléctrica es la que genera electricidad de forma más barata en la actualidad. Esto se debe a que, una vez que la presa se ha construido y se ha instalado el material técnico, la fuente de energía (agua en movimiento) es gratuita. Esta fuente de energía es limpia y se renueva cada año a través del deshielo y las precipitaciones.



**Figura 1.2** Imagen de la presa de las tres gargantas, mayor central hidroeléctrica del mundo. Fuente: <https://www.renovablesverdes.com/la-presa-de-las-tres-gargantas-la-mayor-del-mundo/>

La principal aplicación de la energía hidráulica en la actualidad es la obtención de electricidad. Las centrales hidroeléctricas generalmente se ubican en regiones donde existen una combinación adecuada de lluvias y desniveles geológicos favorables a 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. 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)



**Figura 1.3** Esquema clásico de una central hidroeléctrica aguas debajo de una represa.  
Fuente: Sánchez, 2019

## 1.2 Ventajas y desventajas de la hidroenergía.

### Ventajas

Es renovable pues se gastan el agua de los ríos ni inciden en su secado, es barata y de fácil obtención dada la abundancia de agua en el planeta están claros los costos de instalación de las plantas hidroeléctricas pero eso cuenta solo como inversión inicial, es una forma de energía limpia pues no subproduce sustancias contaminantes al no haber procesos de combustión ni materia prima, a la larga resulta económica ya que no depende del ingreso de materia prima ni de las fluctuaciones de su mercado. Es inagotable siempre cuando continúe el ciclo del agua la disponibilidad está segura, ya que el agua utilizada se devuelve al curso en una cota inferior. Es autóctona porque la fuente energética está en el propio territorio con lo que se reduce las importaciones de energía eléctrica desde terceros países. No necesita de sistemas de refrigeración o calderas lo que disminuyes los costes. No contamina la atmosfera ya que no produce calor ni emisiones de gases contaminantes (como los gases de efectos invernaderos). Permite almacenar agua para regadíos y otros usos de emergencia (extinción de incendios). cuando la central lleva aparejada la construcción de una presa, permite regular el caudal de los ríos y facilita la infraestructura necesaria para actividades de recreo (pesca, remo, baño, etc.).

### Desventajas.

El impacto ambiental de las grandes instalaciones en ríos y lagos, el elevado costo de la construcción de las centrales, así como los costos secundarios de las inundaciones de terreno fértil para construir una represa. La alteración de

los ecosistemas fluviales río abajo, pues el agua que sale de las plantas carece de sedimentos, las temporadas extremas de sequía y fenómenos como el Niño pueden reducir drásticamente la producción eléctrica. Su rendimiento depende de las condiciones meteorológicas, si la región donde se instala una central hidráulica sufre una severa sequía, el ritmo de producción de energía disminuirá. Son necesarias condiciones ambientales muy concretas para la explotación de esta energía, como la existencia de corrientes fluviales suficientemente grandes y la presencia de una orografía accidentada. Además la localización de las centrales está a menudo alejada de los centros de consumos por lo que suele ser necesario construir la infraestructura necesaria para conducir la electricidad. La construcción de grandes presas altera los ecosistemas así especies animales que remontan los ríos para desovar ven interrumpido su ciclo, además el estancamiento de las aguas hace que los sedimentos se depositen en el fondo por lo que los nutrientes no llegan a la zona bajas del río, afectando a todo el ecosistema. Las construcciones de embalses pueden plantear graves problemas sociales y demográficos tales como el abandono de poblaciones o la expropiación de grandes cantidades de suelo. Mayor contaminación del agua, el agua embalsada no dispone de las mismas condiciones de salubridad que el agua fluyente pudiendo ocasionar en determinadas regiones focos infecciosos.

### **1.3 Características actuales de la hidroenergía en Cuba.**

Antes de la década de 1980 se contaba con un pequeño número de instalaciones, entre ellas la hidroeléctrica Hanabanilla, las del Guaso y San Blas, y algunas mini hidroeléctricas, indica Pérez. A, tenor del desarrollo de la voluntad hidráulica, dirigida al máximo aprovechamiento, acceso al recurso 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. (Unión Eléctrica de Cuba, 2017).

La potencia total instalada en el país es de 65 MW y la generación promedio anual de electricidad es de 128 mil MW por hora, lo cual permite el ahorro de 25 mil toneladas de combustible, a la vez que se favorece al medioambiente, pues se evita emitir a la atmósfera 102 mil 400 toneladas de CO<sub>2</sub>. En estos momentos se encuentran en proceso de inversión tres PCHE, con una potencia

instalada de 6,2 MW, las cuales se incorporan en este año 2018 y, de conjunto con otras obras, garantizan que el país alcance una potencia en energía hidráulica de 70 MW. (Unión Eléctrica de Cuba, 2017).

El potencial hidroenergético a lo largo de estos años se ha venido estudiando el potencial hidroenergético de Cuba, el cual pese a constituir un país que por su forma alargada y estrecha no posee grandes ríos, es posible construir en las 220 presas y embalses existentes igual cantidad de PCHE, las cuales podrían aportar una generación media anual de electricidad de 210 mil MW por hora. 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, que en su gran mayoría tienen más de 20 años de explotación y cuentan con tecnología obsoleta. Lo anterior ha permitido realizar rehabilitaciones, como sustitución de conductoras, generadores y turbinas, la reconstrucción de casas de máquinas y la colocación de reguladores de voltaje y frecuencia, con el fin de mejorar la calidad del servicio a las instalaciones en condiciones de aislamiento. Hay que destacar que la industria nacional ha producido más de 300 turbinas de varios modelos, en colaboración con empresas de la rama. El país dispone de varios trasvases, el mayor de los cuales es el Este-Oeste, que atraviesa las provincias orientales de Holguín y Las Tunas, el cual permite llevar el agua desde las Sierras de Nipe, Cristal y Baracoa hasta Camalote en Camagüey. También de 270 kilómetros de canales magistrales, canales sobre colchón, puentes-canal, túneles, presas reguladoras de aporte y buena relación costo beneficio y dos estaciones de bombeo, entre otros objetivos en la rama hidráulica. Según las Naciones Unidas, más de dos mil millones de personas no tienen acceso permanente a la electricidad. La falta de medios adecuados de calefacción y de alumbrado en los hogares, dispensarios y escuelas afecta el 40 por ciento de la población del orbe, en particular a los habitantes de las zonas rurales o aisladas de los países subdesarrollados. La electrificación a partir de fuentes renovables permitiría satisfacer las necesidades de esas poblaciones, cuyas comunidades podrían disponer por fin de equipos indispensables para la salud y el desarrollo comunitario. El aprovechamiento de fuentes renovables de energía (eólica, solar, hidráulica y otras) exige el mayor conocimiento posible de las diversas tecnologías existentes. En Cuba, la Revolución introdujo entre sus políticas

prioritarias la electrificación del país, lo cual permitió que virtualmente toda la población disfrute de acceso a ese recurso. Sin duda, la potenciación de las diversas formas de energía renovable, entre ellas la hidráulica, permite abaratar costos y generalizar aún más el uso de la electricidad en algunas actividades de las zonas rurales, sobre todo montañosas. (Unión Eléctrica de Cuba, 2017).

En la instalación de las mini hidroeléctricas es necesario conocer el potencial hidroenergético 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. (Unión Eléctrica de Cuba, 2017).

Desde el punto de vista metodológico para la gestión de la hidroenergía en Cuba participan las siguientes instituciones:

- Empresa eléctrica nacional. Administra la red eléctrica y su UEB Hidroenergía es la encargada de diseñar y administrar particularmente los proyectos del país, tiene sedes en varias provincias.
- Empresa de proyectos Hidráulicos, adjunta a las Delegaciones provinciales de Recursos Hidráulicos. Tiene la misión de realizar los estudios hidrológicos básicos para los aprovechamientos hidroenergéticos, además de supervisar el cumplimiento de las normativas cubanas en función de la explotación de los recursos hídricos.

#### **1.4 El aprovechamiento hidroeléctrico**

Existen diferentes esquemas básicos para el aprovechamiento de la energía hidráulica, que distinguen los diferentes tipos de centrales hidroeléctricas. Entre las diversas categorías de clasificación se destacan:

- ✓ Por el salto efectivo del agua.
- ✓ Por la capacidad o potencia instalada.
- ✓ Por el tipo de turbina usada.

- ✓ Por el emplazamiento y tipo de presa

Por los desniveles entre dos puntos del cauce el agua puede accionar una turbina hidráulica la cual transmite la energía a un generador que la convierte en energía eléctrica. Otro esquema 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

Una instalación hidroeléctrica está básicamente formada por canales y componentes hidráulicos (sistema de captación de agua, tomas de agua, sistema de canalización y de restitución, centralita) y por componentes electromecánicos (turbina, alternador, cuadros eléctricos, sistemas de mando). El agua procedente de los sistemas de toma de agua es canalizada, a través de canales o conductos, a la cámara de carga, que determina el nivel del canal a cielo abierto superior, necesario en función del salto útil para la central. Desde este punto, el agua es canalizada a las turbinas a través de conductos forzados y al pasar por las paletas móviles (rotores), determina su rotación. El eje del rotor que gira está conectado a un generador de electricidad (alternador); el agua que sale de la turbina es devuelta, a través de los sistemas de restitución a su curso original, a un nivel determinado por el canal a cielo abierto inferior. Para el aprovechamiento hidroeléctrico es necesario contar con:

- ✓ **Obras civiles:** destacando los azudes de toma en el río (en centrales de agua fluyentes), las presas de regulación (provistas de la toma necesaria en centrales de pie de presa), los caminos de acceso y los edificios de la central para alojamiento de los equipos.
- ✓ **Obras civiles hidráulicas:** como el canal de la derivación (en centrales de agua fluyentes), las cámaras de carga (en centrales de agua fluyente), las tuberías forzadas (que unen la cámara de carga o embalse con los equipos mecánicos de la central) y los canales de descarga que restituyen los caudales turbinados al río.
- ✓ **Equipos de control, mando y comunicación:** como sensores de medida para el control, microprocesadores y grupos oleo hidráulicos

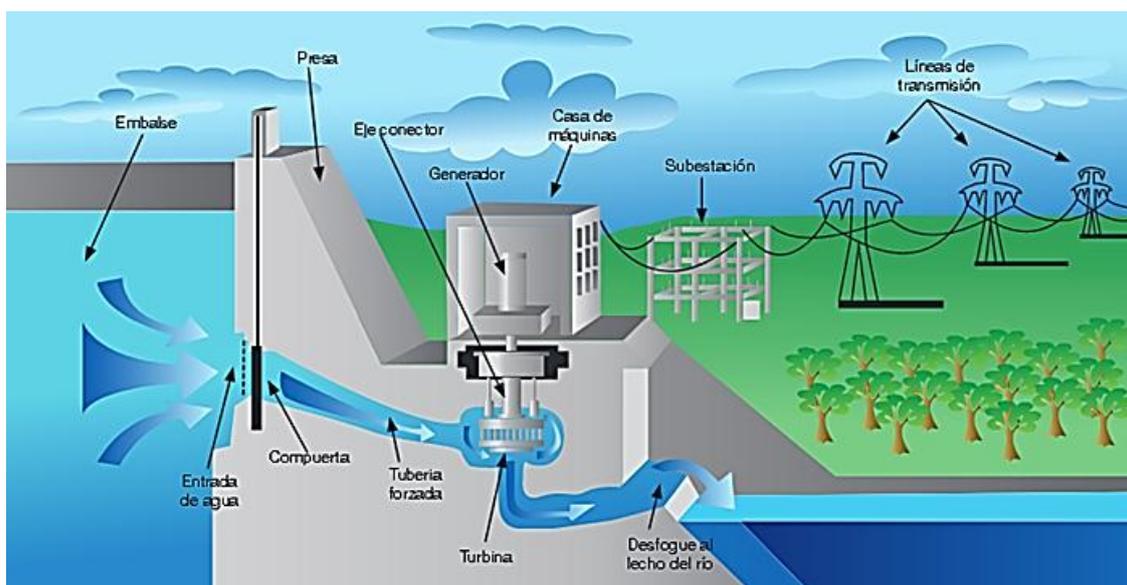
para accionamiento de la regulación y transmisores o receptores de la comunicación.

#### 1.4.1 Centrales Hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es una instalación que permite el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos, para transformarlas en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a generadores. Después de este proceso, el agua se devuelve al río en las condiciones en que se tomó, de modo que se puede volver a usar por otra central situada aguas abajo o para consumo.

Una central hidroeléctrica cuenta con los siguientes componentes principales (Figura 1.3):

- ✓ Presa. Se encarga de contener el agua de un río y almacenarla en un embalse.
- ✓ Sala de máquinas. Construcción donde se sitúan las máquinas (turbinas, alternadores...) y elementos de regulación y control de la central.
- ✓ Turbina. Elementos que transforman en energía mecánica la energía cinética de una corriente de agua
- ✓ Alternador o generador. Tipo de generador eléctrico destinado a transformar la energía mecánica en eléctrica.
- ✓ Conducciones. La alimentación del agua a las turbinas se hace a través de un sistema complejo de canalizaciones.



**Figura 1.4** Central hidroeléctrica.

Fuente: [https://www1.upme.gov.co/Energia\\_electrica/Atlas/Atlas](https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas)

Actualmente existen diversas clasificaciones de las centrales hidroeléctricas, las más conocidas son las que evalúan por las características de ubicación y por la capacidad de generación. Se clasifican por las características de ubicación en:

**Centrales a pie de presa:** Son aprovechamientos donde existe una presa y su embalse, donde el nivel de agua aumenta, conforme se almacena el caudal líquido aportado por el río. En este tipo de centrales, la energía debida a la posición de la superficie libre es máxima y aprovechada mediante una tubería de presión que la conduce hasta las turbinas. En este tipo de centrales es posible regular el caudal hídrico de aporte con el objetivo de adaptarse a la demanda o de cubrir los requerimientos de energía eléctrica de la red en horas pico, durante las cuales los beneficios por unidad energética producida son superiores. La principal desventaja de este tipo de centrales hidroeléctricas es el elevado costo de construcción debido a las grandes obras civiles a realizarse, este tipo de centrales hidroeléctricas provoca mayor impacto ambiental debido a que la presa básicamente interrumpe el cauce natural de la fuente hídrica.

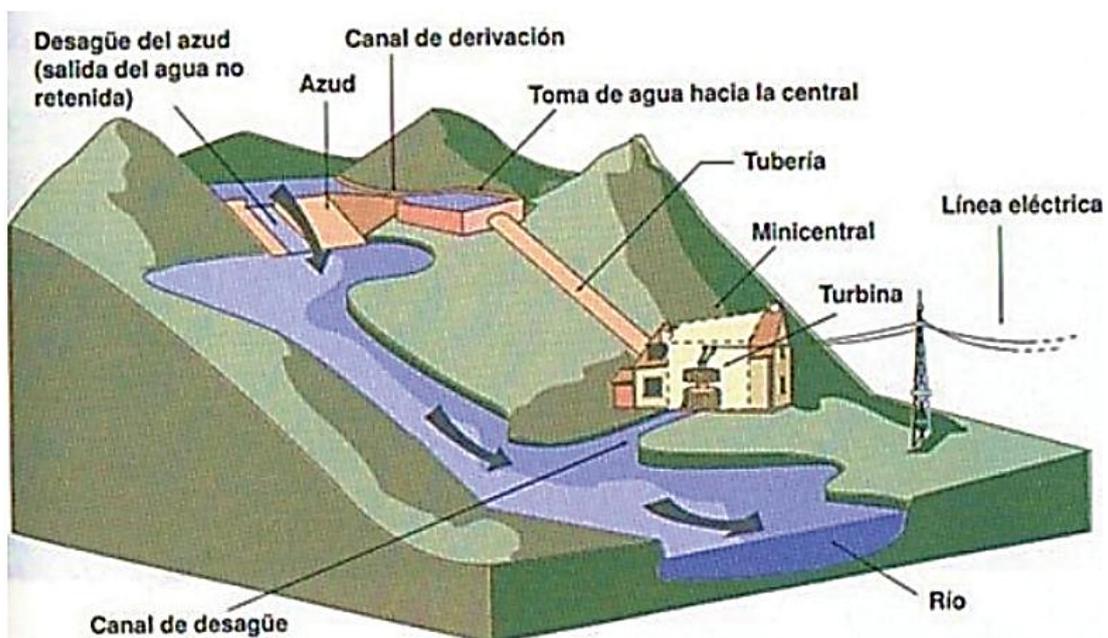
**En canal de riego:** Consiste este tipo de instalaciones en intercalar el equipamiento en el mismo canal utilizado para riego agrícola. Suelen tener una potencia reducida, ya que el salto no es elevado.

**Centrales de agua que fluye o centrales fluyentes:** Son aprovechamiento donde no se regula el caudal derivado, que será aprovechado en el grupo turbo-generator; es decir, los generadores producen electricidad mientras pase el agua por las turbinas. El caudal que debe pasar por las turbinas es igual o superior a su mínimo técnico, es decir, el caudal de diseño de la turbina y se paran cuando el caudal desciende por debajo de ese valor mínimo, es decir el agua o se usa para la generación de electricidad o se descarga por el aliviadero de la central. Este tipo de centrales se caracterizan porque se ubican donde el curso natural que corresponde a la fuente hídrica, normalmente, tiene un importante caudal. En este tipo de centrales se construye una obra de derivación y un canal que desvíe el agua hasta el tanque de carga, donde está conectada la tubería de presión que conduce el agua con la mayor pendiente

posible hasta la casa de máquinas, en donde se instalan los grupos turbogeneradores, aprovechando el desnivel natural disponible entre estos dos puntos. (Figura 1.4)

**Central de regulación:** En este tipo de centrales se embalsa un volumen considerable de agua mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales; el embalse permite regular la cantidad de agua que pasa por las turbinas, con el fin de unificar las variaciones temporales de los caudales afluentes en el río. Las centrales con almacenamiento o regulación exigen, por lo general, una inversión de capital mayor que las de filo de agua, pero facilitan el incremento de la producción energética, disminuyendo el costo de la energía generada. Su utilidad es múltiple:

- Regula la aportación del río, aprovechando al máximo el recurso desde el punto de vista energético.
- Almacena energía en forma de agua para utilizarla cuando el sistema de distribución de energía lo requiera.
- Constituye un desnivel de agua entre la superficie del embalse y el punto de descarga de la central susceptible de ser utilizado energéticamente.



**Figura1.5** Central de agua fluyente.

**Central de Bombeo reversible:** Disponen de dos embalses situados a diferente nivel; cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel a lo largo del día, el agua almacenada en el embalse superior hace girar

el rodete de la turbina asociada a un alternador funcionando como una central convencional generando energía. Después el agua queda almacenada en el embalse inferior. Durante las horas del día en las que la demanda es menor el agua se bombea al embalse superior para que inicie nuevamente el ciclo productivo. Para ello la central dispone de un grupo de motores-bomba o, alternativamente, sus turbinas son reversibles de manera que puedan funcionar como bombas y los alternadores como motores. En conducción de agua potable: Existe también la posibilidad de insertar una central hidroeléctrica, para generar electricidad, en una red en presión de agua, este tipo de SEMH es el que se va a estudiar en este trabajo. Estos aprovechamientos tienen la ventaja de que muchas de las estructuras ya existen, lo que disminuye el coste de la inversión; el impacto ambiental suplementario es prácticamente nulo, y las gestiones burocráticas para la obtención de permisos se simplifican.

De acuerdo con la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), las hidroeléctricas se clasifican en:

- ✓ Micro hidroeléctricas,
- ✓ Mini hidroeléctricas
- ✓ Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCHE),

Según el rango de capacidad de potencia instalada, las micro hidroeléctricas son las unidades que poseen de potencia hasta 50 KW, mientras que las que tienen de 50 a 500 KW se ubican entre las mini hidroeléctricas. Cuando la instalación cuenta desde 500 hasta cinco mil KW clasifica como PCHE. La categoría de central hidroeléctrica es para las que poseen más de cinco mil KW. Las pequeñas centrales, cuyas potencias instaladas alcanzan hasta 10 MW, presentan importantes ventajas sobre las medianas y grandes centrales, que se relacionan principalmente con aprovechamientos que no incluyen regulación de caudales y por lo tanto los impactos ambientales provocados son bajos y normalmente están limitados, en la mayoría de los casos, exclusivamente a las fases constructivas de los mismos. Durante la operación de estas pequeñas centrales prácticamente no se generan impactos negativos. Otra característica importante de los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos se refiere a los menores capitales de inversión directa.



**Figura 1.6:** PCHE GUISA. Provincia Granma. Fuente: Sánchez 2019

### **1.5 El aprovechamiento hidroenergético en cuencas hidrográficas.**

Para poder aprovechar eficientemente la energía hidráulica de las corrientes de agua natural es necesario realizar un estudio hidrológico previo que 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.

En el primer caso se realiza empleando distintos métodos directos e indirectos, entre estos se pueden mencionar los siguientes:

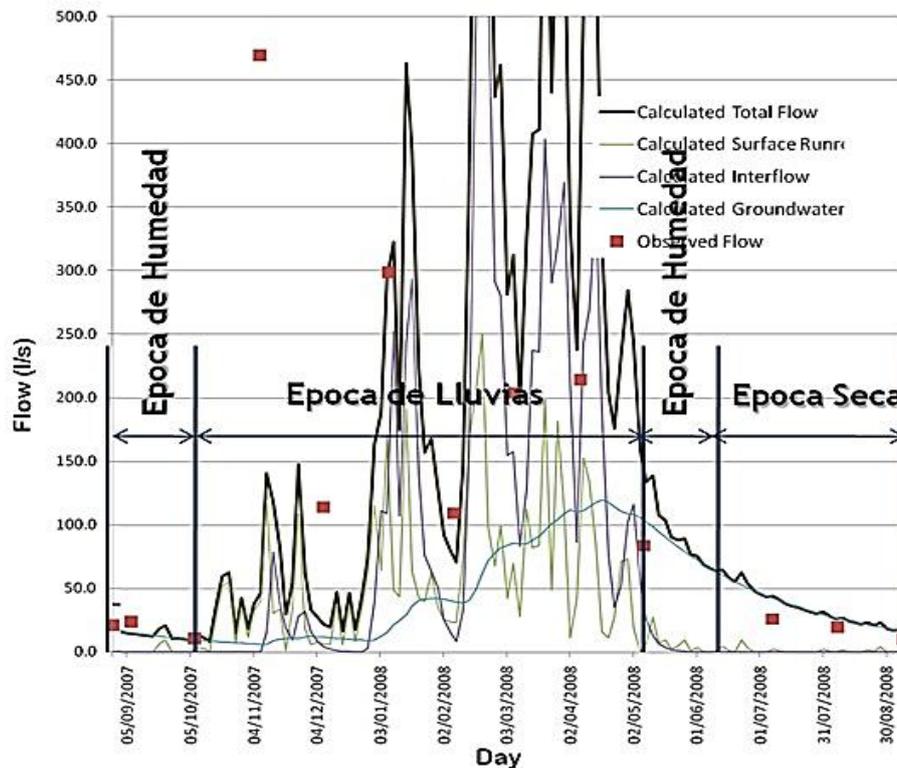
- Método racional
- Método de las curvas numéricas.
- III Variante de José Luis Batista.
- Fórmulas Clásicas.
- Fórmulas Hidrometeorológicas
- Entre otros.

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 caudal ecológico es aquel caudal que permite mantener, como mínimo, la vida de los peces que de manera natural habitan en un río, así como la vegetación de su ribera. Así pues, en aras de la protección del medio ambiente, se estableció la obligación de regular y planificar a conciencia los recursos hidrológicos de las diferentes cuencas, estableciendo un régimen de caudales específicos para cada río en función de sus características particulares.

El caudal ecológico tiene que mantener un adecuado hábitat, temperatura, oxígeno disuelto y química para organismos acuáticos, agua bebible para animales terrestres y humedad de suelos para plantas. La determinación del caudal ecológico se enfoca en la época seca y la época de humedad, 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”, 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. (Figura 1.7)



**Figura 1.7.** 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:

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

Otra forma está descrita en el Memorando Múltiple 018-2012-ANA-DCPRH-ERH-SUP se define el caudal ecológico y sus metodologías para evaluarlo. Los principales cálculos a realizar son (según numeración del documento):

- ✓ Para cursos de agua con caudales medios anuales menores a 20 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s y menores o iguales a 50 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 se procede a determinar el caudal óptimo de explotación hidroenergética que sería de la manera siguiente:

$$Q_o = Q_m - Q_{ec} \quad (1.1)$$

Donde:

Q<sub>o</sub> ---Caudal óptimo aprovechable

Q<sub>m</sub> ---Caudal medio de la cuenca

Q<sub>ec</sub> ---Caudal ecológico

### **1.6 Equipos empleados en la generación de hidroenergía.**

Los antecedentes en equipos de generación hidroeléctrica se encuentran en la rueda hidráulica, que se transformó en la gran máquina de la Edad Media, utilizándose en molinos harineros, aserraderos de madera, martillos de forja, bombeo de agua, para accionar fuelles en talleres de fundición, para la batanadura de la lana, para exprimir la caña de azúcar (primer paso para la fabricación del azúcar); incluso fueron usadas ruedas hidráulicas para ayudar en el proceso de extracción de los minerales en las famosas minas del Potosí, en Bolivia (minas de plata puestas en explotación desde 1545). En la edad media la potencia máxima de la rueda, fabricada con madera, aumentó de 3 a 50 CV. En este tiempo se las empleó tanto en posición vertical, como en posición horizontal para mover directamente dispositivos mecánicos. Siendo una máquina de tan diversa aplicabilidad, a lo largo de la historia muchos se interesaron en el desarrollo de la rueda hidráulica. Hasta el famoso Leonardo da Vinci diseñó una rueda que era capaz de llenar una torre de agua.

El primer intento de formular la base teórica para el diseño de ruedas hidráulicas en el siglo XVIII corresponde al ingeniero civil británico John Smeaton, que construyó por vez primera grandes ruedas hidráulicas de hierro

colado, demostró que la rueda de empuje superior era más eficaz. Sin embargo, el ingeniero militar francés Jean Victor Poncelet diseñó una rueda de empuje inferior cuyas palas curvadas aumentaban el rendimiento casi un 70%. El uso de ésta máquina se extendió rápidamente. (Bibliografía Complementaria\PONCELET.htm)

Otro ingeniero militar francés, Claude Burdin, inventó el término turbina, como parte de un análisis teórico en que se daba una gran importancia a la velocidad de rotación. Benoit Fourneyron, un alumno de Burdin en la Escuela de Minería de Saint Étienne, diseñó y construyó ruedas que alcanzaban velocidades de rotación de 60 rpm. (Revoluciones por minuto) o más y que proporcionaban hasta 50 CV en las factorías metalúrgicas francesas. Por último, Fourneyron construyó turbinas que trabajaban a 2300 rpm, desarrollando 60 CV y un rendimiento de más del 80%. A pesar de esta eficiencia excepcional, la turbina de Fourneyron tenía algunos inconvenientes causados por el flujo centrífugo del agua que la atravesaba. Esto provocaba problemas si se reducía el flujo de agua o su carga. (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009)

Para 1850, los británicos habían construido un gran número de ruedas hidráulicas para uso industrial, que producían de 65 Kw. a 190 Kw de potencia, con diámetros entre 7 y 12 metros. Algunas de estas ruedas fueron dejadas en funcionamiento por más de 100 años. La construcción de tales máquinas sería muy costosa ahora; pero ruedas más pequeñas (en un rango de 0.3 a 0.5 Kw.) todavía son consideradas económicamente viables en algunos lugares del sur de ese país. Aunque en la actualidad sea muy raro encontrarse con estos usos, siguen siendo igualmente útiles e interesantes pues los materiales naturales locales siguen siendo fáciles de manejar y baratos. Aunque es posible que estas ruedas hidráulicas hayan sido reemplazadas por maquinaria mucho más eficiente, que en algunos casos las han convertido en obsoletas, para muchos de los casos sigue siendo suficiente esta antigua pero probada y eficaz tecnológica. (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009) (Figura 1.6)



**Figura 1.8** El más antiguo de los motores hidráulicos construido en una rueda.

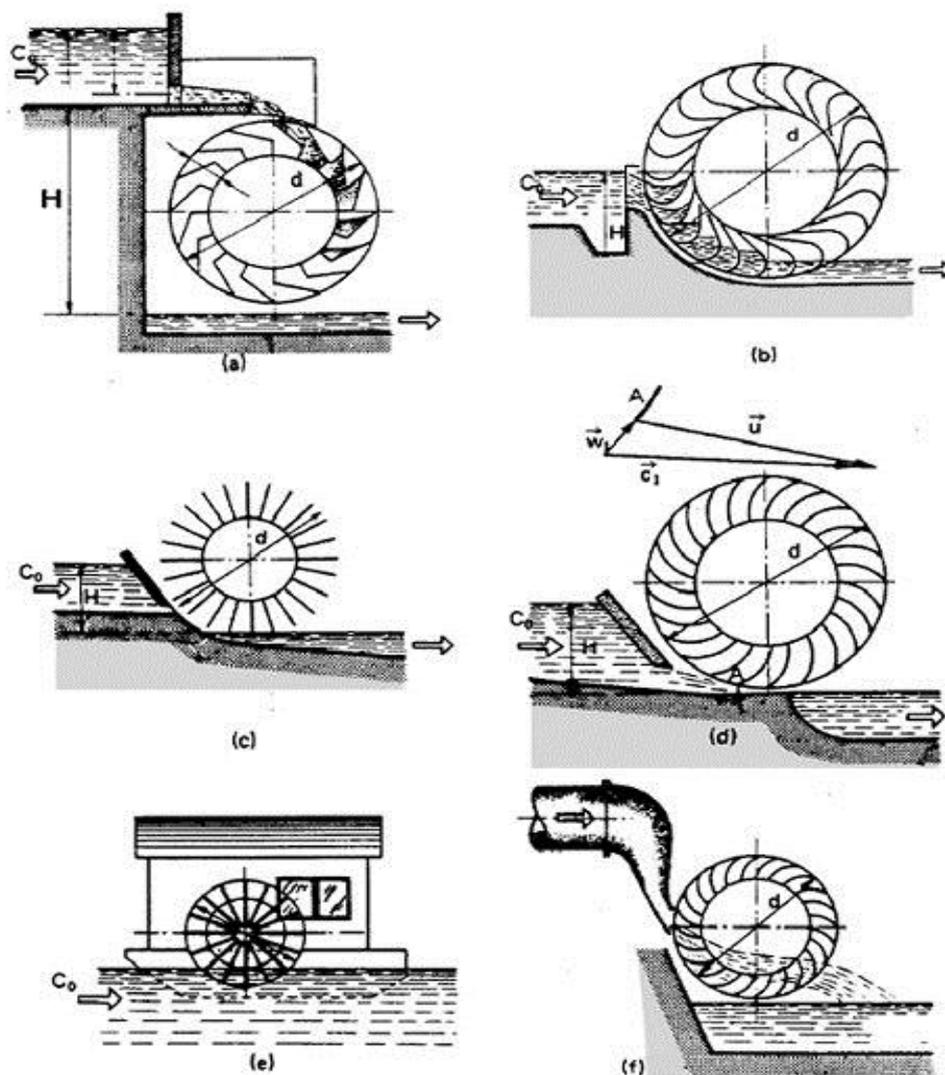
Existen muchos tipos de ruedas hidráulicas, pero en cualquier caso el funcionamiento es siempre el mismo: mediante un canal se desvía cierta cantidad de agua del río, la cual se hace entrar a gran velocidad y en caudal suficiente en la rueda. Al llegar, el agua choca contra las palas de una rueda hidráulica que transmite a lo largo de su eje el movimiento a otras piezas tales como poleas, engranajes o bielas que comunican el giro de la rueda hidráulica a las muelas, los martinetes o cualquier otro mecanismo que gire u oscile.

Dependiendo de su funcionamiento y al mecanismo de llegada del agua, las ruedas hidráulicas verticales se clasifican en las siguientes (Figura 1.8):

- Rueda hidráulica con canal de alimentación superior.- La rueda gira empujada por la energía potencial y cinética del agua que llega desde arriba, permitiendo una mayor utilización de la energía del agua disponible. Se usa en lugares donde hay alturas suficientes y el caudal es muy poco. El rendimiento es bastante alto (80 a 90 %).
- Ruedas hidráulica con canal de alimentación en la altura del eje.- El agua entra en la rueda en la altura del eje. Su eficiencia es menor que en el caso de las ruedas con canal de alimentación superior. Se necesita construir un pasaje angosto entre el canal de alimentación y la rueda para incrementar la energía cinética. Se usa este tipo de rueda en casos donde hay muchos cambios en el nivel del agua de entrada y de salida.
- Rueda hidráulica con canal de alimentación inferior.- Este es el tipo de rueda más simple. Estas, aprovechan solo la energía cinética de la corriente del agua. Su rendimiento es muy bajo (15 a 20 %) en el caso de un canal de alimentación forzado.

- Rueda hidráulica reversible.- Es una rueda hidráulica con canal de alimentación superior con la posibilidad de cambiar el sentido de rotación, esto permite que sea utilizada para levantar cargas.

Con el tiempo se desarrollaron diferentes mecanismos para accionar los dispositivos mecánicos movidos por las ruedas hidráulicas. Por ejemplo: Para detener el movimiento de las ruedas hidráulicas frecuentemente se utilizan compuertas que controlan el flujo del agua que va a las aspas. Para desacoplar algunas maquinarias, las correas son empujadas hacia poleas que rotan libremente.



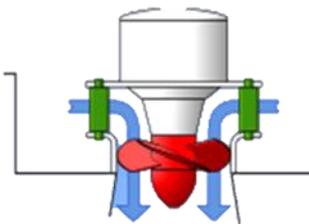
**Figura 1.9** Diferentes tipos de ruedas hidráulicas: a) alimentación superior (rueda gravitatoria pura) b) alimentación lateral; c) de paletas planas; d) de impulsión inferior; e) paletas de alimentación inferior; f) turbina Banki.

### 1.7 Las Turbinas Hidráulicas.

Turbina, motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía proveniente de una corriente de agua, de vapor de agua o de gas. El elemento

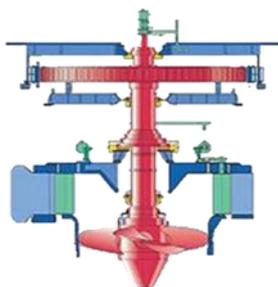
básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice. Las turbinas se clasifican en turbinas hidráulicas o de agua, turbinas de vapor y turbinas de combustión. Hoy la mayor parte de la energía eléctrica mundial se produce utilizando generadores movidos por turbinas. Los molinos de viento que producen energía eléctrica se denominan turbinas de viento. Los tipos de turbinas más significativos que generalmente se instalan en una central, responden a tres tipos:

- **Turbina Kaplan:** son turbinas axiales, que tienen la particularidad de poder variar el ángulo de sus palas durante su funcionamiento. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua pequeños y con grandes caudales.(Turbina de reacción) (Figura 1.10)



**Figura 1.10.** Turbina Kaplan Fuente: Sánchez 2019

- **Turbina Hélice:** tienen las válvulas regulables como las turbinas Kaplan, pero a diferencia de estas, el ángulo de sus palas es fijo. En lugar de la variación del ángulo, se puede cambiar la velocidad del rotor. Así, de la vista hidráulica se vuelve el mismo efecto como con la variación de palas.<sup>2</sup>



**Figura 1.11.** Turbina de hélice Fuente: Sánchez 2019

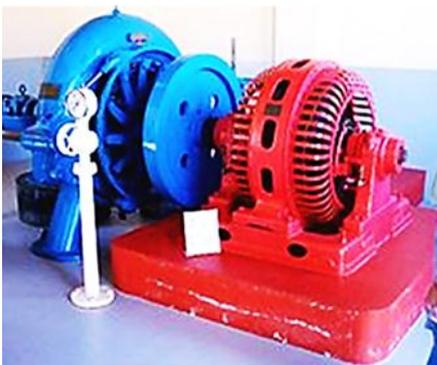
- **Turbina Pelton:** Son turbinas de flujo transversal, y de admisión parcial. Directamente de la evolución de los antiguos molinos de agua, y en vez de contar con álabes o palas se dice que tiene cucharas. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua muy grandes, pero con caudales pequeños.(Turbina de acción) (Figura 1.12)



**Figura 1.12:** Rodete de una Turbina Pelton Fuente:

Sánchez 2019

- **Turbina Francis:** Son turbinas de flujo mixto y de reacción. Existen algunos diseños complejos que son capaces de variar el ángulo de sus álabes durante su funcionamiento. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua medios y caudal medios.



**Figura 1.13:** Turbina Francis acoplada a un generador

Fuente: Sánchez 2019

- **Turbina Ossberger / Banki / Michell:** La turbina OSSBERGER es una turbina de libre desviación, de admisión radial y parcial. Debido a su número específico de revoluciones cuenta entre las turbinas de régimen lento. El distribuidor imprime al chorro de agua una sección rectangular, y este circula por la corona de paletas del rodete en forma de cilindro, primero desde fuera hacia dentro y, a continuación, después de haber pasado por el interior del rodete, desde dentro hacia fuera.



**Figura 1.14:** Turbina Ossberger acoplada a un generador

Fuente: Sánchez 2019

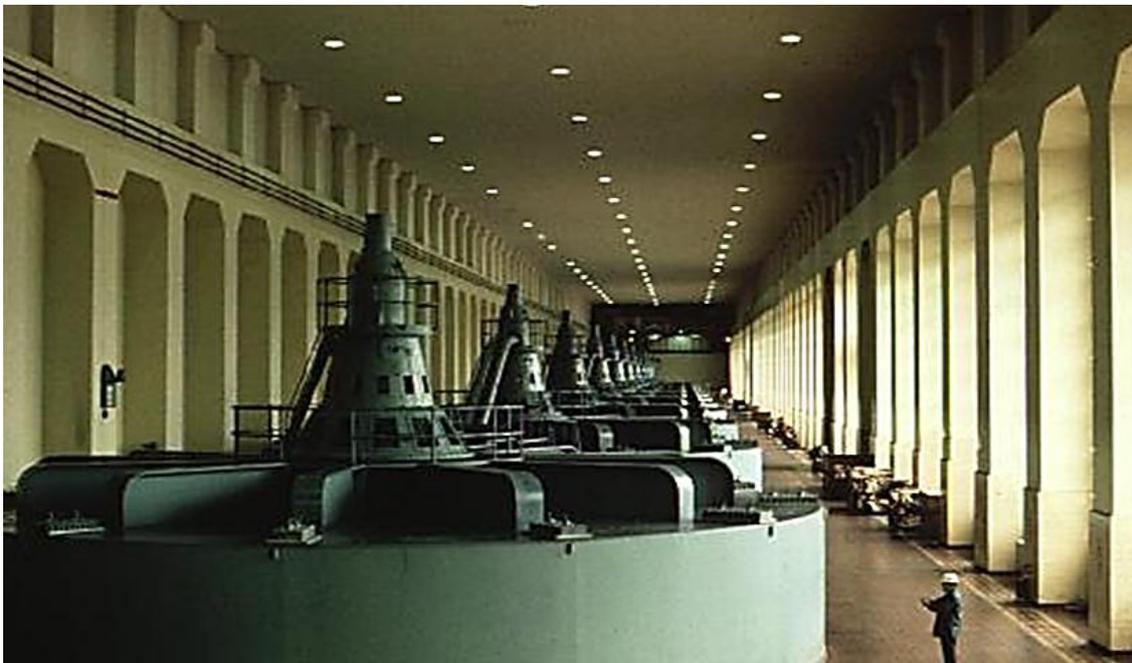
- **Turbina Turgo:** Es una turbina hidráulica de impulso diseñada para saltos de desnivel medio. El rodete de una Turgo se parece a un rodete Pelton partido por la mitad. Para la misma potencia, el rodete Turgo tiene la mitad del diámetro que el de un rodete Pelton y dobla la velocidad específica.

Las turbinas hidráulicas se emplean para aprovechar la energía del agua en movimiento. La turbina Kaplan es semejante a la hélice de un barco. Las amplias palas o álabes de la turbina son impulsadas por el agua a presión liberada por una compuerta. La rueda Pelton es un modelo del siglo XIX cuyo funcionamiento es más parecido al de una rueda hidráulica tradicional. La rueda gira cuando el agua procedente del conducto forzado golpea sus paletas o álabes. El agua sale a gran presión por la tobera e impulsa los álabes que hacen girar un eje.

Para mantener los parámetros de generación de electricidad constantes en una instalación hidroeléctrica, la velocidad de la turbina se debe mantener constante, independientemente de las variaciones de la presión o del caudal del agua que las mueve. Esto requiere un sistema de control que, tanto en la turbina de Francis como en la de Kaplan, se basa en la variación del ángulo de las palas. En las instalaciones de ruedas Pelton, el flujo del agua se controla abriendo y cerrando las boquillas eyectoras. En este caso, se utiliza una boquilla de derivación de descarga, dado que los cambios rápidos de corriente en canales de caída largos podrían producir aumentos repentinos en la presión, llamados golpes de ariete (martillos de agua), que pueden ser muy dañinos.

Con estos ajustes, se mantiene constante el flujo de agua a través de las boquillas. Las boquillas de descarga, se cierran con mucha lentitud para evitar los golpes de ariete.

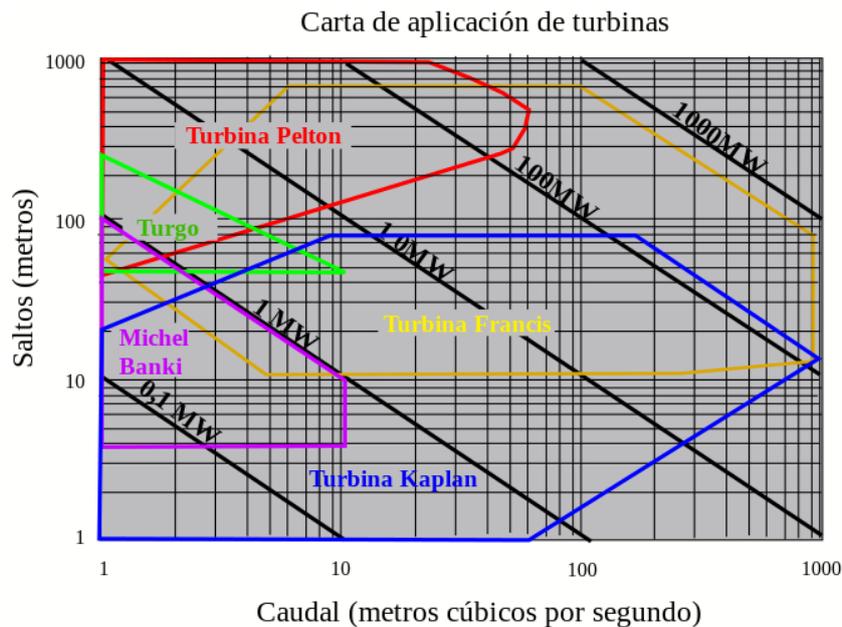
Se han diseñado turbinas que actúan como bombas cuando funcionan a la inversa, invirtiendo el generador eléctrico para que funcione como un motor. Dado que no es posible almacenar la energía eléctrica de forma económica, este tipo de bombas-turbina se utiliza para bombear agua hacia los embalses, aprovechando la energía eléctrica generada por las centrales nucleares y térmicas durante las horas de poco consumo. El agua embalsada se emplea de nuevo para generar energía eléctrica durante las horas de consumo elevado. En los últimos años se han desarrollado turbinas para caídas de hasta 600 m y con capacidades de más de 400 MW.



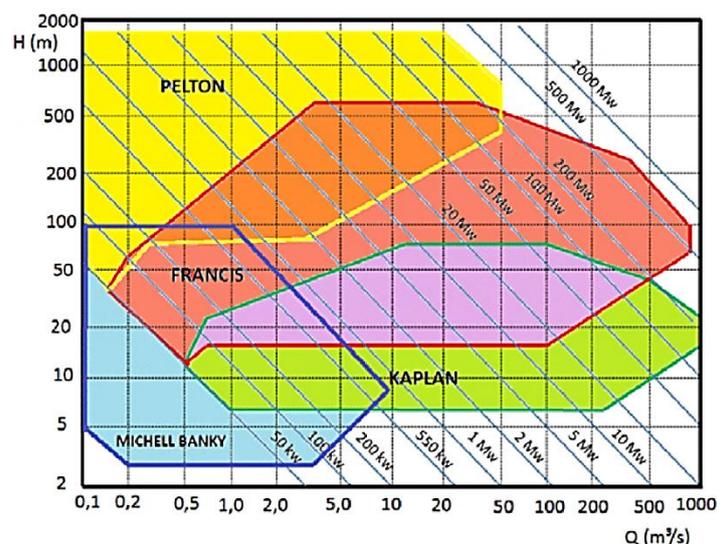
**Figura 1.15** Generadores eléctricos tipo turbina Kaplan en una hidroeléctrica.

Los equipos electromecánicos son las turbinas con su válvula de guarda y generador, equipos eléctricos, celdas, cuadros, protecciones, transformadores, contadores y líneas eléctricas de conexión.

Para seleccionar correctamente el tipo de turbina hidráulica que se montará en la central hidroeléctrica, se evalúan los llamados ábacos de selección, que refieren a tipos de turbinas y el caudal que estas pueden aprovechar. (Figura 1.16)



**Figura 1.16** Carta para seleccionar turbinas hidráulicas en función del caudal y el salto. Fuente: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ea/Turbinas.svg/250px-Turbinas.svg.png>



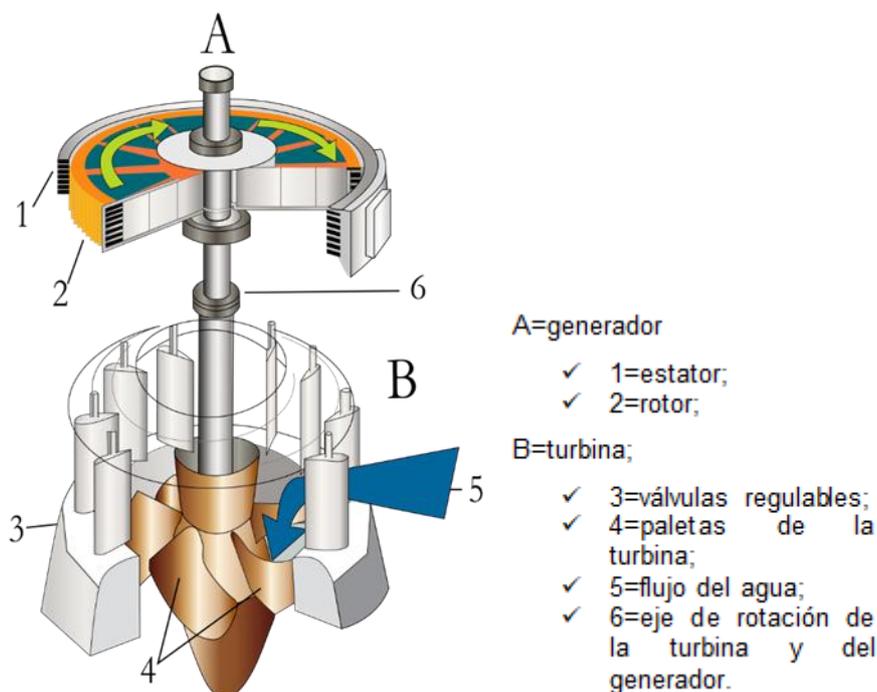
**Figura 1.17.** Abaco para determinar el tipo de turbina a emplear. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ea/Turbinas.svg/250px-Turbinas.svg.png>

### 1.8 El Generador eléctrico.

El equipo eléctrico principal de una Central Hidroeléctrica es el generador que, arrastrado por una turbina, es el encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica que se entrega a la red de distribución o transporte para su consumo.

Atendiendo a la configuración física de la máquina, ésta puede ser de eje vertical u horizontal dependiendo del tipo de turbina y configuración del salto. Su velocidad suele estar comprendida entre las 100 y las 750 rpm. Atendiendo

a la tecnología de la máquina, éstas pueden ser asíncronas o síncronas. Las asíncronas son simples motores de inducción que funcionan arrastrados por una turbina. Este tipo de máquina no tiene buen rendimiento pero, a cambio, es más barata que una síncrona, más robusta y fiable. En el caso de generadores síncronos, al ser las turbinas hidráulicas máquinas lentas, son de polos salientes y, por tanto, cuanto menor velocidad mayor diámetro y nº de polos. Este tipo de generadores proporciona mayor rendimiento a costa de mayor inversión y complejidad. Para centrales mini hidráulicas de pequeña potencia se suelen emplear generadores asíncronos. El límite de potencia para pasar a máquina síncrona es fruto del estudio particular de cada salto; estudio económico que debe ligar el rendimiento y la inversión (ambos más bajos en una máquina asíncrona). Orientativamente, el límite se puede establecer en 1 o 1,5 MW. Los grupos de potencia inferior a este límite serán asíncronos y los de potencia superior generalmente serán síncronos.



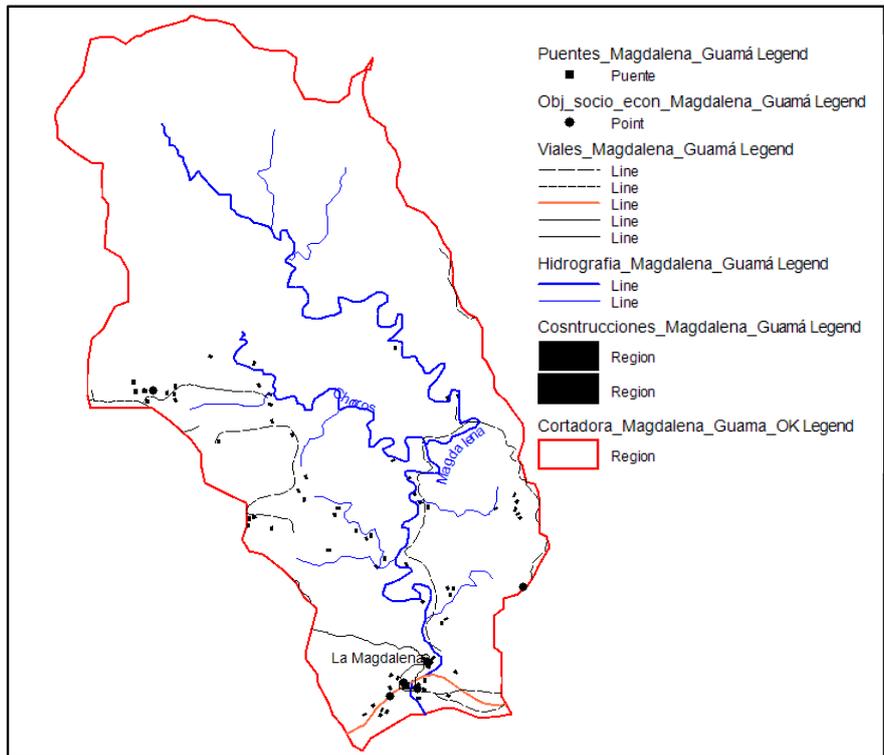
**Figura 1.18** Turbina hidráulica y generador eléctrico, vista en corte.

Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/Water\\_turbine.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/Water_turbine.svg)

# Capítulo 2



hidrográficas son pequeñas y en ocasiones aparecen diminutas cuencas que pertenecientes a ríos intermitentes. El río es cortos, de escaso caudal y torrenciales. En la época de lluvia crecen y pueden arrastrar con todo lo que encuentren a su paso, incomunicando diversas comunidades, es uno de los ríos más importantes en esta comunidad. Durán, 2018



**Figura 2.2.** Mapa de la cuenca hidrográfica del río La Magdalena en el municipio Guamá.

**Tabla 2.1.** Características morfométricas generales de la cuenca La Magdalena. Fuente: Durán, 2018.

Cuenca	Coordenadas		Ac km <sup>2</sup>	Hm M	Yc o/oo	Yr o/oo	Dd km/km <sup>2</sup>	Lr km	H <sub>1</sub> m	H <sub>2</sub> m	CLASIF.
	N	E									
Río La Magdalena Hasta el cierre seleccionado	146.5	605.6	138	144	184	9.9	1.06	27.0	220	0	P

Leyenda:

A - Área de la cuenca en km<sup>2</sup>

Hm- Altura media de la cuenca en m

Lr – Longitud del río en Km

H1 – Cota del nacimiento del río en msnm

H2- Cota de la desembocadura del río msnm

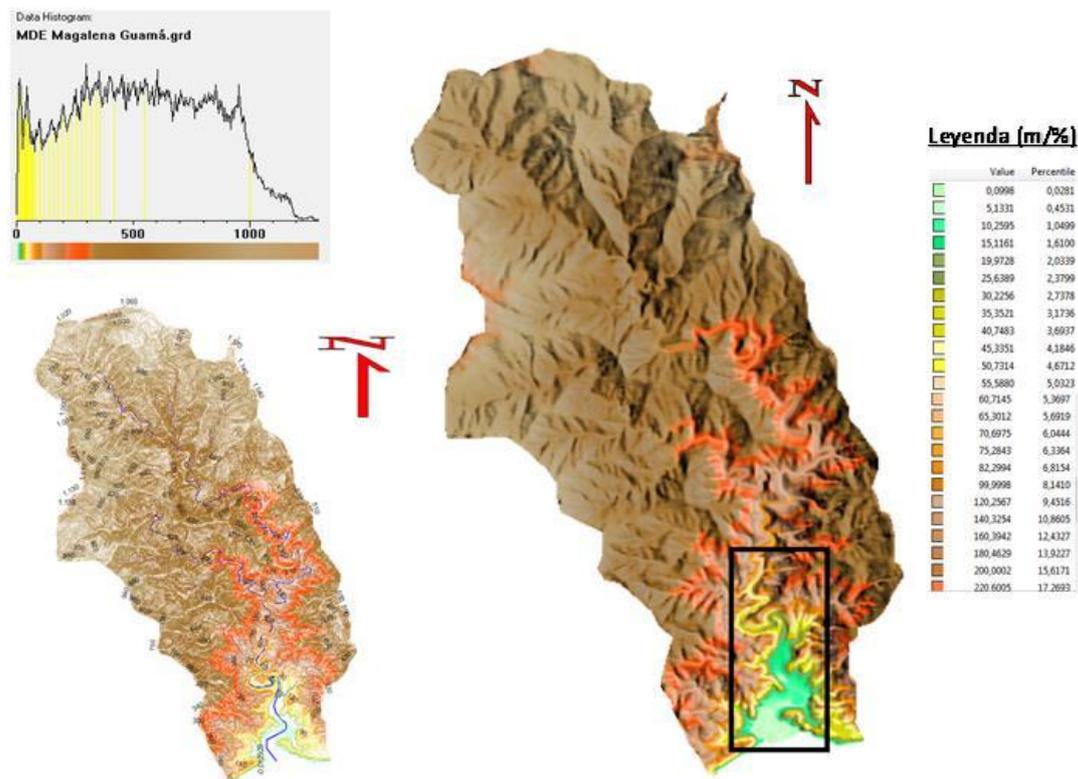
Yr- Pendiente del río

Yc – Pendiente media de la cuenca

Dd – Densidad de Drenaje Km/Km<sup>2</sup>

Se extiende por una estrecha franja de 98.7 kilómetros cuadrados de superficie y su población asciende aproximadamente a 1419 habitantes en 2020, distribuidos en tres asentamientos rurales. La comunidad Magdalena, fue creada entre los años 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.

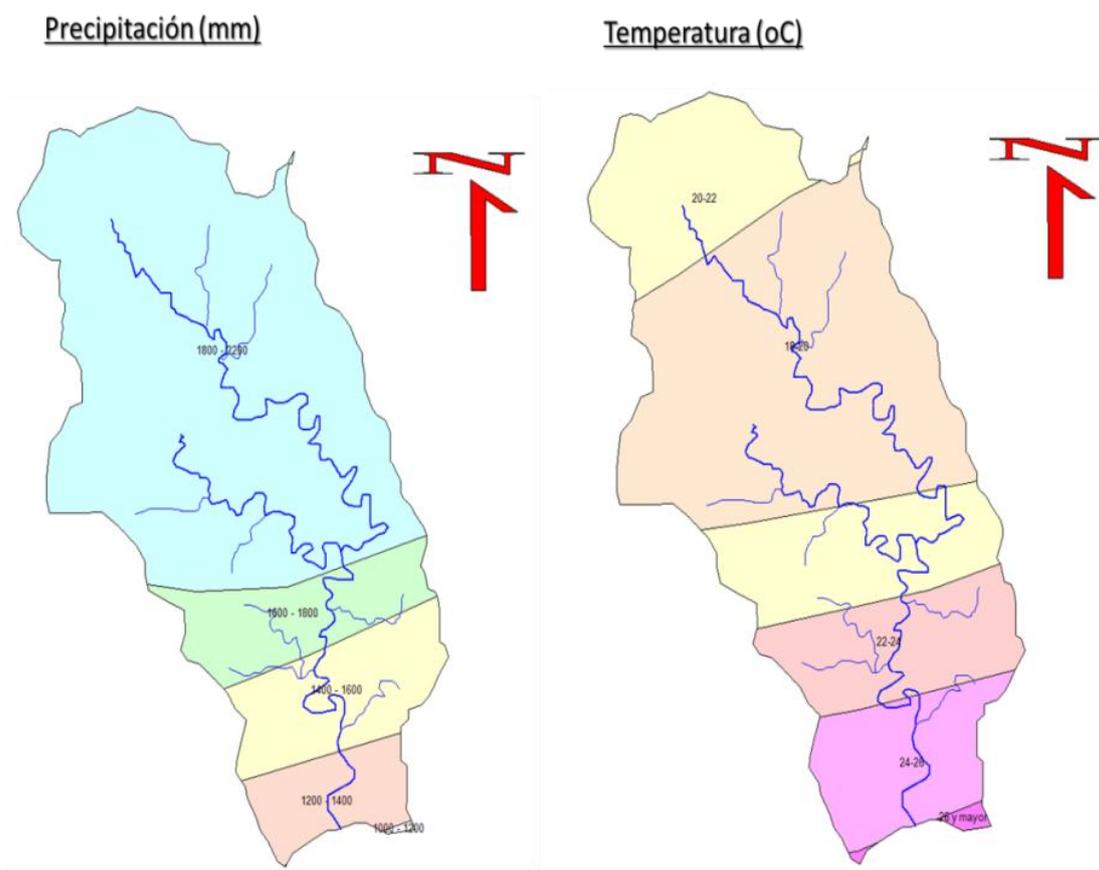
Este territorio tiene un relieve montañoso. El elevado grado de disección vertical y horizontal del territorio y el predominio de superficies con fuertes pendientes, influyen decisivamente en las posibilidades de mecanización, los costos de producción, las condiciones de trabajo, las limitaciones de las maquinarias agrícolas, los sistemas de irrigación y los costos de explotación. (Figura 2.3)



**Figura 2.3.** Imagen del mapa de relieve y modelo digital de elevación de la cuenca hidrográfica del río La Magdalena en el municipio Guamá. Se especifica en recuadro área de trabajo del proyecto en la comunidad de igual nombre. (Geocuba. 2010)

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. (Figura 2.4)



**Figura 2.4.** Imágenes del mapa de precipitaciones y temperatura de la cuenca hidrográfica del río La Magdalena en el municipio Guamá. (Geocuba. 2010)

Debido a las características del territorio y a la presencia de la Sierra Maestra, la red hidrográfica es pequeña, y en ocasiones el río es corto, intermitente en sus últimos 5 km de recorrido en su parte baja. En la época de lluvia el río crece, y puede arrasar con todo lo que encuentre a su paso, trasladando una elevada cantidad de sedimentos y fragmentos rocosos hacia su parte baja y la costa. (Figura 2.5).



**Figura 2.5.** Imágenes del río La Magdalena en el municipio Guamá: Crecida experimentada en la zona baja durante las lluvias intensas de Octubre 2020 (Arriba). Imágenes del Río en diciembre 2020 (Abajo).

En la zona se han identificado 641 especies, de ellas 483 invertebrados y 158 vertebrados. Dentro del área se encontraron 181 especies endémicas lo que representa un 28 % del total. El origen de la flora de la Sierra Maestra, se debe en lo fundamental a las migraciones procedente del este, la flora en las montañas se supone que es de los macizos montañosos de Baracoa y su flora costera proviene de la costa sur de la provincia de Guantánamo, todas estas migraciones deben haberse realizado en el cuaternario. La rica y valiosa flora se ubica dentro de la regionalización florística de Cuba aunque existen algunas especies de planta que están en peligro de extinción.

## **2.2 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, climatología extremas de frío o calor, tipo de electrodomésticos que se utilizan más frecuentemente, tipo de calentador de agua que haya 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 períodos. (MINEM, 2021).

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 (Tabla 2.2), las luminarias y los gastos internos del sistema de cableado (MINEM, 2021).

**Tabla 2.2** Consumo promedio de los principales equipos electrodomésticos mensualmente en Cuba. Fuente: MINEM, 2021.

Equipo	Potencia promedio (Watts)	Consumo en 1 hora (kilo Watt hora)	Consumo promedio en 1 día (kilo Watt hora)	Consumo promedio en 1 mes (kilo Watt hora)
lámpara 20 W	20	0.02	0.16	4.8
lámpara 18W	18	0.018	0.144	4.32
refrigerador	325	0.325	2.6	78
lavadora automática	1850	1.85	8.325	66.6
Aire Acondicionado	1550	1.55	12.4	372
lavadora semi-automática	600	0.6	3.18	25.44
televisor	275	0.275	1.705	51.15
microwave	825	0.825	0.4125	12.375
cocina de inducción (1 hornilla)	650	0.65	0.325	9.75
sandwichera	925	0.925	0.37	11.1
calentador de ducha	2900	2.9	3.335	100.05
computadora	650	0.65	3.25	97.5
laptop	600	0.6	3	90
freezer	1450	1.45	11.6	348
equipo de música	600	0.6	1.2	12

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 tanto para calcular la demanda eléctrica diaria de la comunidad se realiza multiplicando la demanda de una vivienda por esta cifra:

$$Ddc = Cv * 6.16 \text{ kW/h} = 1386 \text{ kW/h} \quad (1.2)$$

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 consume eléctrico local. Para ello se toman los valores promedio de crecimiento poblacional y de correlacionan con la cantidad de viviendas que necesitará 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 3690 habitantes. Por tanto la cantidad de viviendas futuras sería:

$$Vcf(20 \text{ años}) = \frac{Vca * Pf}{Pa} = 585 \text{ viviendas} \quad (1.3)$$

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. En este caso se hace un pronóstico de la demanda futura. Este pronóstico es incierto pero resulta necesario a efectos de valorar la sostenibilidad del proyecto hidroenergético en proceso de diseño. no hay nada mejor. De igual manera se multiplica el valor de la demanda actual para una vivienda por la cantidad de viviendas futuras calculada:

$$Ddfc = Cv_f * 6.16 \text{ kW/h} = 3603.6 \text{ kW/h} \quad (1.4)$$

Donde:

Ddc --- Demanda diaria de la comunidad

Cv ----- Cantidad de viviendas

### **2.3 Determinación del caudal óptimo aprovechable para la producción de hidroenergía.**

La subcuenca específica corresponde al cierre del río el 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 significación local, por cuanto 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 1.1.

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 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:

$$W = \frac{C * P * A}{1000} \quad (1.5)$$

El caudal se obtiene sustituyendo el valor de escurrimiento en la ecuación 1.6:

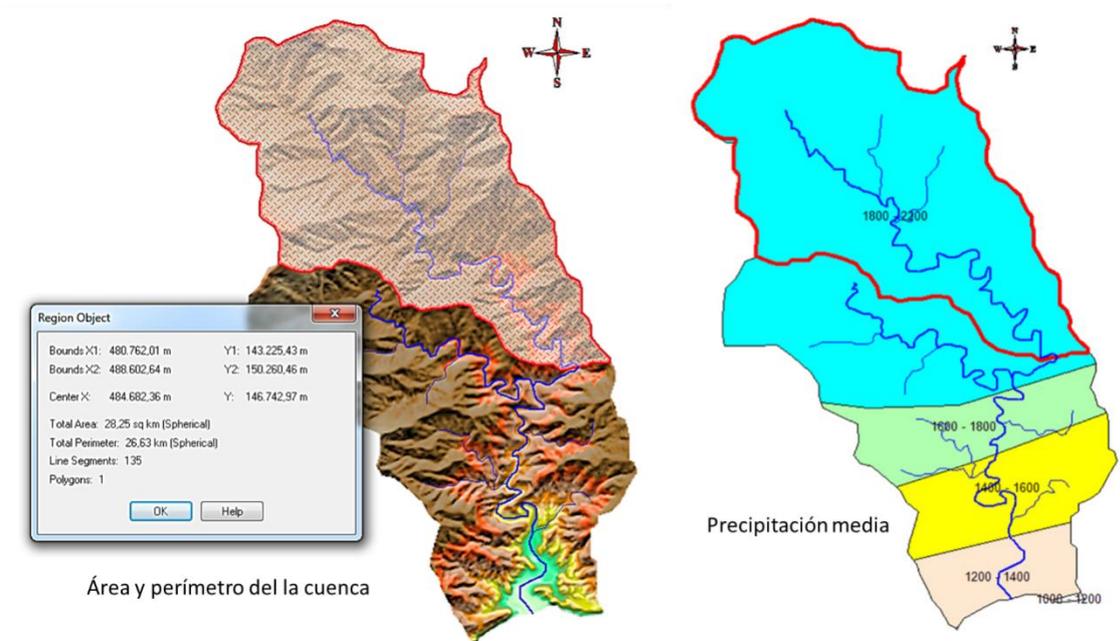
$$Q_0 = W_0/31.54 \quad (1.6)$$

El módulo de escurrimiento se determina a partir de la ecuación 1.7 sustituyendo los valores de caudal y área de la cuenca:

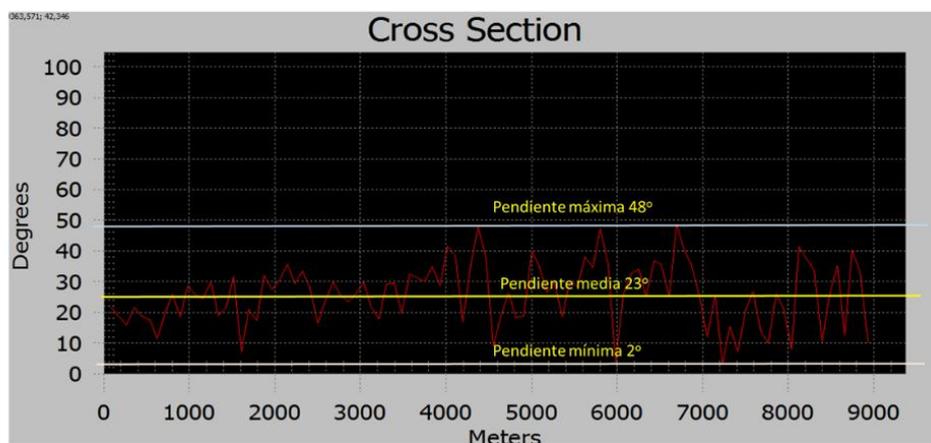
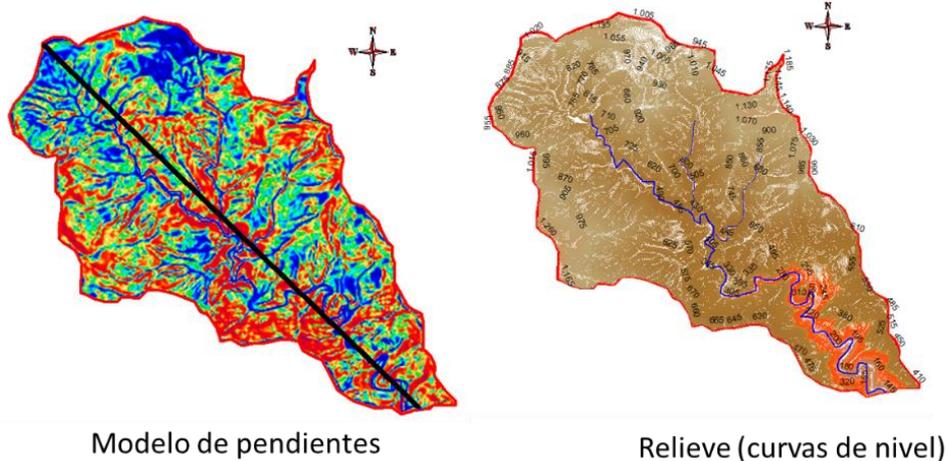
$$M_0 = (Q_0/A_c)*1000 \quad (1.7)$$

Se sustituyen los valores de escurrimiento y área de la cuenca en la ecuación 1.8 y se obtiene la lámina de escurrimiento:

$$Y_0 = (W_0/A_c)*1000 \quad (1.8)$$



**Figura 2.6** Imagen que muestra la obtención de datos preliminares con el uso de Sistemas de Información Geográfica MAPINFO de forma directa: área de la cuenca, perímetro, coordenadas. Se significa el cierre de la subcuenca para la ubicación de la central hidroeléctrica.



**Figura 2.7** 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

Se obtiene el valor del coeficiente de escurrimiento (C), de la tabla 1.3 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.

**Tabla 2.3** Valores del coeficiente de escurrimiento según el método racional.

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
<b>Bosque</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
<b>Pastizales</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
<b>Terrenos cultivados</b>			
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 Km<sup>2</sup>
- Coeficiente de escurrimiento (c) = 0.30 (Suelo grueso con vegetación de bosques tropicales).

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

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

$$M_0 = (0.54/28.25)*1000 = \mathbf{19.11}$$

$$Y_0 = (16.95/28.25)*1000 = \mathbf{600}$$

Debido a que la cuenca presenta un caudal medio anual menor a 20 m<sup>3</sup>/s

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

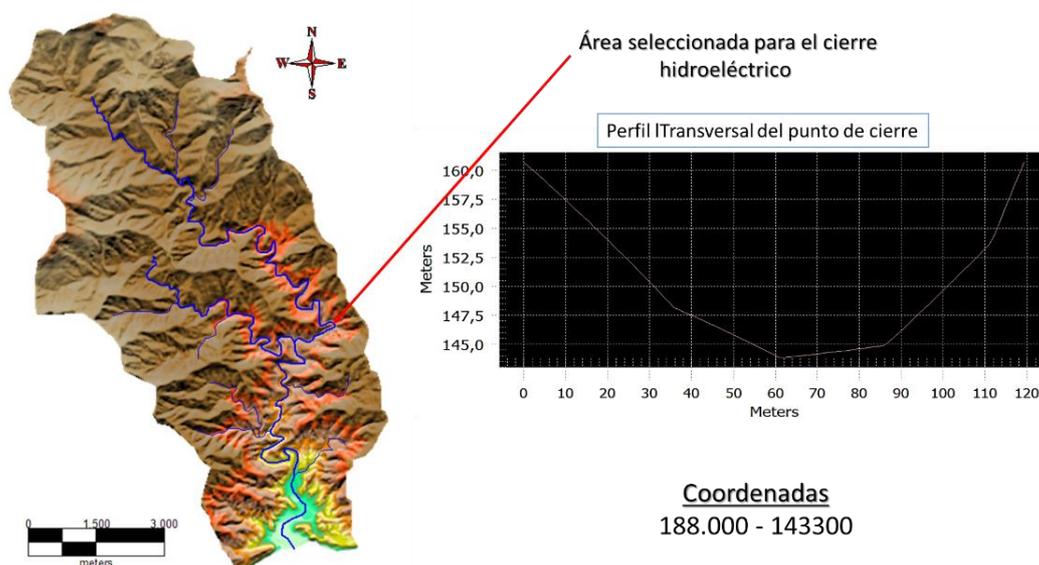
$$Q_{op} = 0.54 - 0.08 = 0.46 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Tabla 2.4** Resumen los cálculos hidrológicos preliminares de la sub cuenca La Magdalena en el área de cierre hidroeléctrico calculados por el método de las fórmulas clásicas.

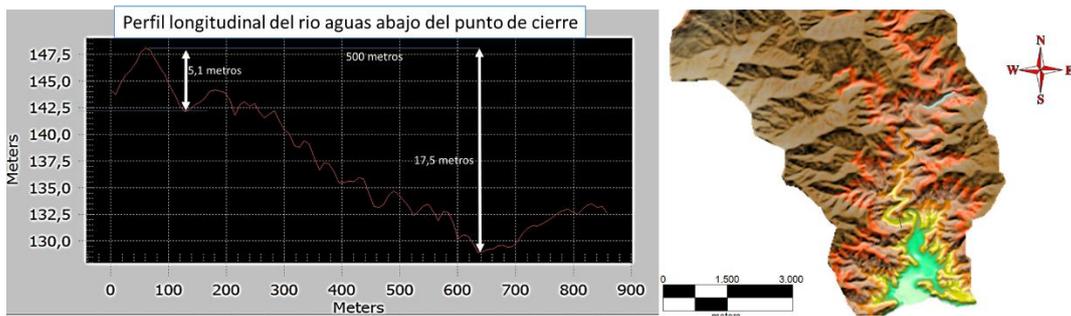
ÁREA (KM <sup>2</sup> )	PERÍMETRO (KM)	PRECIPITACIÓN (MM)	<u>W</u>	<u>Q<sub>M</sub></u> (M3/S)	<u>M<sub>O</sub></u>	<u>Y<sub>O</sub></u>	<u>Q<sub>EC</sub></u> (M3/S)	<u>Q<sub>OP</sub></u> (M3/S)
<u>28.25</u>	<u>26.63</u>	<u>2000</u>	<u>16.95</u>	<u>0.54</u>	<u>19.11</u>	<u>600</u>	<u>0.081</u>	<u>0.46</u>

#### 2.4 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 tres primeras variantes 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 (Figuras 2.8 y 2.9). 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.



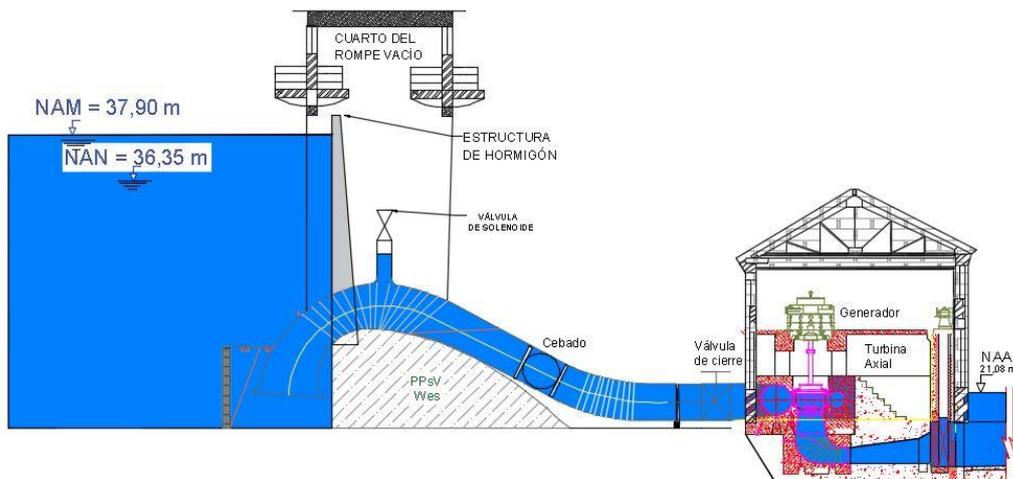
**Figura 2.8.** Área seleccionada para el cierre hidroeléctrico mostrando un perfil transversal.



**Figura 2.9** Perfil longitudinal del río aguas abajo del punto de cierre.

A continuación se describen las posibles variantes de construcción de cierre hidroeléctrico por derivación:

- **Variante 1:** cierre con dique de hormigón armado y aliviadero automático, además de colocación de un sifón lateral conectado a una casa de máquinas con instalación de turbina generadora de energía eléctrica (Figura 2.10). Esta variante se considera como una de las más seguras, teniendo en cuenta el alto peligro generado por las crecidas del río, aislando la generación del curso principal del cauce.



**Figura 2.10.** Esquemas ejemplo posible a emplear con sifón lateral y turbinas axial tipo Kaplan.

- **Variante 2:** Cierre con dique de hormigón armado y aliviadero automático, conectado a un canal de salida lateral, e instalación de hidrogenación para luego reincorporar al río (Figuras 2.11).



**Figura 2.11.** Imagen ejemplo de un dique de hormigón con aliviadero automático e instalación hidroenergética en canal lateral Imagen de un dique de cierre con aliviadero automático e instalación lateral de hidrogenación (arriba). Ejemplos de esquemas posibles a emplear con turbinas tipo Kaplan o Pelton (abajo).

- **Variante 3:** cierre con dique de hormigón armado y aliviadero automático, conectado a un canal de salida con rejillas que funcionan como filtros desarenadores y luego a una casa de máquinas con turbinas de cuchara a filo de agua o en forma espiral para luego reincorporar al río (Figura 1.18).





**Figura 2.12.** Esquema propuesto para el cierre en el río y ejemplo de casa de maquina con turbinas a filo de agua.

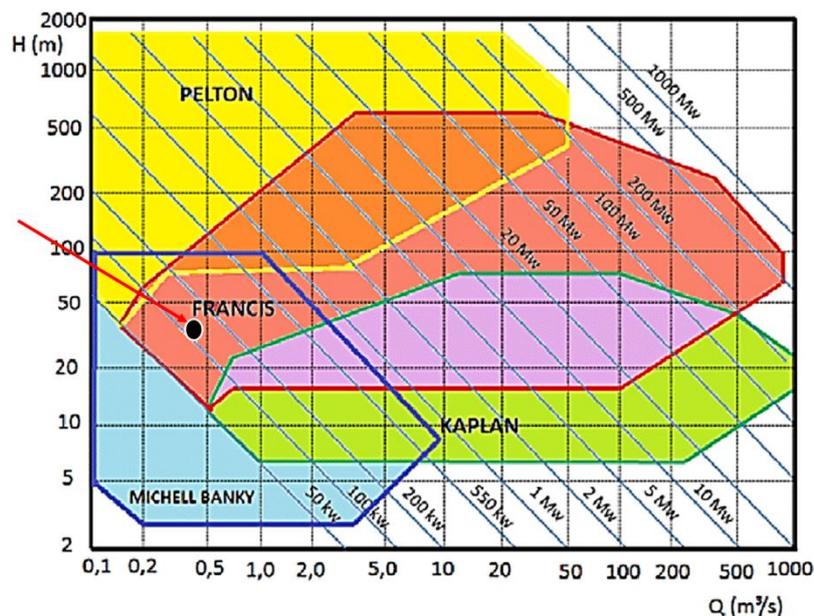
### 2.5 Selección de la máquina eléctrica que producirá la energía.

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, conductora 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 (Figura 2.13):

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

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

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



**Figura 2.13.** Abaco para determinar el tipo de turbina a emplear según cálculos iniciales, señalando la ubicación de selección primaria.

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ea/Turbinas.svg/250px-Turbinas.svg.png>

**Tabla 2.5.** 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

## 2.6 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:

- ✓ 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)
- ✓  $\rho$ = densidad del fluido en kg/m<sup>3</sup>
- ✓  $\eta_t$ = rendimiento de la turbina hidráulica (entre 0.75 y 0.94)
- ✓ Q= caudal turbinable en m<sup>3</sup>/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:

$\eta_t = 0,80$  (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 Kw/h**

Deberá analizarse si sufre 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 permitiría aumentar la carga y la potencia a generar.

## 2.7 Proyección de los pasos básicos para la construcción del cierre y la estación de producción de hidroenergía.

Para la construcción de la mini hidroeléctrica se deben observar una serie de pasos tecnológicos básicos. A continuación en la tabla 2.4, se describen de forma general para la variante de cierre 1 expuesta con anterioridad, que consiste en tres etapas constructivas:

1. Construcción del cierre por derivación.
2. Construcción de una conductora.
3. Construcción de la casa de máquinas.

A continuación el gráfico de organización de los trabajos por el método de la ruta crítica (Figura 2.10).

**Tabla 2.5** Pasos tecnológicos a seguir para la ejecución del sistema de abastecimientos de agua a la agricultura en la comunidad la Magdalena del municipio Guama.

No.	Actividad	U/M	Tipos de Materiales	Mano de obra	Equipos
<b>Para el cierre en el río (Dique y un canal de entrada con rejilla, conectado a una válvula reguladora, para conexión a tubería conductora)</b>					
1	Deslinde y desmonte	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
2	Desbroce	m <sup>2</sup>	-	Manual	-

3	<u>Operaciones para cimientos aislados:</u> Excavación en foso para cimientos aislados en forma paralela como elemento de sujeción al suelo.	m <sup>3</sup>	-	Manual	-
4	Encofrado de los cimientos aislados.	m <sup>2</sup>	Maderas, puntillas	Manual	-
5	Colocación de aceros de los cimientos aislados.	m <sup>2</sup>	Barras de acero	Manual	-
6	Hormigonado de los cimientos aislados.	m <sup>3</sup>	Áridos, cemento.	Manual	-
7	Desencofrado de los cimientos aislados.	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
8	<u>Operaciones para el canal de entrada:</u> Excavación en zanja para el canal de entrada, el registro de rejillas y la válvula reguladora	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
9	Encofrado para el canal de entrada, el registro de rejillas y la válvula reguladora	m <sup>2</sup>	Maderas, puntillas.	Manual	-
10	Colocación de aceros para el canal de entrada, el registro de rejillas y la válvula reguladora	m <sup>2</sup>	Barras de acero	Manual	-
11	Hormigonado del canal de entrada, el registro de rejillas y la válvula reguladora	m <sup>3</sup>	Áridos, cemento	Manual	-
12	Desencofrado del canal de entrada, el registro de rejillas y la válvula reguladora	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
	Colocación del registro de rejillas y la válvula reguladora.	U	Elementos hidráulicos prefabricados(rejillas y la válvula reguladora)	Manual	-
13	<u>Operaciones para el muro o dique:</u> Excavación en zanja para el muro o dique	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
14	Encofrado para el muro o dique	m <sup>2</sup>	Maderas, puntillas	Manual	-
15	Colocación de aceros para el muro o dique	m <sup>2</sup>	Barras de acero	Manual	-
16	Hormigonado del el muro o dique	m <sup>3</sup>	Áridos y cemento	Manual	-
17	Desencofrado del muro o dique	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
<b>Para la tubería de conducción</b>					
18	<u>Operaciones para la tubería de conducción:</u> Deslinde y desmonte	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
19	Desbroce	m <sup>2</sup>	-	Manual	-

20	Excavación en zanja	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
21	Colocación de tuberías	m <sup>2</sup>	Tuberías de PAD	Manual	-
22	Soldadura	U		Manual	-
23	Rehincho	m <sup>3</sup>			
24	Compactación	m <sup>2</sup>			
<b>Para la caseta de control y administración</b>					
54	Deslinde y desmonte	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
55	Desbroce	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
56	Conformación de la explanación	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
57	Excavación para el cimiento	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
58	Encofrado	m <sup>2</sup>	Madera, puntillas	Manual	-
59	Colocación de aceros	m <sup>2</sup>	Barras de acero	Manual	-
60	Hormigonado	m <sup>3</sup>	Áridos, cementos	Manual	-
61	Desencofrado	m <sup>2</sup>	-	Manual	-
62	Construcción de muros exteriores e instalación de accesorios.	m <sup>2</sup>	Áridos, cementos, bloques de hormigón Barras de acero, Tuberías de PAD, válvulas, instrumentos de medición, sistema eléctrico, etc.	Manual	-
63	Colocación de sistema de tratamiento de agua potable	U	Se considera como un equipo de cloro-gas automático.	Manual	-

# *Conclusiones*

## CONCLUSIONES

1. La producción de hidroenergía en Cuba aún es insuficiente, sobre todo para proporcionar electricidad a comunidades aisladas con es el caso de la Magdalena en el municipio Guamá
2. Se elaboraron los pasos a seguir para llegar a la conocer la ideas básicas conceptuales de aprovechamiento hidroenergético en la cuenca alta del río La Magdalena del municipio Guamá.
3. Se seleccionó el lugar de cierre.
4. Se realizaron los cálculos básicos para este aprovechamiento del potencial hidroenergético: quedando como:
  - ✓ Demanda actual de energía eléctrica en el poblado “La Magdalena” en 1386 kW/h
  - ✓ El caudal óptimo aprovechable para la producción de hidroenergía en  $Q_{op} = 0.45$  kW/h.
  - ✓ La turbina Francis de baja velocidad como generador de energía, con una potencia máxima de 100 kw

# *Recomendaciones*

## RECOMENDACIONES

- ✓ Evaluar para otras ubicaciones y cierres en la cuenca alta del río.
- ✓ Concretar lo más rápido posible la utilización de este tipo de fuente de energía renovable para el suministro de electricidad al poblado la Magdalena. La generación de este tipo de energía en micro y mini centrales hidroeléctricas posee la gran ventaja de diversificar la matriz energética nacional, lo cual se traduce en economizar los combustibles fósiles.
- ✓ Presentar esta investigación a los directivos de la comunidad de La Magdalena para su evaluación.

# *Bibliografía*

## BIBLIOGRAFÍA

1. IRENA. 2021. RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2021. International renewable energy agency. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf)
2. REN21. 2016. Renewables 2016 Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818107-0-7. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21\\_GSR2016\\_FullReport\\_en\\_11.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf)
3. Galileo.edu, 2017. Hidroenergía una fuente de energía ambiental y progreso económico y profesional. <https://www.galileo.edu/ire/historias-de-exito/hidroenergia-una-fuente-de-energia-ambiental-y-progreso-economico-y-profesional/>
4. Unión Eléctrica de Cuba, 2017
5. ONEI. 2012. “Censo de Población y vivienda”.
6. Joven club. Cu. 2019. “Nueva sala de computación en comunidad La Magdalena”. <http://www.scu.jovenclub.cu/?author=2>
7. Manual de diseño e instalación de sistemas de tuberías de PAD.
8. Manual PRECONS II, para el diseño y establecimiento de las actividades constructivas y cálculo básico de los materiales del sistema de abastamiento de agua potable
9. Geo cuba. 2010. Cartografía digital en un SIG a escala 1:25000 de la provincia Santiago de Cuba.
10. Decreto - LEY NO. 201/1999. “Del sistema nacional de áreas protegidas.
11. Decreto Ley No. 212/2000. “Gestión de la Zona Costera”.
12. Decreto Ley No. 262/1999 “Reglamento para la compatibilización del desarrollo económico-social del país con los intereses de la defensa”.
13. Decreto No. 327/2014 “Reglamento del proceso inversionista”.
14. Ley No. 124/2017 “Ley de aguas terrestres”.
15. Plan del Estado cubano para el enfrentamiento al cambio climático (Tarea vida).
16. Plan Hidráulico Nacional hasta 2030. INRH.2015.
17. Política Nacional de Agua. INRH, 2015.

18. Resolución 132/2009 del CITMA. “Reglamento del Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental”.
19. Rodríguez Armando, 2010. Cuencas hidrográficas en Cuba. Habana. CIH.
20. Sánchez López, 2019. Asignatura Energías Renovables. Carrera de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. Cuba.
21. Terra noticias, 2018 Proyectan reactivar centrales hidroeléctricas en Neuquén Terra noticias, pág. terranoticias.com.
22. USBR. (1966). Selecting hydraulic reaction turbines.
23. [www.radiosantacruz.icrt.cu/es/2980-hidroenergia/](http://www.radiosantacruz.icrt.cu/es/2980-hidroenergia/). (s.f.). Recuperado el 28 de Mayo de 2018.

# *Anexos*

### 1. Obras del esquema hidroenergético del municipio Guamá

Obra	Potencia, kW	Energía, MWh
Palma Mocha	500	3 900
Cueva I	48	271
Cueva II	55	458
El Dian	112	847
La Bruja	30	155
Las Agujas	30	187
Avispero	55	457
Uvero	250	1 224
Los Gallegos	30	96
Papayo	26	154
Alcarraza	30	96
Codillo	30	113
Sonador	30	71
Primera Alcarraza	600	4 500
Chivirico	500	3 800
La Mula	1 234	9 300
Peladeros I	5 000	26 000
Peladeros II	5 000	26 000
Bayamita	700	5 200

### 1. Centrales hidroenergéticas en funcionamiento en Cuba

Provincia	Conectadas al SEN		Aisladas		Total en Servicio	
	Cantidad	Potencia kW	Cantidad	Potencia kW	Cantidad	Potencia kW
Pinar del Rio	8	483	3	50	11	533
Cienfuegos	3	1300	13	538,4	16	1838,4
Villa Clara	7	43511	2	70	9	43581
Santi Spiritus	2	2740	3	96	5	2836
Ciego de Avila	1	1040			1	1040
Granma	4	6260	26	754,7	30	7014,7
Holguín	1	2000	8	229	9	2229
Santiago de Cuba	2	1850	20	972	22	2822
Guantanamo	2	2300	42	1001,6	44	3301,6
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>61484</b>	<b>117</b>	<b>3711,7</b>	<b>147</b>	<b>65195,7</b>



Relación consumos/radiación disponible											
Consumos totales Gt (Wh/día)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
3154,0	3154,0	3154,0	3154,0	3154,0	3154,0	3154,0	3154,0	3154,0	3154,0	3154,0	3154,0
Radiación disponible Rd (kWh/día)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5,5	5,6	5,0	4,2	3,6	3,2	3,2	3,5	4,5	5,0	5,4	5,8
Relación consumos/radiación P=Gt/Rd											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
570,0	561,6	630,2	751,8	880,0	974,3	994,6	892,3	699,5	634,4	582,2	547,2

#### Dimensionamiento del campo de captación

Potencia de captación del panel elegido (C):	54 Wp
Potencia máxima y mes ( $P_{m\acute{a}x}$ ):	994,6 Jul
Número de paneles ( $N_p = 1,1 \cdot P_{m\acute{a}x} / C$ ):	20 Paneles
Potencia de captación a instalar ( $C \cdot N_p$ ):	1080 Wp

#### Dimensionamiento del sistema de captación

Días de autonomía (D):	6 días
Profundidad de descarga máxima (M):	70 %
Tensión de trabajo de la instalación (T):	12 V
Capacidad del sistema de acumulación (Q):	2478 Ah
$Q = 110 \cdot G_t \cdot D / (T \cdot M)$	