


# Reversible Hydroelectric Power Plants in Multipurpose Dams to Address the Effects of Climate Change

Colón Gilberto Martínez-Rehpani, Dr (c)<sup>1</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7550-4508>

<sup>1</sup>Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador, colon.martinez@cu.uscg.edu.ec;

*Abstract– The objective of this work is to study the use of reversible or pumping hydroelectric plants for areas of the province of Azuay, Ecuador, susceptible to desertification due to climate change, as an alternative for energy storage in the rainy season, and energy production. electric in the dry season. The purpose is to reduce dependence on thermoelectric plants and also on the importation of electricity from neighboring countries. In the rainy season, there is excess water, which is not turbinated but eliminated through hydroelectric plants' spillways. As a preliminary solution, operating proposals adapted to the new needs of the successive hydroelectric complex of the Paute River were prepared, taking advantage of the Andean topography and the existing glacial lagoons in the area. It is concluded that reversible hydroelectric plants are a cheaper alternative than the options currently used in Ecuador, and less polluting. They will contribute to the increase in the percentage of energy production with renewable, solar and wind resources, and will reduce dependence on the purchase of energy and the burning of fossil fuels.*

*Keywords: climate change; desertification; reversible hydroelectric plants;*

## I. INTRODUCCIÓN

Ecuador recurre a la compra de energía a sus países vecinos o a quema de combustibles fósiles porque, en temporadas de estiaje, las centrales hidroeléctricas no funcionan con la capacidad de diseño. Uno de los ríos más afectados por el estiaje es el río Paute, en el que se encuentran varias centrales hidroeléctricas, entre ellas la más importante del país. Esta hidroeléctrica, en temporadas de estiaje críticas, raciona la energía debido a que no fluye el caudal necesario por el río Paute, para satisfacer la demanda esperada.

Fueron construidas otras hidroeléctricas para solucionar el problema del estiaje, con nuevos embalses. Sin embargo, las temporadas de estiaje agravan la situación, debido al cambio climático presente y/o procesos de desertificación en zonas cercanas. Esto ha obligado al país a seguir empleando centrales termoeléctricas y a la compra de energía a países vecinos en los meses críticos.

### A. Desertificación y estiaje

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

La desertificación es uno de los problemas ambientales que actualmente afronta la humanidad. Tiene alcance mundial, amenaza a más de 250 millones de personas y afecta a alrededor de 4 mil millones de hectáreas. Equivaldría aproximadamente a una tercera parte de la superficie terrestre [1]. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – PNUMA, lo catalogó como uno de los grandes problemas ambientales, refiriéndose también a América Latina y a los riesgos que corre debido a la desertificación [2].

La desertificación en Ecuador tiene estrecha relación con las sequías de régimen oriental y occidental. La desertificación se muestra significativa en ciertas temporadas del año, y en casi toda la región Costa ecuatoriana o región occidental. Cuando ocurre este fenómeno, las otras regiones, Sierra y la región Oriental, gozan de abundante agua debido a las grandes precipitaciones que azota a estos territorios. En otros meses ocurre lo opuesto. Esto contribuye a ocasionar un ciclo de desertificación estacional en el país. Además, existen suelos con procesos de erosión avanzados en la provincia, que alcanzan el 3% del territorio azuayo [3].

### B. Sequía en la provincia del Azuay

En la provincia del Azuay se ha presentado el fenómeno de sequías desde hace algunas décadas. En algunos casos más crítico que en otros, pero con afectación significativa a la provincia. Es un ejemplo la poca generación de las hidroeléctricas en algunos meses. Si las sequías se tornan críticas, se podría producir racionamientos de energía.

### C. Deforestación en la provincia del Azuay

La deforestación también ha afectado a Ecuador, de manera particular los dos últimos siglos. Las principales zonas afectadas inicialmente fueron los bosques andinos y, en décadas posteriores, se expandió a la región de la Costa y Oriente [4]. Actualmente, este problema sigue afectando al país.

La aportación de los incendios forestales a la deforestación es muy significativa, tanto que se estudian las zonas más susceptibles a incendios forestales. Estos son generados por factores como cambio climático, sequías,

vientos fuertes, entre otros. Estos factores provocan incendios forestales frecuentes y severos en el país [5].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Perfil energético de Ecuador

Dada la naturaleza del presente estudio, se optó por una revisión sistemática del estado del arte y estudio de casos con procesos de innovación exitosos a nivel planetario. Las cifras y datos utilizados son oficiales de Ecuador.

En los últimos años ha crecido la generación de energía mediante recursos renovables. Ecuador se ha enfocado en desarrollar este tipo de energía, siendo la hídrica la más importante. No obstante, el país está implementando otras fuentes energéticas renovables para complementar a la energía hidráulica, entre ellas la solar y eólica [6].

Según el informe anual de [7], se reporta que la producción de electricidad con energía hidráulica aproximadamente fue 77%, mientras que la energía proveniente de las centrales termoeléctricas fue del 20%. La energía solar, eólica y las transacciones internacionales abarcaron el 0,12%, 0,24 y 0,80% respectivamente.

### B. Complejo hidroeléctrico Paute-Integral

El complejo hidroeléctrico Paute-Integral es uno de los proyectos más importantes de Ecuador, el cual se encuentra ubicado en los límites de la provincia de Azuay. Este proyecto hidroeléctrico consta de cuatro centrales hidroeléctricas, tres de ellas actualmente construidas: Paute-Molino, Paute-Mazar y Paute-Sopladora; y la última se encuentra en desarrollo: Paute-Cardenillo. Las tres centrales hidroeléctricas que funcionan actualmente, tienen una potencia conjunta de 1.757 MW. Ver Fig. 1.

### C. Central hidroeléctrica Paute-Mazar

La Central Hidroeléctrica Paute-Mazar está ubicada aguas arriba del río Paute, antes del embalse Amaluz. Esta central cuenta con su propia presa, denominada con el mismo nombre. La presa Mazar almacena agua para el embalse Amaluz y regula el caudal que llega al embalse Amaluz y, por consiguiente, a la central Paute-Molino. Además, almacena agua para su propia generación energética. El embalse Mazar tiene una capacidad de almacenamiento de 410 millones de metros cúbicos aproximadamente y un volumen útil de 309 millones de metros cúbicos. La central hidroeléctrica Mazar es la primera de la serie de centrales sucesivas a lo largo del río Paute, que conforman el complejo hidroeléctrico Paute-Integral y la segunda en orden de construcción, después de la central Molino.

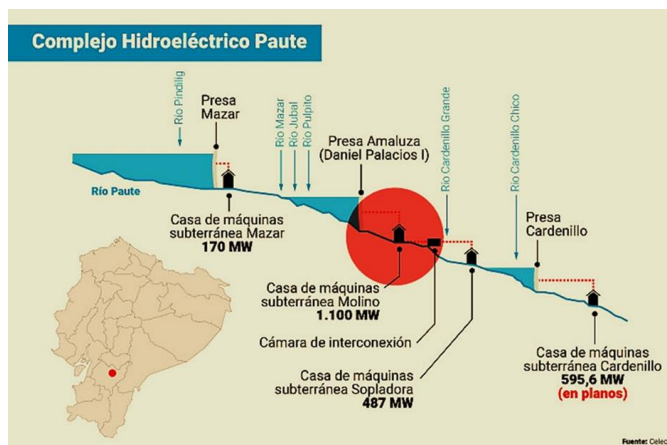


Fig. 1 Esquema del Complejo Hidroeléctrico Paute Integral [8].

### D. Producción de centrales termoeléctricas

Las centrales termoeléctricas generan una cantidad considerable de energía eléctrica para el país. Han servido como apoyo para la generación de energía, especialmente en temporadas de estiaje, pero no resultan la mejor opción por la contaminación del medio ambiente, a causa del uso de combustibles fósiles.

Aunque su uso ha disminuido, la generación con centrales termoeléctricas continua en Ecuador, especialmente durante la temporada de estiaje en las zonas donde se encuentran las principales centrales hidroeléctricas, como se muestra en la Fig. 2.

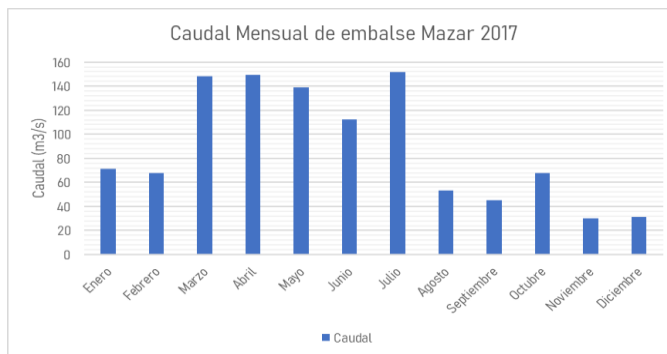


Fig. 2 Caudal mensual que llegó al embalse Mazar en 2017, en las temporadas de lluvias y estiaje [9]

### E. Transacciones internacionales de energía

En Ecuador, en tiempos en que la demanda energética supera a la producción, se hace uso de las centrales termoeléctricas. La segunda alternativa que emplea el país es la importación energética de sus países vecinos.

## III. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS REVERSIBLES

Las centrales hidroeléctricas reversibles o por bombeo son un tipo de central hidroeléctrica que comprende dos embalses

situados en diferentes cotas. El embalse inferior es el encargado de bombear agua al embalse superior, mientras que el embalse superior es el encargado de almacenar y suplir de agua al embalse inferior cuando se requiera generar energía. El embalse superior cumple la función de un almacenador de energía, como una gran pila. Este tipo de hidroeléctrica fue desarrollado para funcionar en las horas de alta demanda eléctrica o cuando el caudal es bajo, mientras que, en las horas de baja demanda, funciona en su modo de almacenamiento por bombeo [10].

#### A. Funcionamiento

El funcionamiento consiste en que se bombee agua del embalse inferior o cauce natural al embalse superior, de tal forma que gane energía potencial o gravitatoria, que posteriormente se transformará en energía eléctrica mediante los generadores, como se muestra en la Fig. 3. Este proceso se realiza típicamente en las noches o fines de semana, puesto que la demanda energética es baja, y además porque existen excedentes de energía en esos horarios. Mientras que, en los periodos de alta demanda eléctrica, se regresa el agua previamente bombeada del embalse superior al inferior. En el trayecto, la energía potencial almacenada por el agua se convierte en energía cinética, por la primera ley de la termodinámica. La energía cinética, se transforma en energía mecánica rotatoria a través de las turbinas y, finalmente las turbinas la convierten en energía eléctrica.

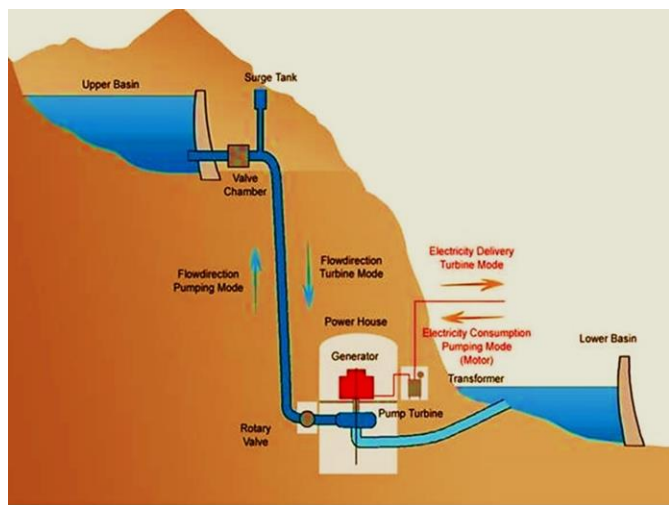


Fig. 3 Esquema de Central Hidroeléctrica Reversible [11].

Las centrales hidroeléctricas reversibles, además de cumplir sus respectivas funciones en las horas de alta y baja demanda, ofrecen funciones complementarias que ayudan a un mejor desempeño en la red eléctrica, tales como nivelación de carga, control de frecuencia y capacidad de arranque en cero. Esto garantiza la estabilidad del sistema en casos de caídas en la red. Entre otras de sus funciones complementarias e intrínsecas, se encuentra la reducción de emisiones de gases de

efecto invernadero - GEI, dado que las centrales reemplazan el uso de las centrales termoeléctricas en horas de alta demanda.

#### B. Implementación de otras fuentes energéticas

Las centrales hidroeléctricas reversibles se complementan muy bien junto a las demás centrales de generación de energía. Entre las principales razones por las que se acoplan bien, se encuentra la existencia de excedentes de energía en las distintas centrales energéticas, dado que las centrales hidroeléctricas reversibles funcionan como un almacenador de excedente energético, gracias a su embalse.

Otro motivo es el factor económico, puesto que existen algunos tipos de centrales cuyo costo de operación es muy elevado, y cuando se acoplan con las centrales reversibles tienden a bajar su costo de operación y mantenimiento. Finalmente, se encuentra el factor ambiental, toda vez que las centrales hidroeléctricas reversibles, permiten la disminución de emisión de gases de otras fuentes energéticas, dañinos para el medio ambiente, debido a su puesta en funcionamiento en horas pico [12].

De manera complementaria, las centrales hidroeléctricas reversibles pueden utilizar energía solar y eólica, conformando un sistema híbrido. Estas son las de mayor desarrollo en el futuro, ya que estos dos tipos de energía son fluctuantes, y dependen de las condiciones climáticas. La energía eólica y/o solar, pueden suplir energía para bombeo de las centrales reversibles, en horas donde las condiciones climáticas permitan que exista excedente de energía. De esta forma el uso del embalse superior de la central reversible actuaría simplemente como una batería. La Fig. 4 muestra un esquema de este sistema híbrido.

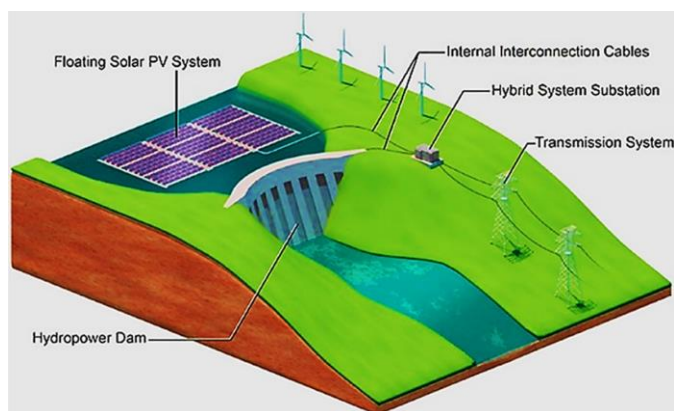


Fig. 4 Central eléctrica híbrida [13].

#### IV. PROPUESTA DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA REVERSIBLE PARA EL PROYECTO HIDROPAUTE

Se propone ajustar el funcionamiento tradicional de este tipo de centrales, como una alternativa de solución para Ecuador, para el caso específico de la desertificación estacional. El objetivo de adaptar centrales hidroeléctricas reversibles a las hidroeléctricas construidas, es satisfacer el déficit energético en la temporada de estiaje, al utilizar los excedentes de agua almacenados en la temporada de lluvias, a partir de estas centrales. A continuación, se presentan propuestas de centrales hidroeléctricas reversibles considerando los siguientes factores.

#### A. Factores considerados

Los factores considerados para la elección del emplazamiento de la propuesta fueron mencionados por [12], los cuales engloban los aspectos técnicos y económicos de las centrales hidroeléctricas reversibles, tales como los factores generales asociados al sistema eléctrico, los relacionados al emplazamiento de la central, y los económicos asociados al sistema eléctrico, que están relacionados directamente al uso de los excedentes de agua almacenados en las temporadas de lluvias.

Los factores relacionados al emplazamiento de la central están relacionado al salto hidráulico, condiciones geológicas, distancia entre embales, disponibilidad del recurso, existencia de depósitos, cercanía a líneas de transmisión, entre otros.

Los factores económicos asociados al sistema eléctrico están relacionados al precio de la energía al momento de bombear agua, y el precio cuando se libera el agua para generar energía.

#### B. Propuesta

Se plantearon algunas propuestas asociadas a esta área de estudio. Una de ellas se encuentra ubicada entre la provincia de Cañar y la provincia de Azuay y se muestra en la Fig. 5. En este estudio se analizó usar el primer embalse del río Paute, la presa Mazar como embalse inferior, mientras que el embalse superior sería un embalse artificial en una zona montañosa cerca de la parroquia Pindilig, Cañar.

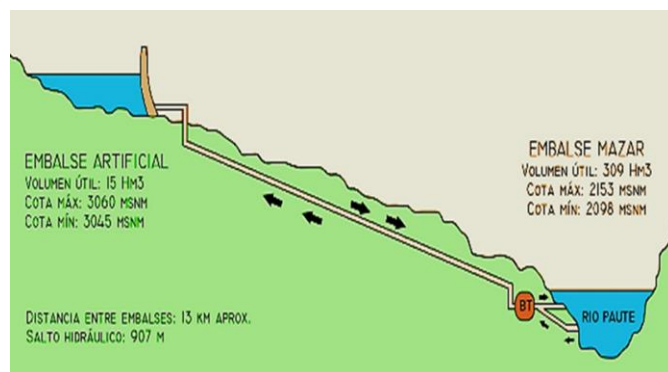


Fig. 5 Esquema de funcionamiento de propuesta de central hidroeléctrica reversible.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las centrales hidroeléctricas reversibles propuestas aprovecharían para su funcionamiento, la presencia cercana del embalse Mazar y el excedente que este tiene en la temporada de lluvias. En este caso, se tomaron varios factores como referencia para su ubicación, como la cercanía de un embalse existente y la presencia de conexiones energéticas de la central hidroeléctrica Paute-Mazar.

El embalse tendrá una importante capacidad, por lo que será eficiente para el almacenamiento de agua en temporadas de estiaje. No obstante, este también puede emplearse para otros usos en beneficio de las comunidades cercanas, por lo que se consideraría un embalse multipropósito. El salto hidráulico entre los dos embalses es de aproximadamente 900 metros.

La ruta considerada para la conducción del agua es topográficamente viable, y no necesitará de excavaciones para la colocación de tuberías. Los equipos a emplear son las bomba-turbinas reversibles. También se considera el uso de equipos individuales, como bomba y turbina

#### A. Beneficios

El principal beneficio técnico de adaptar centrales hidroeléctricas reversibles al sistema, es la generación energética. Las centrales hidroeléctricas reversibles ayudarán a la producción energética del complejo Paute Integral, específicamente en la central Mazar, cuando el sistema no produzca la demanda de energía esperada, en la temporada de estiaje.

En el aspecto económico existen beneficios, debido a que las centrales hidroeléctricas reversibles reemplazarán a las centrales termoeléctricas, en la función de suplir la demanda energética en la temporada de estiaje. Las centrales termoeléctricas representan un gasto anual importante para el país.

Otro beneficio es el ambiental. Las centrales hidroeléctricas reversibles contribuyen a la producción energética con fuentes renovables, importante en el control del cambio climático y la responsabilidad ecológica en el país.

## CONCLUSIONES

Las centrales hidroeléctricas reversibles o de bombeo se desarrollaron hace 100 años atrás, pero, en su mayoría, no son utilizadas para suplir la ausencia de lluvias, sino para regular los picos diarios durante la generación eléctrica. Se estudió el uso de centrales hidroeléctricas reversibles o de bombeo para zonas de la provincia del Azuay, Ecuador, susceptibles a la

desertificación por cambio climático, como alternativa para almacenamiento de energía en época de lluvias, y la producción de energía eléctrica en época seca.

Fueron elaboradas varias propuestas de funcionamiento de centrales hidroeléctricas reversibles, adaptadas a las necesidades del complejo de hidroeléctricas sucesivas del río Paute, aprovechando la topografía andina y las lagunas glaciares existentes en la zona. Se concluye que las centrales hidroeléctricas reversibles, son una alternativa más económica que las opciones utilizadas actualmente en Ecuador, y menos contaminantes. Contribuirán con el incremento del porcentaje de producción de energía con recursos renovables, solar y eólica. Reducirá la dependencia de la compra de energía a Colombia y Perú. Disminuirá la quema de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas.

La continuidad de estudios similares, permitirá adaptar centrales hidroeléctricas reversibles a centrales hidroeléctricas construidas en Ecuador, visando optimizar su condición climática particular. El empleo de esta tecnología permitirá abordar algunos de los efectos negativos del cambio climático, que actualmente está afectando al país.

#### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, por el soporte brindado durante la Investigación.

#### REFERENCIAS

- [1] T. Ruiz and G. Febles. "La desertificación y la sequía en el mundo". Avances en Investigación Agropecuaria. Vol. 8 no.2, June 2004. En:<https://www.redalyc.org/pdf/837/83780201.pdf>
- [2] H. Pacheco. "Evaluación de la desertificación en la provincia del Azuay a partir del año 1980". (Tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2015.
- [3] F. Portilla, M. Noguera and N. Pacheco. "Diagnóstico multitemporal de las áreas ambientalmente sensibles a la desertificación en la provincia del Azuay a partir del año 1982". La Granja. Revista de Ciencias de la Vida, Vol. 20, no. 2, pp. 36-44. December 2014.
- [4] M. Sánchez and C. Reyes. "Ecuador: Revisión a las principales características del recurso forestal y de la deforestación". Revista Científica y Tecnológica UPSE, Vol. 3, no. 1, pp. 41-54. December 2015. En:[https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/70/pdf\\_1](https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/70/pdf_1)
- [5] Ministerio del Ambiente y Agua. Plan Nacional de Sequía 2021-2030. Quito, Ecuador. Minambiente: 2021. En:<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/05/plan-nacional-de-sequia.pdf>
- [6] C. Hernández. "Energías renovables, tendencias en Ecuador". Tesis de Maestría. Universidad Espíritu Santo, Guayaquil, Ecuador. 2015. En:<http://repositorio.uees.edu.ec/bitstream/123456789/2278/1/Energ%c3%adas%20renovables%20tendencias%20en%20Ecuador%20-%20Mariela%20Hernandez.pdf>

- [7] Centro Nacional de Control de la Energía CENACE. Informe Anual 2020. Quito, Ecuador. CENACE:2020. En:<http://www.cenace.gob.ec/informe-anual-2020/>
- [8] CELEC. Plan Maestro de Electricidad. Quito, Ecuador. CELEC:2016.
- [9] CELEC Hidropaute. Informe anual 2017. Cuenca, Ecuador. CELEC: 2018.
- [10] J. P. Guyer. An Introduction to Generators for Hydroelectric Power Plants. California, EEUU. Guyer Partners. 2019.
- [11] B. Navalón. Nuevas Centrales de Bombeo en España. Grupo Aragonés. 2021.
- [12] R. Jiménez. "Estudio de los factores técnicos y económicos que condicionan la instalación de centrales hidroeléctricas de acumulación por bombeo. Evaluación conceptual de su aplicación en Chile". (Tesis de Licenciatura). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. 2012. En:<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/111503>
- [13] N. Lee, U. Grunwald, E. Rosenlieb, H. Mirlitz, A. Aznar, R. Spencer, and S. Cox. "Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential". Renewable Energy, Vol. 162, pp.1415-1427. December 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.080>