

## ANÁLISIS Y PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y/O COMPLEMENTACIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS REVERSIBLES EN BOLIVIA

### ANALYSIS AND PROPOSAL FOR THE IMPLEMENTATION AND/OR COMPLEMENTATION OF REVERSIBLE HYDROELECTRIC POWER PLANTS IN BOLIVIA

**Azarías Nicanor Torrico Carmona, Daniel Felipe Sempértegui-Tapia, Renán Orellana Lafuente**

*Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)*

*Universidad Privada Boliviana*

renanorellana@upb.edu

(Recibido el 16 de junio 2022, aceptado para publicación el 18 de julio 2022)

#### RESUMEN

En el Plan Eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia para el año 2025, en el marco de la expansión del sistema eléctrico boliviano, la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE) ha propuesto la instalación de varias centrales hidroeléctricas y de energías renovables para atender la creciente demanda y eventualmente la exportación de electricidad. Sin embargo, las energías renovables no convencionales como la solar y la eólica, tienen desventajas, debido a la intermitencia en la generación, lo que provoca un desperdicio de energía, ya que la electricidad se genera en momentos donde la demanda es baja. Por esta razón, algunos países están buscando cómo almacenar energía. Una buena opción para cumplir este objetivo son las hidroeléctricas reversibles, que consiguen satisfacer la demanda energética en horas pico y almacenar energía en horas valle, ya que utilizan el exceso de energía para conducir el agua de un embalse inferior al superior mediante un sistema de bombeo. En este sentido, el trabajo presenta un estudio para construir y/o transformar centrales hidroeléctricas en centrales reversibles. Primero se seleccionó la central hidroeléctrica más adecuada (analizando las centrales ya construidas y las que están en proyectos) para transformarla a reversible mediante una serie de parámetros bien definidos. Después se realizó el diseño de la central hidroeléctrica reversible y se calculó las horas que esta debería funcionar en modo almacenamiento de energía para su adecuado funcionamiento. Además, se estimó el costo que tendría esta modificación de la central hidroeléctrica.

**Palabras Clave:** Central Hidroeléctrica Reversible, Demanda de Energía, Bolivia.

#### ABSTRACT

In the *Electric Plan of the Estado Plurinacional de Bolivia* for the year 2025, the *Empresa Nacional de Electricidad* (ENDE) has proposed the installation of several hydroelectric and renewable energy plants to meet the growing demand and eventually the export of electricity. However, non-conventional renewable energies such as solar and wind energies have disadvantages, due to the intermittency in generation, which causes a waste of energy, since electricity is generated in moments where the demand is low. For this reason, some countries are researching energy storage. One good option for this purpose is the pump-storage hydroelectricity. In this sense, the work presents a study to build and/or transform hydroelectric plants into reversible plants. Firstly, the hydroelectric power station was selected (analyzing the plants already built and those that are in projects) through well-defined desired characteristics for a pump-storage hydroelectricity system. After this, the pump system was designed and the working hours were estimated in order to achieve the adequate energy storage according to the needs of energy demand in Bolivia.

**Keywords:** Pump-Storage Hydroelectricity, Hydroelectric Power Station, Energy Demand, Bolivia.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía eléctrica en Bolivia crece cada año, a un ritmo promedio del 4%, llegando a un consumo de 8725,4 GWh en el año 2020 [1]. Por consiguiente, la capacidad de generación en Bolivia para el año 2021 fue de 3503,35MW, donde el 22,77% proviene de las centrales hidroeléctricas y un 5,95% de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) [2].

Bolivia tiene como base de generación eléctrica las centrales termoeléctricas, primero por las ventajas que se tienen en el costo de instalación, operación y el tiempo de montaje que son menores respecto a una central hidroeléctrica y segundo por la subvención en el costo del gas, llegando a costar 1,3 [US\$/MPC], no obstante, la disminución de las reservas de gas y la continua subvención que daña la economía, obligo al país buscar nuevas formas de generación. De esta manera en el Plan Eléctrico Nacional de Bolivia, se plantea la construcción de parques eólicos y solares para cubrir la demanda y dejar de lado el uso de centrales que utilizan combustibles fósiles [3], como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1:** Parque Eólico Qollpana, Bolivia [4].

No obstante, la inserción de las ERNC tiene impacto al introducirse en el sistema eléctrico de un país, debido a que presentan una variabilidad en su generación [5], puesto que se genera energía eléctrica en días ventosos por los aerogeneradores y en días soleados por los paneles solares, haciendo que el recurso del viento y del sol tengan condiciones que están fuera del control humano, sin embargo, esas variables se pueden predecir, por ejemplo, la duración de la luz del sol en las estaciones o los meses más ventosos, pero con cierto grado de incertidumbre, a consecuencia de esto se generan dificultades para el suministro confiable de electricidad [6].

Por consiguiente, los sistemas eléctricos están obligados de aumentar la capacidad de reserva para ayudar a manejar las fluctuaciones que se originan en la generación, adicionalmente los aspectos económicos que conllevan tener ERNC en los sistemas eléctricos, se manifiestan principalmente en el aumento de los costos de inversión, puesto que se requiere tener una capacidad de reserva, que son las centrales convencionales, y los costos de conexión a la red ya que los centros de generación están alejados de los centros de consumo [7].

Una manera de enfrentar este problema es almacenar la energía generada por las ERNC, por tal motivo, las centrales hidroeléctricas se vuelven atractivas para lograr este cometido, ya que ayudan en la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico y solucionan el problema de la intermitencia de generación [6], más aun si se trata de en una central hidroeléctrica reversible [8].

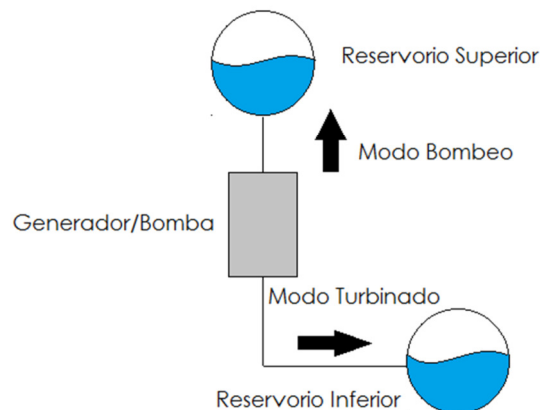
Por otra parte, la Universidad Nacional de Australia (ANU) llevó a cabo un estudio para contabilizar cuantas centrales hidroeléctricas reversibles se puede emplazar en todo el mundo dando como resultado unos 530000 sitios potenciales, que juntas generarían 22 millones de GWh. En Bolivia se destaca su buen potencial para la instalación de centrales de bombeo, pero solo en el área andina [9].

De este modo, este trabajo presenta una metodología de análisis de selección y/o implementación de centrales hidroeléctricas reversibles y en los casos donde las centrales ya fueron construidas o se encuentran en proceso, la inclusión del componente de bombeo, donde cada central tiene su particularidad, como ser el terreno, el medio ambiente, el tipo de disposición y otros aspectos, que se deben tomar en cuenta para seleccionar la mejor, a fin de convertirla en una central reversible.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Funcionamiento

Las centrales hidroeléctricas reversibles poseen una generador - bomba y dos embalses, uno superior y otro inferior, donde el agua utilizada por la turbina es almacenada en el reservorio inferior para posteriormente ser bombeado al reservorio superior [8]. El bombeo se da cuando existe un excedente de energía y la generación en el sistema es mayor a la demanda, siendo muy beneficioso si en ese momento hay una alta producción de las ERNC. Posteriormente, la generación de electricidad se da en las horas pico, cuando la generación es menor a la demanda o cuando no hay suficiente viento ni sol [10], como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2:** Esquema de principio de funcionamiento de una Central Hidroeléctrica Reversible [11].

## 2.2 Componentes de una Central Hidroeléctrica Reversible

Las centrales hidroeléctricas reversibles están constituidas de las siguientes partes principales:

- (1) **Reservorios Superior e Inferior:** Obras civiles cuya finalidad es retener un volumen de agua o de desviar el curso de un río, por lo general se construye cerca de una corriente de agua o de un arroyo [12].
- (2) **Turbina y Generador:** Las turbinas hidráulicas usan la fuerza del agua para girar el rodete, produciendo la energía mecánica donde el generador lo transforma en energía eléctrica [12], pueden ser de tipo Pelton, Francis o Kaplan.
- (3) **Motor y Bomba:** Equipo esencial en una central reversible, puesto que devuelve el agua utilizada en la generación de energía eléctrica. De esta manera se puede almacenar suficientes cantidades de energía.

## 2.3 Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas Reversibles

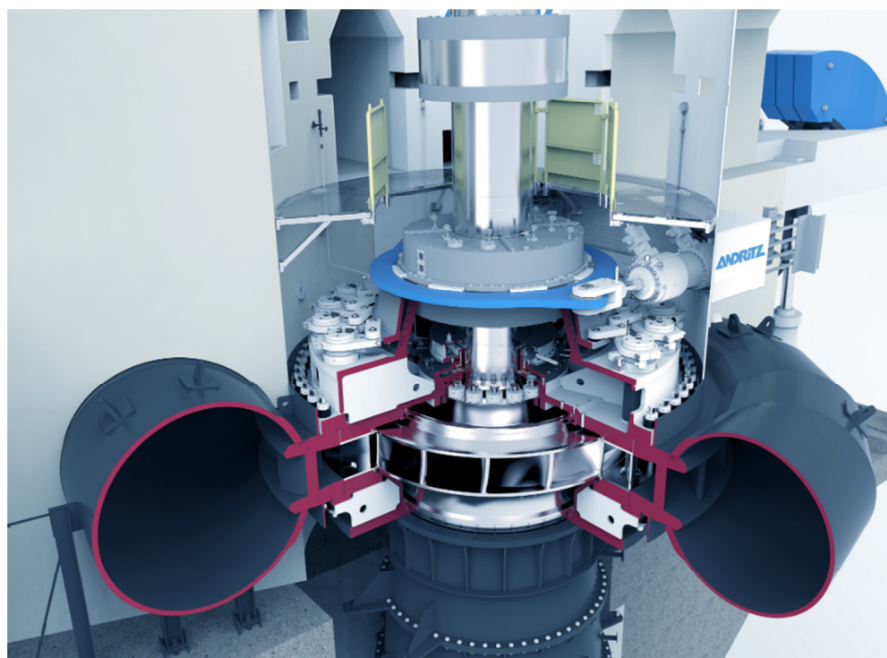
Las centrales reversibles se clasifican en 3 categorías [13]:

- (1) **En Función de la Ubicación del Reservorio Inferior:** pueden ser de 3 tipos: i) La Central Reversible Convencional que consta de un reservorio inferior que puede ser un lago, un curso de río o una presa ya construida. ii) La Central Reversible Subterránea: En este tipo de centrales, el reservorio inferior se encuentra bajo tierra, en acuíferos subterráneos o en minas abandonadas. iii) La Central Reversible con Agua de Mar: Se asemeja mucho a la central reversible convencional, con la diferencia que el reservorio inferior utiliza agua del mar.
- (2) **Según la United States Army Corps of Engineers (USACE):** Se clasifican en 2 tipos: i) La Central Reversible Pura, donde la energía eléctrica producida depende mucho de la cantidad de agua bombeada desde el reservorio inferior al superior y ii) la Central Reversible Mixta que es similar a la anterior, pero con la diferencia que el reservorio superior recibe un aporte de agua mediante medios naturales.
- (3) **En Función de la Disposición de las Máquinas:** pueden ser del tipo Generación y Bombeo donde el grupo motor–bomba se encuentra en un recinto separado del grupo turbina–generador: i) de tipo Grupo Cuaternario en el cual ambos grupos de bombeo y generación se encuentran en el mismo recinto, pero separados funcionalmente; ii) de tipo Grupo Terciario que está compuesto de una máquina eléctrica que funciona como motor y generador, de una turbina y de una bomba; iii) finalmente, se tiene la central de tipo Grupo Binario, la más utilizada de todas, puesto que posee un motor – generador y una turbina – bomba, como se muestra en la Figura 3.

## 2.4 Servicios que Entrega una Central Reversible

Las centrales reversibles pueden proporcionar servicios que en algunos países son muy valorados, ya que ayudan a mantener la estabilidad en el sistema eléctrico. A continuación, se muestran las cualidades más sobresalientes [13]:

- (1) **Nivelación de Carga:** Las centrales pueden optimizar el sistema eléctrico mediante la absorción de los excedentes de la red cuando se encuentra en la zona de los valles y en la devolución de la misma en los picos de demanda, consiguiendo de esta manera una operación óptima en las centrales térmicas a fin de reducir los costos de operación y las emisiones de sustancias contaminantes al medio ambiente [15].
- (2) **Regulación de la Frecuencia:** Las centrales reversibles pueden regular la frecuencia durante los picos de la red o en situaciones imprevistas donde la frecuencia cae debido a una alta demanda frente a la generación o sube la frecuencia, cuando sucede, una alta generación y una baja demanda.
- (3) **Capacidad de Arranque en Negro:** Las centrales reversibles tienen la capacidad de seguir funcionando luego de un corte en la red, debido a que no dependen de la energía eléctrica que viene del sistema eléctrico. Por tal motivo, pueden inyectar grandes cantidades de energía con el fin de poner en funcionamiento las centrales eléctricas que necesitan de la energía eléctrica para arrancar desde cero.



**Figura 3:** Central Reversible de Grupo Binario [14].

### 3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS CANDIDATAS

#### 3.1 Evaluación de las Centrales Hidroeléctricas según criterios ponderados

En el análisis de las centrales se consideraron los siguientes aspectos:

- a) **Existencia del Embalse Inferior:** Para las centrales reversibles se buscan lugares que tengan un lago natural, un río o que estén cerca del mar o un embalse ya construido. Las dos primeras opciones pueden originar impactos ambientales negativos debido a las obras civiles, por tal motivo se suele utilizar presas ya construidas [13]. De esta manera al tener el embalse inferior la central se le asignará 1 punto, caso contrario tendrá 0.
- b) **Existencia del Embalse Superior:** Varias centrales hidroeléctricas poseen un embalse para la generación, sin embargo, hay algunas que no presentan debido a que están en un sistema cascada donde el agua utilizada por la primera central va a una cámara de carga para posteriormente ser utilizada por la siguiente central. El criterio para asignar el puntaje a cada central es similar al anterior.
- c) **Cercanía a las Líneas de Transmisión:** Logra reducir el costo en el transporte de la energía eléctrica durante cada periodo de turbinado y bombeado del agua. Adicionalmente se evita el incremento en el costo de construcción de una línea de transmisión [13]. La asignación de puntaje a cada central es similar al anterior.
- d) **Año de Operación de la Turbina:** Determina si es necesario hacer el cambio de las turbinas, lo cual origina que se incremente el costo en la conversión a una central reversible. Por consiguiente, cuanto más nueva sea la turbina tendrá un valor aproximado de 1, caso contrario se aproximará al valor de 0.

- e) **Vías de Acceso Disponible:** La existencia de carreteras y caminos facilitan el transporte de los componentes necesarios para el funcionamiento de la central reversible. Los puntajes que se asignan a las centrales hidroeléctricas son similares al primer punto.
- f) **Disponibilidad de Terreno para el Embalse Inferior:** Las centrales hidroeléctricas solo disponen del embalse superior y para convertirse en una reversible necesitan el embalse inferior, por tal motivo se necesita de un terreno amplio y de buenas características para la construcción. De esta manera las centrales que tengan una represa inferior o que tengan grandes extensiones de tierra para la construcción de una tendrán un valor aproximado de 1, caso contrario se aproximará al valor de 0.
- g) **Elevación del Lugar:** Infiuye en la eficiencia del sistema de bombeo, donde a mayor elevación sobre el nivel del mar hay menos presión atmosférica por ende el rendimiento se reduce. Por tal motivo las casas de máquinas que se ubiquen a mayores elevaciones tendrán un puntaje cercano a 0.
- h) **Uso del Agua Turbinada:** Algunos embalses y/o canales son usados para el riego o el consumo de agua potable por parte de las poblaciones cercanas, por tal motivo se deben identificar los sitios que son usados para esta labor, para evitar posibles desabastecimientos de agua, las cuales tendrán un puntaje de 0.
- i) **Precipitaciones:** Determina la cantidad de volumen de agua que se aumenta en los embalses y hacer las planificaciones de generación correspondientes en las épocas secas y húmedas. Por consiguiente, las centrales que tengan elevadas precipitaciones tendrán un puntaje cercano a 1.
- j) **Existencia de Chimenea de Equilibrio:** Fundamental para evitar el golpe de ariete. Por lo tanto, el puntaje que se asignó a cada central siguió los mismos parámetros que el punto 1.

Asimismo, se consideraron otros parámetros de las centrales hidroeléctricas para tener una evaluación más acertada:

- k) **Cantidad de Turbinas de la Central:** La importancia de tener dos o más unidades generadoras radica que se apoyan mutuamente, especialmente, cuando se tiene una unidad generadora por indisponibilidad forzada o indisponibilidad programada, se requiere su reemplazo para mantener la seguridad en la generación de energía eléctrica de la red.
- l) **Volumen del Embalse Superior:** El volumen del embalse superior es notable para minimizar los costos de ampliación o remodelación, ya que cumple con el volumen requerido para la central reversible. Al hacer cálculos en función de la topografía del lugar, se obtiene un volumen teórico que al comparar con el volumen de la central, se deduce si es necesario ampliar la capacidad de almacenamiento, en caso que el volumen teórico sea mayor. Por tal motivo se requiere grandes volúmenes de embalse, de esta manera las centrales que tengan un elevado volumen de agua, tendrán un puntaje aproximado a 1.
- m) **Salto Hidráulico:** Afecta al factor de L/H que determina cuan costoso va a ser la central reversible y su potencia de generación, por consiguiente, las centrales con grandes saltos se aproximarán al valor de 1.
- n) **Caudal:** Determina el tamaño que tendrán las tuberías forzadas, el túnel de la central reversible, la potencia y el volumen que se puede utilizar, por ello las centrales con caudales elevadas se aproximarán al valor de 1.
- o) **Potencia Instalada:** Es la cantidad de energía eléctrica entregada por la central eléctrica en un determinado tiempo. De esta manera, junto al factor de planta, permite calcular la cantidad de energía que genera anualmente para conseguir el ahorro de combustible fósil, y además es fundamental para los respectivos cálculos en el diseño de ingeniería. Por tanto, tener un valor alto de potencia otorga un puntaje cercano a 1.
- p) **Energía anual Generada:** Es la cantidad de energía eléctrica que genera una central hidroeléctrica en el periodo de un año, el cual cuantifica la cantidad de combustible que se ahorra y para realizar cálculos en el diseño de la central, como ser el volumen de almacenamiento. Los puntajes que se asigna a cada central es similar al anterior punto.
- q) **Diámetro de la Tubería Forzada:** Infiuye en el costo de la construcción para la central reversible. De la misma forma que el anterior punto, se determinará los puntajes de cada central.
- r) **Longitud de la Tubería Forzada:** Determina junto con el salto hidráulico la relación L/H y además establece el costo que tendrá las respectivas tuberías. De esta manera las centrales que tengan longitudes de tuberías muy grandes tendrán un puntaje aproximado de 0.
- s) **Coefficiente de Producción:** Precisa la capacidad instalada total al multiplicar con el caudal. De la misma forma que en el anterior punto, se asignara los puntajes a las centrales.
- t) **Factor de Planta:** Señala el porcentaje de tiempo que se mantiene operando la central. Por ejemplo, hay hidroeléctricas que tienen un factor de planta mínimo, debido a que son utilizadas solo en horas punta, mientras que otras tienen un valor alto ya que tienen una operación casi permanente o de base. Por consiguiente, se procedió como en el anterior punto en la asignación de puntajes.

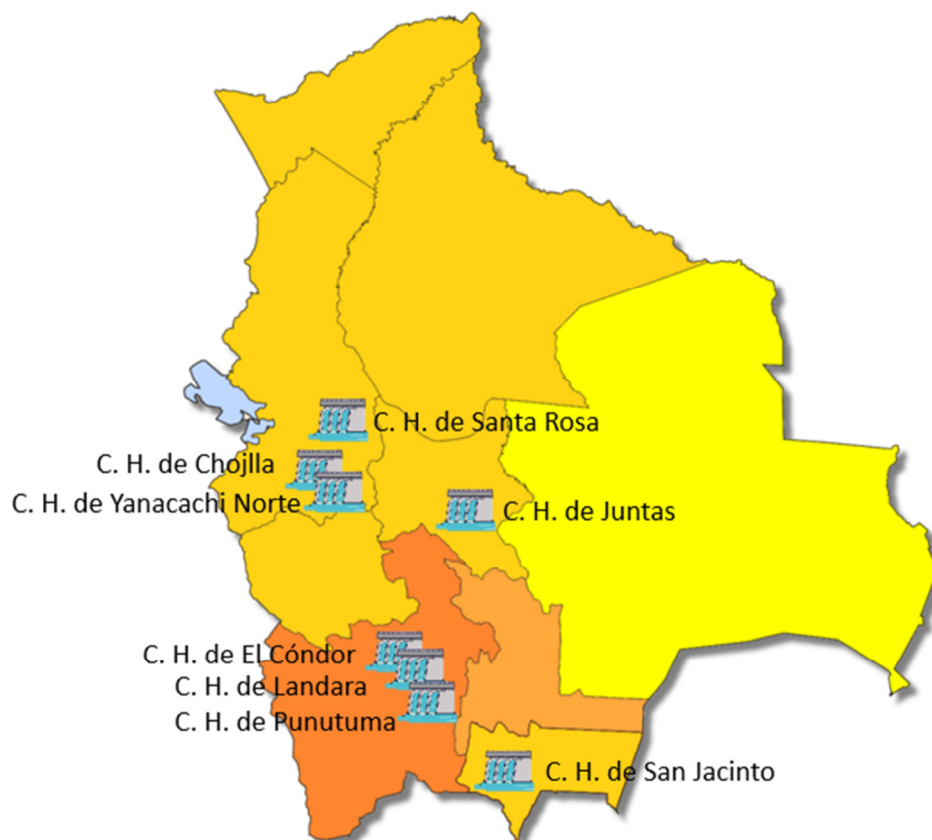
### 3.2 Asignación de Puntaje a cada Central

Los criterios ponderados expuestos en la anterior sección se convierten en la variable X, a fin de obtener un valor Z, como se muestra en la Tabla 1.

**TABLA 1 - VALORES Z DE CADA CRITERIO**

| <b>Criterio Ponderado</b>                          | <b>Fórmula para hallar el valor Z</b>   |
|--|---|
| Existencia del Embalse Inferior                    | $Z_1 = 0,032785 * X_1$                  |
| Existencia del Embalse Superior                    | $Z_2 = 0,032785 * X_2$                  |
| Cercanía a las Líneas de Transmisión               | $Z_3 = 0,032785 * X_3$                  |
| Año de inicio de Operación de la Turbina           | $Z_4 = 0,028481 * X_4 + 0,004304$       |
| Vías de Acceso Disponible                          | $Z_5 = 0,032785 * X_5$                  |
| Disponibilidad de Terreno para el Embalse Inferior | $Z_6 = 0,028481 * X_6 + 0,004304$       |
| Elevación del Lugar                                | $Z_7 = 0,028481 * X_7 + 0,004304$       |
| Cantidad de Turbinas en la central                 | $Z_8 = 0,028481 * X_8 + 0,004304$       |
| Volumen del Embalse Superior                       | $Z_9 = 0,052237 * X_9 - 0,003059$       |
| Uso del Agua Turbinada                             | $Z_{10} = 0,049178 * X_{10}$            |
| Precipitaciones                                    | $Z_{11} = 0,048972 * X_{11} + 0,000206$ |
| Existencia de la Chimenea de Equilibrio            | $Z_{12} = 0,049178 * X_{12}$            |
| Salto Hidráulico                                   | $Z_{13} = 0,069462 * X_{13} - 0,003892$ |
| Caudal   | $Z_{14} = 0,069462 * X_{14} - 0,003892$ |
| Potencia Instalada                                 | $Z_{15} = 0,069462 * X_{15} - 0,003892$ |
| Energía Anual Generada                             | $Z_{16} = 0,069462 * X_{16} - 0,003892$ |
| Diámetro de la Tubería Forzada                     | $Z_{17} = 0,069462 * X_{17} - 0,003892$ |
| Longitud de la Tubería Forzada                     | $Z_{18} = 0,069462 * X_{18} - 0,003892$ |
| Coefficiente de Producción                         | $Z_{19} = 0,069462 * X_{19} - 0,003892$ |
| Factor de Planta                                   | $Z_{20} = 0,069462 * X_{20} - 0,003892$ |

En la Figura 4, se muestra la ubicación de las 8 centrales hidroeléctricas analizadas en el presente trabajo.



**Figura 4:** Ubicación de las centrales reversibles analizadas.

Las 8 centrales analizadas tienen sus respectivos puntajes en función de sus características, de esta manera sumando todos sus ponderadores dan un valor total (P), en la Tabla 2 se muestra la priorización en función del puntaje obtenido, en el cual, la central hidroeléctrica de Juntas obtuvo el mayor puntaje.

**TABLA 2 - PUNTAJES TOTALES DE CADA CENTRAL**

| Nombre de la Central Hidroeléctrica       | Puntaje (P) |
|---|-------------|
| Central Hidroeléctrica de Juntas          | 0,769       |
| Central Hidroeléctrica de Chojlla         | 0,644       |
| Central Hidroeléctrica de Yanacachi Norte | 0,634       |
| Central Hidroeléctrica de Santa Rosa (LH) | 0,506       |
| Central Hidroeléctrica de El Cóndor       | 0,505       |
| Central Hidroeléctrica de San Jacinto     | 0,475       |
| Central Hidroeléctrica de Landara         | 0,455       |
| Central Hidroeléctrica de Punutuma        | 0,394       |

La central hidroeléctrica de Juntas se ubicará en la provincia Carrasco en el departamento de Cochabamba, que generará 91,56 MW, con un salto hidráulico de 326,54 m y un caudal 32,5 m<sup>3</sup>/s,

#### 4. METODOLOGIA PARA EL DISEÑO BÁSICO DE LA CENTRAL REVERSIBLE

##### 4.1 Metodología para el Diseño Básico de la Central Reversible

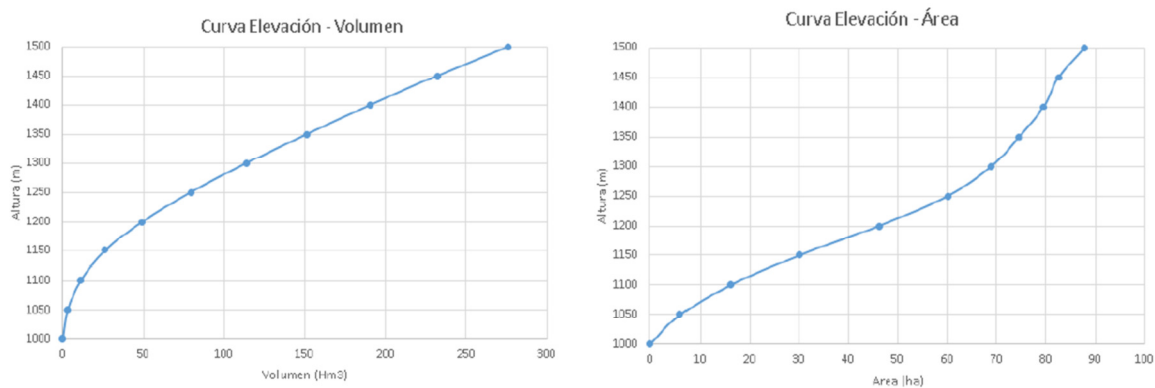
En primer lugar, se calculó la relación L/H, donde L es la longitud horizontal de la tubería forzada y H es el salto que posee la central, de esta manera el valor calculado debe estar entre 4 y 12 para que los costos de construcción de la tubería forzada sean mínimos [16]. Seguidamente se realizó el cálculo del volumen del embalse superior, que se obtiene al despejar de la ecuación (1) [16].

$$E = 0,00000234 * H_b * S \quad (1)$$

donde E es la energía que se almacena para el funcionamiento diario de la central,  $H_b$  el salto de la central y S el volumen que se requiere.

El volumen para el embalse inferior se obtiene al añadir un 50% al volumen del reservorio superior, con el fin de prevenir la disminución rápida del nivel de agua a causa de las evaporaciones, las pérdidas en los conductos y las filtraciones [16].

Con los volúmenes del embalse superior e inferior se elaboraron las curvas de Elevación-Área-Volumen, como se muestra en la Figura 5, donde la primera curva determina el volumen en función de la altura del lugar y la segunda curva establece el área de la presa en función de su altura. Las curvas se hacen a partir de programas de georreferenciación, de fotogrametría o de sistemas información geográfica para hacer un relevamiento de la topografía, que a partir de cada altura se obtiene el área y el volumen que se puede tener.



**Figura 5:** Curvas Área-Volumen-Elevación [16].

Posteriormente, se realizaron los cálculos para hallar la velocidad del agua (V) que pasa por el túnel utilizando la ecuación (2):

$$V = 29,34 * \left( \frac{H_b}{L_{tun}} \right) \quad (2)$$

donde  $L_{tun}$  es la longitud del túnel.

Obteniendo el dato de la velocidad del agua, se calcula el diámetro del túnel con la ecuación (3):

$$D = \left( 1,273 * \frac{Q}{V} \right)^{0,5} \quad (3)$$

donde D es el diámetro del túnel.

Posteriormente, se calcula el diámetro de la tubería forzada:

$$D_{pt} = \left( 1,273 * \frac{Q_{pt}}{V_{pt}} \right)^{0,5} \quad (4)$$

donde la velocidad del agua en la tubería ( $V_{pt}$ ) se obtiene mediante la Tabla 3 [16].  $Q_{pt}$  es el caudal de la tubería forzada que calcula al dividir el caudal de la central entre el número de turbinas:

**TABLA 3 - SELECCIÓN DE VELOCIDADES PARA LA TUBERÍA FORZADA**

| Salto Máximo (m) | Velocidad del Agua en la Tubería Forzada (m/s) |
|------------------|--|
| <91,44           | 5,4864   |
| <152,4           | 6,096  |
| <304,8           | 7,62   |
| <457,2           | 8,5344   |
| <670,56          | 9,7536   |

#### 4.2 Características de la Central Hidroeléctrica de Juntas

De acuerdo al análisis realizado (Tabla 2), la central hidroeléctrica de Juntas, presenta la mejor puntuación para convertirse en una central hidroeléctrica reversible, puesto que presenta un buen caudal, una elevada potencia de generación y adicionalmente tiene la ventaja de estar en fase de construcción, lo que permite una reducción de tiempo y costos de actualización. En la Tabla 4 se muestran las características de la central hidroeléctrica de Juntas [17].

**TABLA 4 - CARACTERÍSTICAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE JUNTAS**

| Parámetro                      | Valor                    |
|--------------------------------|--------------------------|
| Salto Hidráulico               | 326,54 m                 |
| Caudal                         | 32,5 m <sup>3</sup> /s   |
| Potencia Instalada             | 91,56 MW                 |
| Número de Turbinas             | 2                        |
| Longitud de la Tubería Forzada | 1.306,99 m               |
| Factor de Planta               | 0,44                     |
| Diámetro del Túnel             | 3 m                      |
| Longitud del Túnel             | 1.405,5 m                |
| Diámetro de la Tubería Forzada | 1,9 m                    |
| Volumen del Embalse Superior   | 40.000,00 m <sup>3</sup> |

Adicionalmente, se tiene una segunda tubería forzada de 1,5 m de diámetro que será utilizada para una futura ampliación de la central.

#### 4.3 Cálculos y Resultados

La relación L/H de la central de Juntas obtuvo un valor de 4,0025, usando la longitud horizontal de 1.306,99 [m] y un salto de 326,54 [m], el cual está dentro del rango permitido.



En el cálculo del volumen del embalse superior la central obtuvo un valor de 1.437.920,00 [m<sup>3</sup>], puesto que se consideró un tiempo de generación de 12 horas obteniendo una energía almacenada de 1.098,72 MWh, originando una ampliación, ya que el embalse de captación tiene un volumen de 40.000,00 [m<sup>3</sup>]

Posteriormente, se obtuvo el valor de 2.156.880,00 [m<sup>3</sup>], para el volumen del embalse inferior, que es un 50% más del volumen calculado del embalse superior. De esta forma, usando las curvas de elevación-área-volumen, se obtuvieron las áreas que ocuparan los embalses, donde 23,3 Has es para el embalse superior y de 27,2 Has para el embalse inferior.

Prosiguiendo en el diseño, se hizo el cálculo del túnel de la central, el cual se obtuvo un diámetro de 2,46 [m], pero se decidió por mantener el diámetro original de 3 [m], puesto que se tiene una futura ampliación en la central.

Posteriormente, el diámetro calculado de la tubería forzada para la central de Juntas fue de 1,56 [m]. En la Tabla 5 se muestra un resumen de las nuevas características que tendrá la central reversible.

**TABLA 5 - CARACTERÍSTICAS DE LA CENTRAL REVERSIBLE DE JUNTAS**

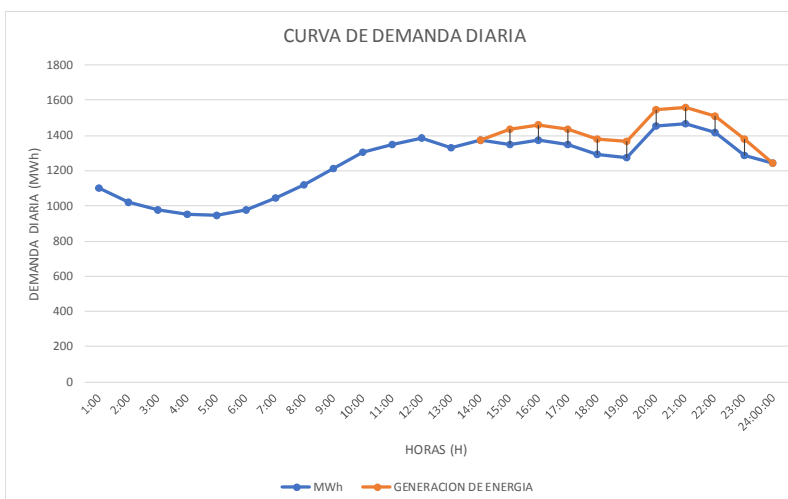
| Características                |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Diámetro de la Tubería Forzada | 1,56 m                      |
| Volumen del Embalse Superior   | 1.437.920,00 m <sup>3</sup> |
| Área del Embalse Superior      | 23,3 ha                     |
| Volumen del Embalse Inferior   | 2.156.880,00 m <sup>3</sup> |
| Área del Embalse Inferior      | 27,2 ha                     |

Finalmente, se eligió el tipo de disposición de las máquinas, donde el más utilizado es el Grupo Binario, ya que se compone de un generador y turbina, en el que el primero también puede funcionar como motor y el segundo como el impulsor de una bomba.

Por otra parte, se debe actualizar los sensores de la central para que monitoree el modo bombeo, como ser los sensores de nivel de agua de los embalses, un cuadro de control de voltaje, frecuencia, potencia consumida y velocidad de la turbina en el modo bombeo, y finalmente un cuadro de control para la selección de los modos de bombeo y generación, con el fin de trabajar de manera segura y eficaz.

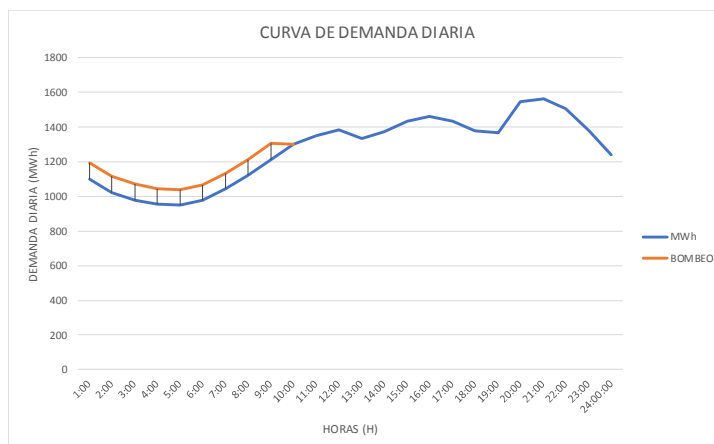
#### 4.4 Beneficios del Funcionamiento de la Central Reversible en Bolivia

Las centrales hidroeléctricas reversibles por lo general generan energía eléctrica en los momentos donde la demanda es alta. En la Figura 6 se muestra la curva de demanda del Sistema Interconectado Nacional (SIN) en el día con el registro más alto del año 2020, donde la central de Juntas necesitaría de 824,04 MWh (tomando en cuenta 9 horas de generación, en los momentos donde los precios de la energía son elevados) almacenando agua en el reservorio superior para cubrir los picos de demanda.



**Figura 6:** Curva de Demanda del SIN del día 11 de marzo de 2020 en Bolivia [18].

El horario de funcionamiento en el modo de bombeo debe estar acorde a la demanda prevista, para saber la cantidad de horas que debe trabajar la bomba para satisfacer las necesidades de la curva de demanda (ver Figura 7).



**Figura 7:** Horario de Funcionamiento de la Bomba de agua [18].

De esta manera se estaría ahorrando 300.774,60 MWh al año, generando 9 horas al día. El cual utilizando la ecuación (5) y tomando un factor de emisión de 0,203 kg de [CO<sub>2</sub>/kWh] [19], se pudo calcular la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que se reduciría al año.

$$Emisiones\ de\ CO_2 = Actividad * Factor\ de\ Emisión = 300.774.600,00\ kWh * 0,203 = 61.057.243,8\ [kg\ de\ CO_2] \cong 61.057,24\ [Toneladas\ de\ CO_2] \tag{5}$$

Finalmente, utilizando un rendimiento térmico promedio de 9.593,08 BTU/kWh y un poder calorífico promedio de 931,396 BTU/PC, se obtuvo un valor promedio de ahorro de gas natural [20].

$$Volumen\ de\ gas\ natural = \frac{300.774.600,00\ kWh * 9593,08 \frac{BTU}{kWh}}{931,396 \frac{BTU}{PC}} = 3.097.881.889,00\ [PC] \tag{6}$$

## 5. COSTO DE IMPLEMENTACIÓN

### 5.1 Costo Total de la Central Hidroeléctrica Reversible

En el costo de la central reversible se considera la excavación en el terreno en función del volumen que se requiera para la generación y bombeo, y la impermeabilización del mismo. Adicionalmente, se toma en cuenta los costos de las tuberías forzadas que corresponde a un valor medio sacado de los proyectos que se tiene en Bolivia [21]. Seguidamente las válvulas, las protecciones y demás accesorios de la central. La Tabla 6 resume estos costos.

**TABLA 6 - INVERSIÓN DE LA CENTRAL REVERSIBLE DE JUNTAS**

| Nombre del Componente                    | Costo Total (\$)     |
|--|----------------------|
| Excavaciones del Embalse Superior        | 6.280.164,66         |
| Excavaciones del Embalse Inferior        | 9.279.889,66         |
| Inst. Geotextil del Embalse Superior     | 240.058,94           |
| Inst. Geotextil del Embalse Inferior     | 285.682,80           |
| Pantalla de Cemento Embalse superior     | 611.505,65           |
| Pantalla de Cemento Embalse inferior     | 727.723,97           |
| Tubería Forzada                          | 1.716,80             |
| SEL-400G Relé de Protección de Generador | 24.000,00            |
| Válvula Mariposa VAG PN16                | 4.319,28             |
| <b>Costo Total</b>                       | <b>17.455.061,75</b> |

Fuente: [21], [22], [23], [24].

En la Tabla 7 se muestra una comparación con el costo de una central hidroeléctrica en Bolivia, tomando un costo referencial de 1.700 [US\$/kW] [25], donde se observa que el costo para actualizar es menor al precio referencial, pero la inversión inicial del proyecto hace que se tenga un precio mayor al costo referencial de una central hidroeléctrica en Bolivia.

**TABLA 7 - COMPARACIÓN DE LA INVERSIÓN DE LA CENTRAL REVERSIBLE DE JUNTAS**

| Nombre del Componente                                      | Costos (US\$)  |
|--|----------------|
| Costo Referencial de una Central Hidroeléctrica en Bolivia | 155.652.000,00 |
| Costo Total para la Actualización                          | 17.455.061,75  |

## 6. CONCLUSIONES

Se analizaron un total de 8 centrales hidroeléctricas candidatas a convertirse en la primera central hidroeléctrica reversible en Bolivia, donde las centrales de Juntas y Chojlla se destacaron sobre las demás, no obstante se puede considerar a las otras centrales que no sobresalieron, si se hace su respectivo estudio para la actualización y mejor aún si se considera instalar adyacentemente una central de energía renovable para aumentar los beneficios de la misma.

El diseño básico de la central muestra que las actualizaciones que requiere la central de Juntas son la ampliación de embalse de captación, la construcción de un embalse inferior y el cambio del último tramo de las tuberías forzadas. Adicionalmente, se determinó que la disposición de las máquinas sea de tipo binario.

En la estimación de costos, se evidencia que el costo de implementación es relativamente bajo para actualizar, pero debido a los precios bajos de la energía en Bolivia, la viabilidad del proyecto está comprometida, que también afecta a otros proyectos como ser las hidroeléctricas o las centrales ERNC.

De esta manera, al instalar la central reversible, el país reduciría 61.057,24 toneladas de emisiones de  $CO_2$  a la atmosfera y ahorraría 3.097,88 [MPC] de gas natural al año.

Finalmente, en Bolivia es necesario empezar a instalar centros de almacenamiento de energía eléctrica en el SIN para dar estabilidad a la red, si se quiere continuar con la puesta en marcha de nuevas centrales de energía renovable.

## REFERENCIAS

- [1] Comité Nacional de Despacho de Carga, «Memoria Anual 2020: Resultados de la Operación del SIN,» Comité Nacional de Despacho de Carga, Cochabamba, Bolivia, 2021.
- [2] Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC), «Capacidad Efectiva (Oct - 2021),» CNDC Web Site, 22 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://www.cndc.bo/agentes/generacion.php>. [Último acceso: 05 Noviembre 2021].
- [3] Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, «Plan Eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia 2025,» Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, 2014.
- [4] ENDE Cooperación, «Proyecto Eólico Qollpana Fase II,» ENDE Cooperación Web Site, 23 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.ende.bo/proyectos/resena/proyecto-eolico-qollpana-fase-ii>. [Último acceso: 01 Febrero 2020].
- [5] L. M. Dilley, «The Economic Feasibility Of Pumped Storage Hydropower,» Washington State University, Pullman, Estados Unidos de América, 2015.
- [6] S. Ambec y C. Crampes, «Electricity Provision With Intermittent Sources Of Energy,» Elsevier, Ámsterdam, Países Bajos, 2012.
- [7] CDEC - SING, «Efectos Técnico-Económicos de la Integración de Energía Eólica y Solar en el SING - Escenario año 2017,» Comunicación Interna, Santiago, Chile, 2016.
- [8] L. E. Benitez, P. C. Benitez y G. C. v. Kooten, «The Economics Of Wind Power With Energy Storage,» Elsevier, Ámsterdam, Países Bajos, 2007.
- [9] Australian Renewable Energy Agency, «AREMI,» Australian Renewable Energy Agency Web Site, 17 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://nationalmap.gov.au/renewables/#share=s-oDPMo1jDBBtwBNhD>. [Último acceso: 15 Diciembre 2020].
- [10] M. Black y G. Strbac, «Value of Bulk Energy Storage for Managing Wind Power Fluctuations,» IEEE, Londres,

- Reino Unido, 2007.
- [11] R. A. Huggins, *Energy Storage*, Stanford, Estados Unidos de América: Springer Publishing, 2010.
- [12] M. A. Sobrevila, «Centrales Hidroeléctricas,» de *Centrales Eléctricas y Estaciones Transformadoras*, Buenos Aires, Argentina, Ediciones Marymar, 1977.
- [13] R. E. J. Pérez, «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,» Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2012.
- [14] ANDRITZ, «<https://www.andritz.com/products-en/hydro/products/pumped-storage>,» ANDRITZ Web Site, Enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.andritz.com/products-en/hydro/products/pumped-storage>. [Último acceso: 25 Mayo 2021].
- [15] E. Corà, «Hydropower Technologies: The State-Of-The-Art,» Hydropower Europe, Bruselas, Europa, 2019.
- [16] Harza Engineering Company, «Pumped-Storage Planning and Evaluation Guide,» EPRI, Chicago, Estados Unidos de America, 1990.
- [17] ENDE Corporación, «Formulario de Generación,» ENDE CORPORACION, Cochabamba, 2020.
- [18] Comité Nacional de Despacho de Carga, «Índice de Tablas,» Comité Nacional de Despacho de Carga Web Site, 04 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.cndc.bo/estadisticas/index.php>. [Último acceso: 05 Febrero 2021].
- [19] Ministerio para la Transición Ecológica, «Guía para el Cálculo de la Huella de Carbono y para la Elaboración de un plan de mejora de una Organización,» Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid, 2018.
- [20] Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear, «Anuario Estadístico 2020,» Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear, Cochabamba, 2020.
- [21] Comité Nacional de Despacho de Carga, «Información de Costos Promedios,» Comité Nacional de Despacho de Carga, Cochabamba, Bolivia, 2021.
- [22] J. T. C. A. G. Z. C. C. T. G. <. M. C. D. G. Juan P. Gutierrez Palza, «Presupuesto y Construcción,» Revista Presupuesto y Construcción, La Paz, Bolivia, 2021.
- [23] SEL Inc., «SEL-400G,» SEL Inc. Web Site, 02 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://selinc.com/es/products/400G/>. [Último acceso: 29 Octubre 2020].
- [24] VAG Group, «Sales Liste,» VAG Group Web Site, 09 Septiembre 2019. [En línea]. Available: [https://www.vag-group.com/fileadmin/user\\_upload/EO\\_Sales-Liste\\_final\\_EN\\_09-9-19.pdf](https://www.vag-group.com/fileadmin/user_upload/EO_Sales-Liste_final_EN_09-9-19.pdf). [Último acceso: 30 Octubre 2020].
- [25] C. Gordillo, Interviewee, *Cálculo del Costo Unitario de Generación*. [Entrevista]. 03 Junio 2021.