



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ANALISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA  
DE ALMACENAMIENTO HÍDRICO POR BOMBEO EN UNA HIDROELÉCTRICA CON  
EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA EN GUATEMALA**

**Marlon Smailli Xicará Sum**

Asesorado por el Mtro. Ing. Daniel Angel Figueroa García

Guatemala, junio de 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA  
DE ALMACENAMIENTO HÍDRICO POR BOMBEO EN UNA HIDROELÉCTRICA CON  
EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARLON SMAILLI XICARÁ SUM**

ASESORADO POR EL MAESTRO ING. DANIEL ANGEL FIGUEROA GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, JUNIO DE 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

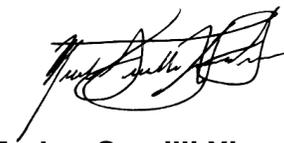


## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ANALISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍDRICO POR BOMBEO EN UNA HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA EN GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 21 de abril de 2023.



**Marlon Smailli Xicará Sum**



**EEPM-PP-0382-2023**  
Guatemala, 21 de abril de 2023

**Director**  
**Armando Alonso Rivera Carrillo**  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica  
Presente.

**Estimado Ing. Rivera**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍDRICO POR BOMBEO EN UNA HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA EN GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos**, presentado por el estudiante **Marlon Smailli Xicará Sum** con cui **2603239850901**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

*"Ded y Enseñad a Todos"*

Mtro. Daniel Angel Figueroa Carrillo  
Asesor(a)

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador(a) de Maestría

Mtro. Edgar Danilo Alvaréz Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EEP-EIME-0381-2023

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍDRICO POR BOMBEO EN UNA HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Marlon Smailli Xicarà Sum**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, abril de 2023



Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.27.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍDRICO POR BOMBEO EN UNA HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA EN GUATEMALA**, presentado por: **Marlon Smailli Xicara Sum** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

A handwritten signature in black ink, enclosed in a hand-drawn oval. The signature appears to be 'Aurelia Anabela Cordova Estrada'.

Firmado digitalmente por AURELIA ANABELA CORDOVA ESTRADA Fecha: 29/06/2023 08:32:01 p.m. Razón: Orden de impresión Ubicación: Facultad de Ingeniería, USAC.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, junio de 2023

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2023 Correlativo: 27 CUI: 2603239850901

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por su fidelidad, amor, sabiduría y cada una de sus bendiciones.
- Mis padres** Pedro Xicar y Norma Sum, por su amor, su esfuerzo y apoyo incondicional demostrado cada día de mi vida.
- Mis hermanos** Evelyn y Vanderlei Xicar, por su motivación y apoyo.
- Mi abuela** Julia Santiago (q. e. p. d.). por sus consejos, sabiduría y ejemplo y por enseñarme a través de su vida que no hay imposibles.
- Mi novia** Cindy Xiloj, por su amor, apoyo, comprensión y motivación que me brinda cada día.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por abrirme las puertas a la educación superior, por ser más que un centro de enseñanza académica, por fortalecer mi conciencia social y enseñarme a velar por el bienestar de mi país.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionar el conocimiento necesario para aportar a la sociedad soluciones en la rama de la ingeniería eléctrica, y estar formada por profesionales con valores y talentosos.
<b>Escuela de Estudios de Postgrados</b>	Por permitir formar profesionales mediante sus programas de estudios.
<b>Ingeniero</b>	José Rojas, por su apoyo en el desarrollo de mis prácticas profesionales finales; con ello tuve acceso a experiencias nuevas.
<b>Asesor</b>	Ing. Daniel Figueroa, por su colaboración y apoyo en la elaboración del trabajo de graduación, su amistad y responsabilidad.
<b>Mis amigos</b>	Cada uno de los que he conocido a lo largo mi vida estudiantil, que me han brindado su apoyo, conocimiento y colaboración.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
3. JUSTIFICACIÓN .....	9
4. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	11
5. HIPÓTESIS .....	13
6. MARCO TEÓRICO.....	15
6.1. Energía eléctrica en Guatemala .....	15
6.1.1. Mercado eléctrico .....	15
6.1.2. Matriz de generación de electricidad .....	17
6.2. Centrales hidroeléctricas .....	18
6.2.1. Contribución hidroeléctrica en Guatemala.....	19
6.2.2. Clasificación por potencia de centrales hidroeléctricas .....	20

6.2.3.	Tipos de centrales hidroeléctricas .....	20
6.2.3.1.	Centrales hidroeléctricas de embalse ..	20
6.2.3.2.	Centrales mixtas.....	22
6.2.4.	Aspectos de una central hidroeléctrica.....	22
6.2.4.1.	Altura de salto o carga de agua.....	22
6.2.4.2.	Caudal.....	24
6.2.4.2.1.	Curva de caudales medios diarios de un año estacional .....	24
6.2.4.2.2.	Curva de caudales medios clasificados.....	25
6.2.4.2.3.	Curva de caudales del año más seco.....	27
6.2.4.3.	Potencia instalada .....	27
6.2.4.4.	Energía producida .....	28
6.3.	Sistemas para almacenar de energía.....	30
6.3.1.	Sistemas electroquímicos.....	31
6.3.1.1.	Baterías de estado sólido .....	31
6.3.1.2.	Baterías de flujo .....	32
6.3.1.3.	Cédulas o celdas de combustible.....	32
6.3.1.4.	Hidrógeno.....	32
6.3.2.	Sistemas térmicos .....	33
6.3.3.	Sistemas electromagnéticos.....	33
6.3.3.1.	Por supercondensadores .....	33
6.3.3.2.	Por superconductividad .....	34
6.3.4.	Sistemas electromecánicos.....	34
6.3.4.1.	Por aire comprimido .....	35
6.3.4.2.	Volante de inercia.....	35
6.3.4.3.	Gravitacional .....	36

6.4.	Sistema de almacenamiento hídrico por bombeo.....	36
6.4.1.	Centrales de almacenamiento hídrico por bombeo a nivel mundial.....	37
6.4.2.	Tipos de centrales PHES.....	39
6.4.2.1.	Sistema de ciclo cerrado .....	40
6.4.2.2.	Sistema de ciclo semi abierto .....	40
6.4.2.3.	Sistema de ciclo abierto.....	40
6.4.3.	Esquemas de centrales PHES.....	40
6.4.3.1.	Esquema binario.....	40
6.4.3.2.	Esquema ternario .....	41
6.4.3.3.	Esquema cuaternario.....	42
6.4.4.	Elementos principales de un central PHES .....	43
6.4.4.1.	Embalse o reservorio .....	43
6.4.4.2.	Presa .....	44
6.4.4.3.	Tubería de presión o forzada.....	46
6.4.4.4.	Casa de máquinas.....	46
6.4.4.5.	Turbinas hidráulicas.....	47
6.4.4.5.1.	Turbinas de acción o impulso .....	48
6.4.4.5.2.	Turbinas de reacción ....	49
6.5.	Sistemas de bombeo.....	50
6.5.1.	Elementos constructivos básicos.....	50
6.5.2.	Tipos de bombas hidráulicas .....	50
6.5.2.1.	Bombas cinéticas.....	52
6.5.2.2.	Bombas de desplazamiento positivo ...	52
6.5.3.	Cálculo de sistemas de bombeo.....	54
6.5.3.1.	Caudal .....	54
6.5.3.2.	Principio de Bernoulli .....	54
6.5.3.3.	Altura neta .....	55

6.5.3.4.	Perdidas de carga .....	55
6.5.3.4.1.	Pérdidas en tubería por fricción.....	56
6.5.3.4.2.	Pérdidas en accesorios.....	57
6.5.4.	Potencia efectiva .....	58
6.5.5.	Potencia eléctrica .....	58
7.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO .....	59
8.	MARCO METODOLÓGICO .....	63
8.1.	Tipo de estudio.....	63
8.2.	Diseño de investigación .....	63
8.3.	Variables de estudio.....	63
8.4.	Fases metodológicas. ....	65
8.4.1.	Fase uno: recolección de información.....	65
8.4.2.	Fase dos: ubicación para la construcción del embalse inferior.....	66
8.4.3.	Fase tres: trazado de tubería de Bombeo. ....	66
8.4.4.	Fase cuatro: cálculo de bomba y tubería.....	66
8.4.5.	Fase cinco: proyección de despacho de energía anual. ....	67
8.4.6.	Fase seis: análisis económico.....	67
8.4.7.	Fase siete: análisis y discusión de resultados.....	67
9.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	69
9.1.	Herramientas de recolección de información .....	69
9.2.	Herramientas de estadística descriptiva.....	69
10.	CRONOGRAMA .....	71

11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO ..... 73

REFERENCIAS ..... 75

APÉNDICES ..... 83

ANEXOS..... 85



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Matriz eléctrica de Guatemala .....	18
<b>Figura 2.</b>	Aporte de energía 2022 .....	19
<b>Figura 3.</b>	Central hidroeléctrica con embalse.....	21
<b>Figura 4.</b>	Representación de las alturas .....	23
<b>Figura 5.</b>	Esquema de tecnologías para almacenar energía .....	30
<b>Figura 6.</b>	Capacidad instalada (GW) de PHES global para 2021 .....	39
<b>Figura 7.</b>	Esquema cuaternario.....	43
<b>Figura 8.</b>	Presas de tierra y de escollera .....	45
<b>Figura 9.</b>	Presas de concreto.....	46
<b>Figura 10.</b>	Casa de máquinas según su embalse inferior .....	47
<b>Figura 11.</b>	Clasificación de bombas hidráulicas .....	51
<b>Figura 12.</b>	Comparación de caudal y altura de bombeo .....	52
<b>Figura 13.</b>	Bomba de desplazamiento positivo .....	53
<b>Figura 14.</b>	Cronograma de actividades .....	71

### TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Factores K de las diferentes turbinas .....	26
<b>Tabla 2.</b>	Clasificación según las horas equivalentes de trabajo .....	29
<b>Tabla 3.</b>	Capacidad en centrales de transferencia de agua por bombeo... ..	38
<b>Tabla 4.</b>	Descripción de variables.....	64
<b>Tabla 5.</b>	Recursos necesarios para la investigación.....	73



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>US\$</b>	Dólar americano
<b>GW</b>	Giga watt
<b>GWh</b>	Giga watt hora
<b>°</b>	Grado
<b>°C</b>	Grado Celcius
<b>h</b>	Hora
<b>kF</b>	Kilo faradio
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kW</b>	Kilo watt
<b>kWh</b>	Kilo watt hora
<b>kN</b>	Kilo newton
<b>psi</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>MW</b>	Mega watt
<b>MWh</b>	Mega watt hora
<b>N</b>	Newton
<b>Pa</b>	Pascal
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Q</b>	Quetzal
<b>s</b>	Segundo



## GLOSARIO

<b>AC</b>	<i>Alternating Current</i> (corriente alterna)
<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista
<b>Azud</b>	Estructura hidráulica que permite elevar el agua a una cota determinada.
<b>CAES</b>	<i>Compressed Air Energy Storage</i> (almacenamiento de energía por aire comprimido)
<b>CEPAL</b>	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
<b>CH</b>	Central hidroeléctrica
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
<b>CRIE</b>	Comisión Regional de Interconexión Eléctrica
<b>CO2</b>	Dióxido de carbono
<b>DC</b>	<i>Direct Current</i> (corriente directa)
<b>EOR</b>	Ente Operador Regional
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero

<b>MER</b>	Mercado Eléctrico Regional
<b>PEM</b>	<i>Polymer Electrolyte Membrane</i> (membrana de electrolito polimérico)
<b>PHES</b>	<i>Pumped Hydroelectric Energy Storage</i> (almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo)
<b>POE</b>	Precio de Oportunidad de la Energía
<b>RFC</b>	<i>Regenerative Fuel Cell</i> (celda de combustible regenerativo)
<b>RRO</b>	Reserva Rodante Operativa
<b>SMES</b>	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i> (almacenamiento de energía electromagnético en superconductores)
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado
<b>TES</b>	<i>Thermal Energy Storage</i> (almacenamiento de energía térmica)
<b>TIR</b>	Tasa Interna de Retorno
<b>VAN</b>	Valor Actual Neto

## RESUMEN

La presente investigación busca demostrar si es posible adaptar, a una central hidroeléctrica ya existente, un sistema de bombeo, que le permita funcionar como central de almacenamiento hídrico por bombeo, cuyo funcionamiento de operación sea el de un esquema cuaternario. El objetivo es aportar un incremento en la producción de la generación de energía eléctrica, sobre todo, tener una generación más estable a lo largo de un año estacional, repercutiendo en el precio spot del mercado eléctrico de oportunidad.

Considerando que las centrales hidroeléctricas de Guatemala no cuentan con dos embalses, se identificará la ubicación adecuada para la construcción de un embalse aguas abajo. El dimensionamiento del embalse inferior será en función del volumen de agua que se desea devolver a un embalse superior, tomando en cuenta los datos históricos de generación hidroeléctrica de la central en estudio.

Así mismo, se calcularán las características técnicas de la tubería y del sistema de bombeo, que permitan llevar un caudal determinado durante un periodo de tiempo definido, por los horarios de demanda en los que el precio de la energía eléctrica tiene sus valores más bajos.

Por lo anterior, se analizará la viabilidad y rentabilidad de los sistemas de bombeo apropiados, para contribuir a una generación hidroeléctrica más sólida, que beneficie al Sistema Nacional Interconectado (SNI), que permita la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y disminuya la dependencia de los combustibles fósiles como base de generación eléctrica.



## **OBJETIVOS**

### **1.1. General**

Analizar técnica y económicamente la implementación de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo, en una hidroeléctrica con embalse de regulación diario, para la generación de energía en horario de demanda en punta durante un año estacional.

### **1.2. Específicos**

- Calcular el dimensionamiento óptimo de un embalse aguas abajo, para obtener la capacidad de generación máxima durante un año estacional.
- Determinar las características técnicas de los equipos, para la instalación del sistema de almacenamiento hídrico por bombeo, que cubra la demanda máxima en la banda horaria en punta.
- Estimar la energía y eficiencia generada en la banda horaria en punta, a partir de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo.
- Analizar la viabilidad económica en la implementación de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo, en una central hidroeléctrica de Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

La generación de energía hidroeléctrica en Guatemala, en horario de banda en punta, no es regular durante un año estacional, debido a las condiciones climáticas y a la demanda. Lo anterior, obliga a la utilización de fuentes de energía no renovables para el abastecimiento de energía eléctrica, además de sanciones para la central generadora cuando no cumple con la disponibilidad máxima de potencia.

Se analizará el método de almacenamiento hídrico por bombeo, convirtiendo una central hidroeléctrica convencional en una central reversible mixta, para tener disponibilidad de potencia nominal en horarios de demanda pico e incrementar el despacho de energía anual.

El presente trabajo de investigación aportará información técnica y económica, en cuanto a la viabilidad de la aplicación de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo. Beneficiará a las centrales hidroeléctricas en el despacho de energía durante un año estacional; así mismo, se puede beneficiar el subsector eléctrico de Guatemala, ya que ante el crecimiento de las fuentes de energía intermitentes el desarrollo de las centrales hidroeléctricas representa una estabilidad eléctrica.

Para la aplicación de un sistema de almacenamiento por bombeo, se considerará la propuesta de construcción de un embalse inferior, determinando su ubicación y dimensiones necesarias a través de un levantamiento topográfico, tomando en cuenta historiales de generación y despacho de diez años atrás. Esto también contribuirá a realizar el diseño de un sistema de

bombeo, para devolver recurso hídrico al embalse superior, tomando en cuenta el trazado de la instalación de una tubería independiente. La información obtenida proporcionará indicadores para el análisis técnico y económico, para estimar la viabilidad y rentabilidad del proyecto. Es importante mencionar que para el desarrollo de esta investigación se ha considerado la necesidad de contar con recurso humano y financiero, que permita la obtención de información.

En el capítulo uno se expone los conceptos teóricos para la comprensión del mercado eléctrico del país, el funcionamiento y parámetro de las centrales hidroeléctricas, los sistemas de almacenamientos existentes y los aspectos de diseño importantes, para la construcción de un sistema de bombeo independiente. En el capítulo dos se desarrolla el análisis de la información recopilada, para calcular el volumen de agua requerida en la implementación del sistema de bombeo y, con ello, proponer la ubicación de un embalse inferior y determinar las características técnicas de la tubería y el sistema de bombeo que se instalará. En el capítulo tres se hará el análisis económico de la implementación del sistema de bombeo, así como la estimación del tiempo de retorno de la inversión. En el capítulo cuatro se exponen los resultados obtenidos cuantitativa y gráficamente, para discutir los mismos y determinar las consideraciones que se deben aplicar, la viabilidad y rentabilidad de la investigación.

## 1. ANTECEDENTES

En Guatemala no existe ningún antecedente de una central hidroeléctrica, cuyo funcionamiento sea el de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo, aunque es un tipo de tecnología bastante utilizada, especialmente en países con escasos recursos de agua, en donde optimizan el recurso. En China, Estados Unidos y Brasil, entre otros. A continuación, se presentan antecedentes que reflejan la importancia del sistema en cuestión.

En la investigación de Núñez (2014), se analizaron los beneficios y se concluyó que a medida que se vayan involucrando más centrales fotovoltaicas y eólicas intermitentes, en un sistema eléctrico de un país, se hace más necesario y rentable la aplicación de sistemas de almacenamiento de agua por bombeo, que funcionen como respaldo de potencia, confirmándolo mediante el Modelo de Operación y Planificación, incluyendo Renovables y Almacenamiento (MOPRA). Además, estos sistemas de almacenamiento mejoran el factor de planta de las generadoras térmicas, lo que implica menores precios en los contratos de potencia y mayor competitividad.

En el artículo científico *Diseño y cálculo de una central híbrida solar-hidráulica en Gran Canaria*, de la Universidad Nacional de Colombia, con sede Medellín, de la Facultad de Minas, publicado en febrero de 2018, se muestran cálculos para dimensionar el equipo necesario en una central hidroeléctrica, que funciona con un sistema de bombeo bidireccional; es decir, una tubería que funciona como despacho de agua hacia una turbina, que también se utiliza como medio de ascenso del recurso hídrico. Se consideró que, para una central hidroeléctrica cuya generación anual es de 18.17 GWh, una central de energía

solar que genera 5.796 GWh y un consumo por bombeo de 16.18 GWh, se tiene un balance energético positivo, lo que permite una viabilidad económica con un flujo de caja a partir del sexto año. Este artículo centra la producción en una franja horaria de trabajo. (Beltrán et al., 2018)

Según Blázquez (2020), en su tesis de maestría denominada *Análisis tecno-económico del almacenamiento mediante centrales hidráulicas de bombeo de agua marina en el sistema eléctrico de Baja California Sur*, indica que es posible aprovechar el recurso hídrico, mediante un sistema que almacene agua por bombeo y que se pueden adoptar como una solución técnica y económica, que integre energías renovables y las enfoque hacia el sistema de electricidad de un país. Este documento demuestra la flexibilidad del método de almacenamiento hídrico por bombeo, pues diferencia si se trata de agua salada o agua dulce, también la utilización de turbinas reversibles que pueden alcanzar una eficiencia máxima entre 80 y 82 % o turbinas y bomba centrífuga por separado, que alcanzan una eficiencia por arriba del 90 %. El autor consideró los costos relacionados a la inversión de la creación de una central completa de entre 1,500 y 4,700 US\$/kW, cuya potencia corresponde a 250 MW, con un embalse estimado de 1,500 MWh. Otros aspectos a considerar son el salto hidráulico, las características que presenta el terreno y los tiempos de almacenaje y despacho.

En la página oficial de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) se puede observar la variabilidad en la generación de energía basada en hidroeléctricas por mes, lo que permite concluir que en un año estacional, con bastante precipitación pluvial, se puede lograr hasta un 80 % de obtención de energía eléctrica en promedio mensual, mientras que en épocas secas se puede obtener hasta un 20 %. En contraste, se observa la poca participación de

la energía eléctrica proveniente de carbón en época de lluvia y, un consumo mayor, en época seca.

De acuerdo con Richter et al. (2020), en el marco de una conferencia científica, destacan que la tecnología de almacenamiento de energía mediante bombeo es la más rentable y sostenible, proveniente de fuentes naturales renovables y con menor huella de carbono. También mencionan que en áreas topográficas inadecuadas para el almacenamiento por bombeo convencional, se emplea un almacenamiento subterráneo que no perjudica las condiciones ambientales del terreno.

Dentro de la tesis doctoral de Pitorac (2021), se menciona que el enfoque de la investigación va dirigido a mejorar las plantas hidroeléctricas existentes, convirtiéndolas en plantas de bombeo por medio de túneles ya existentes, y se centra en dos parámetros: 1) la oscilación de masa y 2) la estabilidad de oscilaciones de masa. Concluye que lograr la conversión es posible al hacer modificaciones menores a las estructuras de las tuberías existentes. También se considera la modificación de tanques de compensación o de presión aguas abajo, los cuales, de no realizarse de manera óptima, representarán pérdidas de potencia.



## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Derivado de la actividad productiva y social del país, se ha identificado un horario en el cual la curva de demanda eléctrica muestra los valores más altos registrados. Es entre las 18:00 y 22:00 horas de cada día y se denomina en horario en punta, según se define en el artículo 87 del reglamento del Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Para cubrir dicha demanda se hace uso de la mayor cantidad de potencia eléctrica generada contratada, desde la disponibilidad de las fuentes de energía renovable y no renovable.

Partiendo de que cada una de las centrales hidroeléctricas trabaja mediante embalses, o a filo de agua, y programaciones anuales o diarias de despacho, se comprende que todas están sometidas a las condiciones naturales de abastecimiento de agua para su funcionamiento. En época de lluvia, los embalses se llenan y los ríos llevan caudales grandes, lo cual permite que la generación de electricidad pueda alcanzar porcentajes promedio del 70 % del consumo eléctrico del país, aunque la programación anual es de 65 %. Por otro lado, en época de verano las centrales hidroeléctricas hacen uso del recurso hídrico acumulado, pero al no tener reabastecimiento constante las cantidades de agua disminuyen. Esto repercute en la reducción de producción de energía hidroeléctrica y se hace necesario la utilización de otras fuentes de energía, para suplir la demanda máxima en banda en punta cada día. Lo anterior, conlleva a contar con un sistema fiable pero inestable en dicha banda horaria.

Según datos de la CEPAL, en Guatemala se tiene un crecimiento poblacional constante; sin embargo, para el 2021 se tuvo un decaimiento

histórico debido a las defunciones por la pandemia de COVID-19. A pesar de ello, la demanda de potencia de energía eléctrica siguió en aumento, por lo tanto, es importante optar por potenciar la utilización de las fuentes renovables de energía eléctrica del país, que cubran la demanda ascendente. Actualmente, para cubrir la demanda máxima se utilizan, en su mayoría, fuentes renovables, pero una parte importante proviene de fuentes no renovables. La principal fuente de energía térmica es el carbón y el búnker, lo que representa una aportación a los GEI y un incremento en el precio dentro del mercado de oportunidad eléctrico.

Lo expuesto anteriormente conduce a plantear la siguiente pregunta principal: ¿Cuánto aportaría un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo a la generación de energía eléctrica, en horario de demanda en punta durante un año estacional, en una hidroeléctrica con embalse de regulación diaria en Guatemala?

Así mismo, se plantean las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es el dimensionamiento adecuado de un embalse aguas abajo, para obtener la capacidad de generación máxima de potencia, en horario de banda en punta durante un año estacional?
- ¿Qué características técnicas deben tener los equipos que se adaptan a la instalación de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo, que cubra la demanda en la banda horaria en punta?
- ¿Cuánta energía y eficiencia se genera en la banda horaria en punta a partir de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo?

- ¿Cuál es la viabilidad económica en la aplicación de un sistema de almacenamiento hídrico, en una central hidroeléctrica de Guatemala?



### **3. JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación se desarrolla en el marco de la línea de investigación de aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos, de la Maestría en Energía y Ambiente.

Se opta por analizar el método de almacenamiento hídrico por bombeo, el cual representa la reutilización de una porción o totalidad de agua ya despachada, para mantener la producción máxima de potencia en la banda horaria en punta. Además, puede contribuir a que en época seca no se use la reserva de potencia proveniente de fuentes no renovable, para cubrir sus contratos de generación. En ese sentido, también permite la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y se reduce la emisión de CO<sub>2</sub> equivalentes. Al tener el enfoque de un horario específico de trabajo, también aporta para una reducción de los precios de energía eléctrica en la banda horaria más cara.

En lo referente al almacenamiento de energía, existen muchas tecnologías que permiten almacenar energía para ser despachada cuando sea requerida en tiempos limitados. Sin embargo, la utilización de cada método de almacenamiento obedece a características particulares, en donde se analiza el precio, el tiempo de carga y descarga, la fuente de energía primaria, la eficiencia y la cantidad de producción de energía eléctrica lograda. Se ha optado por el almacenamiento por bombeo por los valores de eficiencia con los que trabajan, que están entre un 80 y un 93 %, dependiendo de las condiciones de trabajo. Además, la fuente de energía primaria es el agua, lo que permite el funcionamiento en centrales hidroeléctricas ya establecidas, que también

representan la consolidación de fuentes de energía renovables dentro de la matriz energética de Guatemala.

Se desea beneficiar al subsector eléctrico, a los usuarios finales y al medio ambiente. A partir de la aplicación de este sistema de almacenamiento, se pretende que la mayoría de las centrales hidroeléctricas puedan analizar la posibilidad de incluir este diseño con las condiciones geográficas, topográficas, ambientales y sociales correspondientes.

Esta investigación es relevante dado que este tipo de sistema no se encuentra instalado en ninguna central hidroeléctrica de Guatemala. En comparación con los países más desarrollados, el recurso hídrico del país es abundante, pero con el tiempo se pueden ir perdiendo por no tener un uso sostenible del mismo.

#### **4. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Ante la poca estabilidad de generación hidroeléctrica en la banda horaria en punta durante un año estacional, se busca realizar aportes en la producción de energía eléctrica, mediante la aplicación del método de almacenamiento por bombeo, que permita despachar mayor energía potencial de agua durante un horario específico.

Es importante hacer un uso sostenible de cada recurso renovable, por lo tanto, se determinará la capacidad máxima de generación actual de los equipos instalados en la central hidroeléctrica, para evaluar cuál será la cantidad de agua que se debe devolver al embalse superior durante el día y la cantidad a utilizar en horario de banda en punta. Además, se tendrá en cuenta que la mayoría de hidroeléctricas del país no poseen un reservorio inferior.

Se considerará el factor ambiental y las condiciones del terreno aguas abajo, para evaluar la creación de un embalse inferior que cubra el potencial energético requerido en los horarios de banda en punta, en las condiciones más escasas de recurso hídrico. También se tomarán en cuenta las condiciones topográficas e hídricas, para la implementación del sistema de bombeo y tubería adecuada que devolverá un caudal determinado.

En esa línea, se espera que toda la información técnica y económica aporte, a las diferentes centrales hidroeléctricas del país, un panorama de la viabilidad particular de la instalación de un sistema de almacenamiento de este tipo. También se tendrán en cuenta las estimaciones calculadas, para considerar el efecto en la curva de demanda del sistema eléctrico nacional.

Además, se contribuirá a reducir el uso de fuentes no renovables y se considera incidir en el precio de oportunidad del mercado eléctrico.

## **5. HIPÓTESIS**

Debido a que el estudio es de carácter descriptivo–cuantitativo, no se aplica la formulación de hipótesis.



## **6. MARCO TEÓRICO**

El desarrollo del presente trabajo de investigación implica el conocimiento de conceptos teóricos, que permitan una mejor comprensión del tema, por lo que en este apartado se muestran diferentes conceptos.

### **6.1. Energía eléctrica en Guatemala**

El sector eléctrico está compuesto por un sistema e infraestructura física que permite suministrar energía a todo el país. (Dirección General de Energía, 2017). “Funciona como un libre mercado desde 1996, donde fueron separadas las actividades de la industria eléctrica, por lo que se abrió a la libre competencia la generación y la comercialización de energía” (Administrador del Mercado Mayorista [AMM], 2020, p. 5).

#### **6.1.1. Mercado eléctrico**

En el mercado mayorista se convienen dos productos, que son potencia y energía. Ambos productos se manejan dentro de un despacho económico, en el que “las centrales con menor costo variable de generación son despachadas con prioridad hasta cubrir la demanda y los requerimientos de calidad del servicio. Tanto la potencia como la energía pueden ser remunerados económicamente, a través de seis mercados distintos” (AMM, 2020, p. 11).

- Mercado de oportunidad de la energía: corresponde a un tipo de mercado que se basa en faltantes y excedentes de energía, en donde el precio varía según la hora y los proveedores (AMM, 2020). “En este

mercado se fija el POE que es el máximo costo variable en que se incurre cada hora para abastecer un KWh adicional -costo marginal de corto plazo-" (AMM, 2020, p. 11).

- Mercado a término: "Son contratos bilaterales entre Agentes de potencia y/o energía. Dichos contratos son administrados por el AMM" (AMM, 2020, p. 11).
- Mercado de desvíos de potencia: "Es el conjunto de intercambios en el Mercado Mayorista, que resulta de los excedentes o faltantes de potencia comprometida, en contratos entre sus participantes" (AMM, 2020, p. 11).
- Servicio complementario RRO (Reserva Rodante Operativa): "Dependiendo el tipo de tecnología de las centrales, los generadores pueden prestar el servicio de RRO" (AMM, 2020, p. 11). "Este se remunera bajo un esquema de mercado, donde los participantes presentan ofertas y cumplen ciertos requerimientos técnicos para ser despachados en función de las ofertas que presenten y su CVG" (AMM, 2020, p. 11).
- Mercado Eléctrico Regional (MER): es un mercado en donde se realizan transacciones de energía con conexiones dentro de la región de América Central, en donde funciona como un mercado adicional. Dentro de este mercado, Guatemala ha sobresalido, llegando a ser el país que más exportación de energía aporta al MER. La CRIE es la entidad reguladora en este mercado y el EOR es el operador del mercado y del sistema. (AMM, 2020)

- El mercado eléctrico mexicano: es el “mercado muy reciente, se liberalizó e inició operaciones en enero de 2016, basando sus operaciones en una nueva normativa, afectando las transacciones entre Guatemala y México, abriendo la posibilidad de que Guatemala exporte el excedente de energía generado” (AMM, 2020, p. 11). Actualmente, se tienen 400 MW de capacidad para la importación y la exportación. (AMM, 2020). “El mercado de corto plazo, en el cual se realizan las transacciones de energía, consta de tres mecanismos de participación: Mercado de Día en Adelanto (MDA), Mercado de una Hora en Adelanto (MHA), Mercado de Tiempo Real (MTR)” (AMM, 2020, p. 11). El pago de las transacciones se realiza en moneda mexicana.

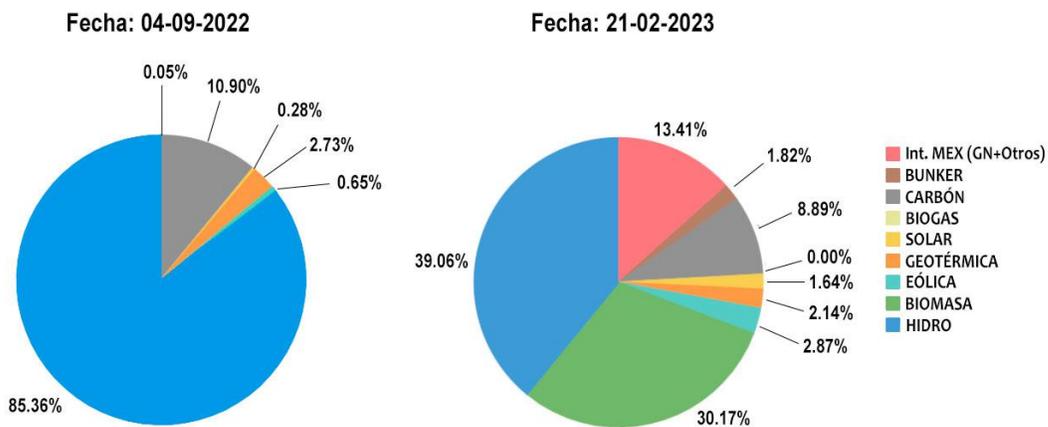
#### **6.1.2. Matriz de generación de electricidad**

La matriz de generación del apartado eléctrico de Guatemala comprende el uso de fuentes de energía primaria y secundaria. La CNEE y AMM tienen registro cuantitativo de la energía eléctrica producida por día o por periodos, según el tipo de consulta. Además, es posible observar las fuentes que contribuyen a la matriz de generación eléctrica, siendo estas:

- Interconexión
- Geotérmica
- Eólica
- Solar
- Hidroeléctrica
- Biomasa
- Biogás
- Carbón

A continuación, se muestra una imagen con la matriz de generación para dos fechas distintas, donde se puede observar la importancia y la variación del recurso hídrico dentro de la matriz eléctrica del país.

**Figura 1.**  
*Matriz eléctrica de Guatemala*



*Nota.* Los gráficos muestran la participación del recurso hídrico en la generación de energía eléctrica en dos fechas distintas. Datos obtenidos de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2023). *Monitoreo del Mercado Mayorista*. ([https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page\\_id=9336](https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=9336)), consultado el 10 de marzo de 2023. De dominio público. Editado con Adobe Photoshop.

## 6.2. Centrales hidroeléctricas

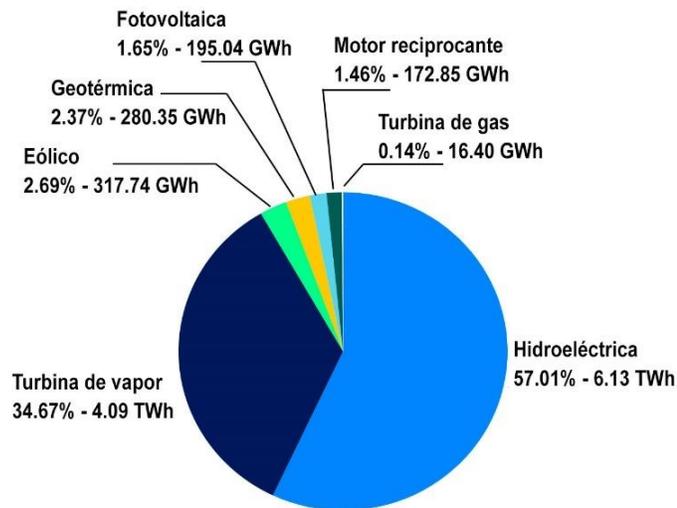
Una central hidroeléctrica (CH) “es una planta que convierte la energía del agua en energía eléctrica” (Monroy y Montaña, 2015, p.2), que funciona a partir de un sistema de conversión electromecánica, convirtiendo “la energía potencial y cinética del agua en energía eléctrica disponible” (J. Sanz, 2016, p. 23).

### 6.2.1. Contribución hidroeléctrica en Guatemala

Las centrales hidroeléctricas son la fuente de energía eléctrica que más aportan al Sistema Nacional Interconectado (SNI) en un año calendario. Según el AMM, para el 2022 las centrales hidroeléctricas aportaron al sistema 6,730.54 GWh, siendo esta la fuente principal de obtención de energía eléctrica para el país.

**Figura 2.**

*Aporte de energía 2022*



*Nota.* El gráfico muestra el porcentaje y cantidad de energía generada por cada fuente de generación en el año 2022. Datos obtenidos del Administrador del Mercado Mayorista (2023). *Generación y demanda.* ([https://www.amm.org.gt/portal/?page\\_id=2617](https://www.amm.org.gt/portal/?page_id=2617)), consultado el 10 de marzo de 2023. De dominio público. Editado con Adobe Photoshop.

Derivado de los recursos naturales del país, cuencas hidrográficas y clima, se puede observar que el recurso hídrico es la base de la producción de energía eléctrica, por lo tanto, es indispensable la conservación y uso

responsable de estas fuentes. Además, existen proyectos hidroeléctricos en construcción que pueden incrementar la potencia instalada y la energía disponible.

### **6.2.2. Clasificación por potencia de centrales hidroeléctricas**

Como lo indica Bernhard (2006, citado en Osorio, 2017, p. 9) las centrales hidroeléctricas se clasifican según su potencia, en:

- Pico-centrales: 0.5 – 5 kW
- Microcentrales: 5 – 50 kW
- Minicentrales: 50 – 500 kW
- Pequeñas centrales: 500 – 5,000 kW

### **6.2.3. Tipos de centrales hidroeléctricas**

Según lo describe J. Sanz (2016), se pueden encontrar muchas clasificaciones de CH, dependiendo de los autores y de lo exhaustivo que se desee ser. Se pueden dividir en los siguientes grupos, según sus aspectos técnicos.

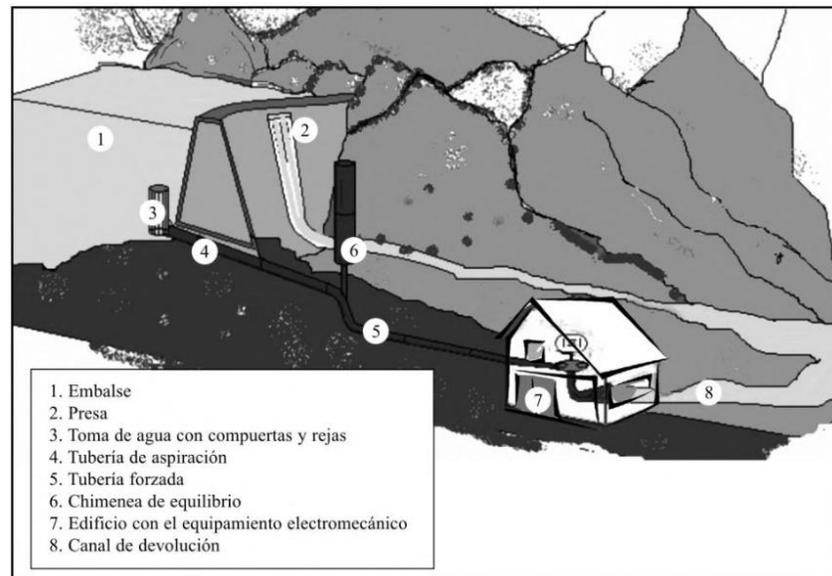
#### **6.2.3.1. Centrales hidroeléctricas de embalse**

Son CH que cuentan con un embalse para almacenar el agua y del cual se toma el recurso hídrico, con capacidad de seleccionar el momento del día, los días, las semanas o meses del año en que la turbina funcione sin perder agua. Este tipo de selección puede beneficiar, por un lado, en la regulación del mercado energético y, por otro lado, la venta de energía se puede realizar en los horarios en que esta alcanza precios elevados. (J. Sanz, 2016). Es decir,

“horario de Banda en punta – período de máxima demanda -: 18 a 22 horas”  
(Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista, Art. 87, 2007).

### Figura 3.

*Central hidroeléctrica con embalse*



*Nota.* La imagen muestra las partes de una central hidroeléctrica de embalse superior. Obtenido de J. Sanz (2016). *Energía hidroeléctrica* (p. 27.). Pressas de la Universidad de Zaragoza.

(<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Q5BfDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=definicion+hidroelectrica&ots=CwsMCVqW9e&sig=3Ozn53j6fFOZi23-zsJ4MnZ0vOM#v=onepage&q=definicion%20hidroelectrica&f=false>), consultado el 11 de marzo de 2023. De dominio público.

Dentro de las CH de embalse se pueden mencionar las centrales de bombeo o también llamadas central reversible, las cuales operan como almacenes de energía. Disponen de una sola o más turbinas y de igual cantidad de bombas, o bien, turbinas reversibles. También cuenta con dos reservorios, uno aguas arriba y, otro, ubicado aguas abajo. Su funcionamiento considera

momentos de alta demanda energética, que funcionan como centrales turbinando y generando electricidad. Mientras que en periodos en que la demanda energética es baja y el precio de la energía también es bajo, funcionan bombeando recurso hídrico del embalse inferior hacia el embalse superior, de tal manera que se pueda turbinar cuando la demanda lo requiera. (J. Sanz, 2016)

### **6.2.3.2. Centrales mixtas**

Aquí se engloban centrales que disponen de un pequeño reservorio, pero no cuentan con la capacidad de regulación, o bien, no sobrepasa un día. Son parecidas a las de filo de agua, reemplazando el azud por un depósito de proporciones grandes, sin llegar a ser un embalse. (J. Sanz, 2016)

### **6.2.4. Aspectos de una central hidroeléctrica**

Las centrales hidroeléctricas tienen un conjunto de aspectos a considerar, útiles en su diseño y en la comprensión de su funcionamiento.

#### **6.2.4.1. Altura de salto o carga de agua**

Es la distancia vertical que viaja el fluido desde una parte alta hasta la turbina hidráulica colocada en un nivel inferior. (J. Sanz, 2016). Se tienen los siguientes saltos:

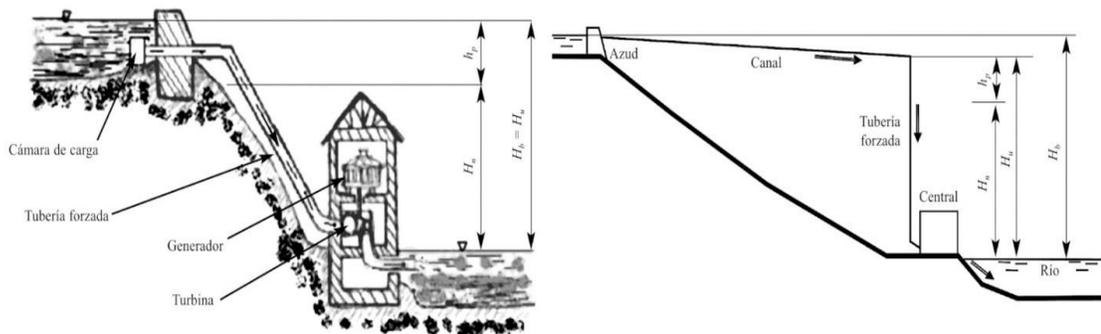
- Salto bruto ( $H_b$ ): es la distancia existente “entre el nivel de aguas arriba y el nivel inferior” (J. Sanz, 2016, p. 42). El nivel inferior no será igual para las turbinas de acción que para las de reacción, por lo tanto, el nivel inferior corresponde al punto en donde el agua golpea las cazoletas o

álabes de la turbina y el punto de devolución del fluido al río. (J. Sanz, 2016)

- Salto útil ( $H_u$ ): corresponde a la diferencia “entre la altura nivel de la cámara de carga y la altura del nivel inferior” (J. Sanz, 2016, p. 42).
- Pérdidas de carga ( $h_p$ ): “Corresponde a las pérdidas de altura debido a rozamientos en los diversos elementos de conducción y control del caudal, desde el nivel en la cámara de carga y el nivel inferior” (J. Sanz, 2016, p. 42).

#### Figura 4.

##### Representación de las alturas



*Nota.* En la imagen de la izquierda se observa un salto sin canal; en la imagen de la derecha, un salto con la utilización de un canal. Adaptado de J. Sanz (2016). *Energía hidroeléctrica* (p. 43.). Prensas de la Universidad de Zaragoza.

(<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Q5BfDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=definicion+hidroelectrica&ots=CwsMCVqW9e&sig=3Ozn53j6fFOZi23-zsJ4MnZ0vOM#v=onepage&q=definicion%20hidroelectrica&f=false>), consultado el 11 de marzo de 2023. De dominio público. Editado con Adobe Photoshop.

- Salto neto ( $H_n$ ): este permite determinar la potencia de una turbina, se calcula restando las pérdidas producidas en la tubería con el salto útil. (J. Sanz, 2016)

$$H_n = H_u - h_p$$

La medición de salto bruto es fundamental para el desarrollo de una central hidroeléctrica, de ello depende la potencia y energía generada. Es muy importante conocer las características físicas del terreno para el cálculo. Esto se puede lograr mediante curvas de nivel, en donde se realiza un levantamiento topográfico para la identificación de las curvas de nivel.

#### **6.2.4.2. Caudal**

Según lo define J. Sanz (2016), el caudal es el volumen de agua que atraviesa una superficie durante un tiempo determinado y se expresa en  $m^3/s$ , según el sistema internacional. Un caudal está expuesto a grandes variaciones debido a la estacionalidad del territorio, por lo cual es importante disponer de datos de caudal diario, idealmente, durante periodos de 15 a 20 años. Con estos datos es posible obtener las curvas que se mencionan en seguida.

##### **6.2.4.2.1. Curva de caudales medios diarios de un año estacional**

Esta curva representa el caudal promedio diario de todos los años de los que se ha obtenido información; luego se hace la gráfica de un año estacional. (J. Sanz, 2016)

#### 6.2.4.2.2. Curva de caudales medios clasificados

Estas curvas permiten establecer los días en los que se rebasa un caudal determinado. Se obtiene por medio de una gráfica, ordenada de mayor a menor los datos de todos los años; luego se realiza el promedio de cada día de cada año, para tener la gráfica de un año promedio. (J. Sanz, 2016). Con lo cual, se obtiene:

- Caudal máximo ( $Q_M$ ), también llamado de crecida, que se espera alcanzar en el año.
- Caudal mínimo ( $Q_m$ ), también llamado de estiaje, que se espera en el año.
- Caudal de servidumbre o ecológico ( $Q_{eco}$ ), del cual existe un caudal que no es turbinable, que se deja pasar por el cauce del río para mantener el desarrollo de la flora y la fauna. También se tiene un caudal que, si se turбина, no representa peligro para la fauna del río y el cauce no quede seco, con la salvedad de que debe garantizarse un paso alternativo en caso de paro de generación.
- Caudal de equipamiento ( $Q_e$ ), que es el caudal máximo que se puede turbinar. Este puede calcularse mediante la optimización los distintos valores de  $Q_e$ , para obtener la energía producida a lo largo del año, de forma que se obtengan los ingresos proyectados de vender la energía producida y el costo de la instalación correspondiente a cada  $Q_e$ . Luego, realizando el procedimiento costo-beneficio, se estima el caudal que

represente mejor rentabilidad. (J. Sanz, 2016). Se puede aplicar la ecuación:

$$Q_e = Q_{medio} - Q_{eco}$$

- Caudal mínimo técnico ( $Q_{mt}$ ), que es el caudal mínimo que puede utilizarse para turbinar. Se obtiene mediante la utilización de un factor  $K$  correspondiente a la turbina analizada, siendo:

$$Q_{mt} = K \cdot Q_{eco}$$

**Tabla 1.**

*Factores K de las diferentes turbinas*

<b>Turbinas</b>	<b>K</b>
Pelton	0.10
Flujo cruzado	0.15
Kaplan	0.22
Semi-Kaplan	0.35
Francis	0.35
Hélice	0.65

*Nota* Factores  $K$  correspondiente al tipo de turbina a utilizar. Adaptado de J. Sanza (2016). *Energía hidroeléctrica* (p. 48.). Prensas de la Universidad de Zaragoza. (<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Q5BfDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=definicion+hidroelectrica&ots=CwsMVCvqW9e&sig=3Ozn53j6fFOZi23-zsJ4MnZ0vOM#v=onepage&q=definicion%20hidroelectrica&f=false>), consultado el 11 de marzo de 2023. De dominio público.

#### 6.2.4.2.3. Curva de caudales del año más seco

Esta curva es útil para realizar un estudio de viabilidad económica. (J. Sanz, 2016)

#### 6.2.4.3. Potencia instalada

Es la potencia entregada por una central hidroeléctrica; se define por la ecuación:

$$P_{inst} = \gamma \cdot Q_e \cdot H_n \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr}$$

En donde:

$P_{inst}$  : es la potencia instalada o potencia útil nominal (kW).

$\gamma$  : es el peso específico del agua (9.81 kN/m<sup>3</sup>).

$Q_e$  : es el caudal de equipamiento por cada máquina (m<sup>3</sup>/s).

$H_n$  : es el salto neto (m).

$\eta_t$  : es el rendimiento de la turbina.

$\eta_m$  : es el rendimiento del multiplicador.

$\eta_g$  : es el rendimiento del generador.

$\eta_{tr}$  : es el rendimiento del transformador.

Cada elemento posee un rendimiento que varía en función a sus pérdidas y características; estas se pueden obtener de los datos solicitados a los fabricantes. (J. Sanz, 2016)

En caso de conocer los rendimientos exactos, es válido considerar “el producto de todos los rendimientos, comprendido entre 0.8 o 0.85” (J. Sanz, 2016, p. 37). La ecuación anterior puede resultar así:

$$P_{inst} = 9.81 \cdot Q_e \cdot H_n \cdot \eta_{Producto}$$

#### 6.2.4.4. Energía producida

La energía producida es el resultado de una potencia generada por la cantidad de horas de trabajo del generador a dicha potencia. Esto permite clasificar las hidroeléctricas según su número de horas equivalentes ( $h_e$ ), de tal manera que, si las horas equivalentes tienen un valor alto, puede indicar que es posible aumentar la potencia instalada. Si por el contrario, el valor es bajo, es posible que la central este sobredimensionada (J. Sanz, 2016). Para estimar el número de horas equivalentes se emplea:

$$h_e = \frac{E_{anual}}{P_{nominal}}$$

En donde:

$h_e$ : es el número de horas equivalentes (h).

$E_{anual}$ : es la energía generada anualmente (kWh).

$h_e$ : es la potencia nominal de la instalación (kW).

**Tabla 2.**

*Clasificación según las horas equivalentes de trabajo*

<b>Número de horas equivalente</b>	<b>Tipo de central</b>
En torno a 5,000 horas	Central base
En torno a 3,000 horas	Central semipunta
En torno a 2,000 horas	Central punta

*Nota.* Distribución de las CH en función de las horas equivalentes de generación. Adaptado de J. Sanza (2016). *Energía hidroeléctrica* (p. 39.). Prensas de la Universidad de Zaragoza. (<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Q5BfDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=definicion+hidroelectrica&ots=CwsMVCvqW9e&sig=3Ozn53j6fFOZi23-zsJ4MnZ0vOM#v=onepage&q=definicion%20hidroelectrica&f=false>), consultado el 11 de marzo de 2023. De dominio público.

A partir de la determinación de las horas equivalentes es posible calcular el factor de carga de una central, dividiendo las horas equivalentes por las horas de funcionamiento durante el año. (J. Sanz, 2016)

$$f_c = \frac{h_e}{h_{fun}}$$

En donde:

$f_c$  : es el factor de carga.

$h_e$  : son las horas equivalentes.

$h_{fun}$  : son las horas de funcionamiento en un año.

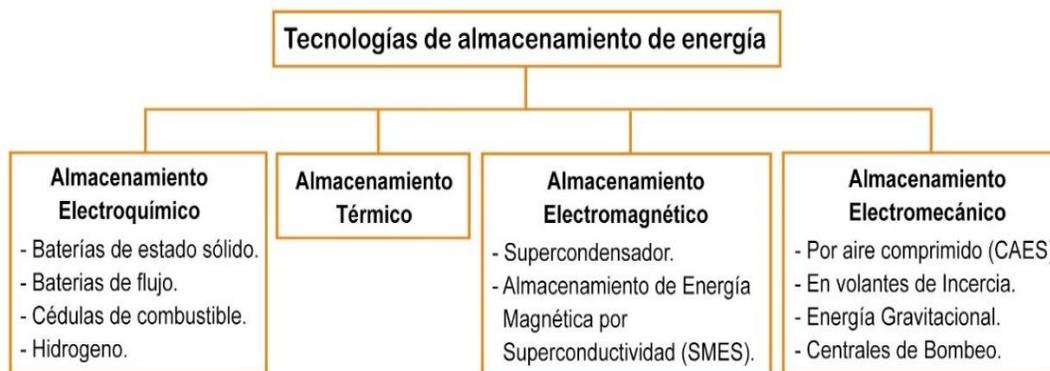
### 6.3. Sistemas para almacenar de energía

Generalmente, estos sistemas “abarcan aplicaciones en el ámbito del arbitraje de energía, respuesta primaria, secundaria y terciaria del sistema, garantizar disponibilidad de capacidad de generación durante los picos o períodos de mayor demanda” (Rodríguez, 2021, p. 29). También muestran capacidad para restaurar operaciones derivadas de un corte de energía en una central, que pueden compensar la variabilidad estacional en la generación y el consumo. (Rodríguez, 2021)

En la figura 5 se presentan las principales tecnologías de almacenamiento de energía.

**Figura 5.**

*Esquema de tecnologías para almacenar energía*



*Nota.* Sistemas utilizados para almacenar energía. Adaptado de M. González (2019). *Metodología para evaluar el impacto de las tecnologías de almacenamiento de energía en sistemas de distribución eléctricos* (p. 13.). Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. (<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/128620>), consultado el 14 de marzo de 2023. De dominio público. Editado con Adobe Photoshop.

### **6.3.1. Sistemas electroquímicos**

Son baterías compuestas por un par de electrodos (un ánodo y un cátodo) y un electrolito, colocados juntos en un recipiente especial sellado y conectado a una fuente separada o carga (Díaz, 2012; Sumper, 2012; Gomis, 2012; Villafáfila, 2012). El funcionamiento toma como base un proceso reversible llamado reducción–oxidación, en donde una de las partes sufre un proceso de pérdida de electrones (oxidación), mientras que la otra parte sufre una reducción, que equivale a una ganancia de electrones. Por lo tanto, es un proceso en donde las dos partes solo cambian su estado de oxidación sin consumirse mutuamente. (Rodríguez, 2021)

#### **6.3.1.1. Baterías de estado sólido**

“Se caracterizar por reacciones reversibles de reducción y oxidación” (González, 2019, p. 14), por una alta eficiencia de carga o descarga, y un ciclo de vida largo. Existen diferentes tipos de baterías adecuadas para las aplicaciones que se requiera. (F. Sanz, 2021). Los tipos de baterías se mencionan a continuación:

- Baterías de ácido-plomo
- Baterías de níquel-cadmio
- Baterías de sulfuro-sodio
- Baterías de níquel-zinc
- Baterías de iones de litio

### **6.3.1.2. Baterías de flujo**

Son baterías que almacenan energía en uno o más tipos de iones, que se disuelven en electrolitos líquidos. Incluyen baterías redox e híbridas. En las baterías redox, dos líquidos se mantienen en diferentes tanques externos y se bombean a través de una batería electroquímica seca cuando se opera la batería. En el caso de la batería híbrida, solo una solución se almacena en un tanque externo, el otro se mantiene siempre en la unidad electroquímica. (Ould, 2016; Rekioua, 2016; Rekioua, 2016, Bacha, 2016)

### **6.3.1.3. Cédulas o celdas de combustible**

Las celdas de combustible se diferencian respecto a las baterías, en que los reactivos se consumen y deben reponerse. Las celdas de combustible reversible están diseñadas para que el reactivo y el electrolito produzcan electricidad. Estas baterías ofrecen varias ventajas, como tener una densidad de energía muy alta; se pueden aplicar a pequeña y gran escala, también tienen uso modular simple, aunque son caras y sufren de una eficiencia de carga y descarga muy baja. (A. Evans, 2012; Strezov, 2012; T. Evans, 2012)

### **6.3.1.4. Hidrógeno**

Para almacenar hidrogeno se utiliza la tecnología llamada Celda de Combustible Regenerativa (RFC), la cual se encarga de almacenar la energía en forma de hidrógeno e inyectarla a la red como electricidad. Por medio de las RFC, el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno. Existen desde electrolizadores alcalinos hasta electrolizadores de Membrana de Electrolito Polimérico (PEM). El uso de electrolitos PEM genera hidrógeno a presiones adecuadas (200-6000 psi), para que se almacene en tanques metálicos

(grandes volúmenes almacenados a más de 30 h) o en hidruros metálicos (almacenamientos más prolongados de 3 h). (Díaz et al., 2012)

### **6.3.2. Sistemas térmicos**

Se denomina *Thermal Energy Storage* (TES). Es un sistema que almacena energía calentando o enfriando varios fluidos caloportador en tanques de almacenamiento para poder generar calefacción, refrigeración y generación eléctrica. (Ould et al., 2016). Por ejemplo, se calienta agua o aceite mediante la radiación solar para intercambiar posteriormente dicho calor con otro fluido (aceite, sales u hormigón) a menor temperatura. Así, durante la ausencia de sol, el aceite sintético o sales fundidas calientan agua para generar vapor y accionar una turbina para generar electricidad. (González, 2019)

### **6.3.3. Sistemas electromagnéticos**

Como lo describe González (2019), “dentro de este grupo de sistemas de almacenamiento de energía se encuentra el almacenamiento electromagnético en superconductores (*Superconducting magnetic energy storage, SMES*) y los supercondensadores” (p. 16).

#### **6.3.3.1. Por supercondensadores**

Son condensadores electroquímicos con un par de capas, que cuentan con un casi ilimitado ciclo de estabilidad, una gran cantidad de potencia y almacenamiento en contraste con los capacitores tradicionales. (Villagrán, 2017). Están compuestos por una membrana porosa que transporta iones, dos electrodos y un electrolito. Se diferencian de las baterías debido a que los electrolitos de los supercapacitores no tiene una reacción de oxidación. Dentro

de sus características se puede mencionar que son capaces de alcanzar valores de 5 kF, internamente tienen una pequeña resistencia; son los sistemas más rápidos con tiempo constante en la fase de descarga, es útil cuando se necesitan grandes sumas de potencia. Sus desventajas son el voltaje de operación, que está alrededor de 3.5 voltios, y tienden a descargarse rápidamente por su baja constante temporal. (Rodríguez, 2021)

#### **6.3.3.2. Por superconductividad**

El sistema de almacenamiento SMES consta de esencialmente de una bobina de material superconductor enfriado de forma criogénica, un sistema de acondicionamiento de energía y un sistema de refrigeración. (Ould et al., 2016). Se inyecta corriente directa, la cual circula en la bobina construida con material superconductor, generando un campo magnético que almacena la energía. La temperatura de refrigeración va de  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $223\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual permite que la bobina tenga un rendimiento de hasta 90 %, derivado de la disminución en su resistencia. El enfriamiento se logra mediante la utilización de nitrógeno o helio líquido, siendo un método de almacenamiento costoso (Rodríguez, 2021), sin embargo, logran una rápida repuesta, un elevado número de ciclos de carga-descarga y elevada rampas de potencia. Se pretende utilizar principalmente en microrredes y sistemas de distribución, donde se necesita un funcionamiento continuo. (González, 2019)

#### **6.3.4. Sistemas electromecánicos**

Los sistemas de almacenamiento siguientes son los de mayor uso debido a la madurez en la tecnología aplicada. Se centra en la aplicación de cambios en la energía potencial y en la energía cinética. (Villagrán, 2017)

#### **6.3.4.1. Por aire comprimido**

Es llamado CAES (*Compressed Air Energy Storage*), por sus siglas en inglés. Este sistema almacena energía mediante la compresión de aire dentro de un tanque, caverna hermética, formaciones subterráneas, acuíferos, campos de gas natural y formaciones salitrosas. Cuando se desea utilizar la energía anteriormente almacenada, se extrae el aire, se calienta y se expande por medio de una turbina de alta y baja presión; una parte es absorbida para hacer girar una turbina acoplada a un generador de electricidad y la otra parte se hace combustionar. Para aumentar la energía cinética los extractores deben calentar el aire comprimido. (Villagrán, 2017). También son capaces de almacenar grandes cantidades de energía, con capacidades que generalmente van de 50 a 300 MW, utilizando presiones alrededor de 70 bares con eficiencia de aproximadamente el 70 %. (Ould et al., 2016)

#### **6.3.4.2. Volante de inercia**

Son electromecánicos con la capacidad de almacenar energía cinética. Su funcionamiento consta de un disco mecánico que rota sobre cojinetes dentro de un bobinado estático, conectado a una máquina eléctrica, la cual permite el intercambio de potencia con una red eléctrica. (González, 2019). Cuando el volante se enlaza a una máquina eléctrica, este puede funcionar como motor eléctrico o generador. Cuando se encuentra en modo generador, la energía cinética proveniente del volante suministra energía a la red. Mientras que cuando está en modo motor o máquina eléctrica, el volante toma energía proveniente de la red, aumentando la velocidad del volante. (Rodríguez, 2021)

Los volantes de primera generación son adecuados en sistemas de poca duración, generalmente para sistemas de pequeña escala, esto debido a las

limitaciones en su capacidad de almacenamiento de energía. Los sistemas existentes tienen altas eficiencias con valores alrededor del 93 % y una vida útil de 20 años, alta densidad de potencia, recarga rápida y tiempos de respuesta rápidos. (Evans et al., 2012)

#### **6.3.4.3. Gravitacional**

Existen diferentes modelos de almacenamiento de energía gravitacional, pero el principio es el mismo, levantar una masa y dejarla caer. Se puede levantar masas con un sistema mecánico y dejar caer para mover un generador y obtener energía eléctrica. El sistema de control tiene que compensar las ráfagas de viento.

#### **6.4. Sistema de almacenamiento hídrico por bombeo**

El sistema denominado PHES (*Pumped Hydroelectric Energy Storage*), por sus siglas en inglés, se basa en bombear agua desde el depósito ubicado en la parte inferior hacia otro, en la parte superior. Este proceso se realiza regularmente en horarios de baja demanda, para que cuando se necesite electricidad, el agua se libere del depósito superior hacia una turbina hidroeléctrica y vuelve al depósito inferior. (Rastler, 2016, citado en Evans et al., 2012). Es una tecnología madura, comercializable y que ha sido muy implementada. (Villagrán, 2017). La capacidad de almacenamiento está dada por la altura de caída o cabeza de agua, la cual debe ser significativa, y el volumen de agua disponible. (Ibrahim, 2008, como se cita en Evans et al., 2012)

Las plantas PHES son útiles porque técnicamente son capaces de proporcionar soporte renovable y se adecua a potencia máxima. Además, hay que tener en cuenta que la tendencia hacia la utilización de energía limpia y

renovable va en aumento, las cuales son fuentes intermitentes de energía, y se necesita mayor flexibilidad en los sistemas. (Rehman, 2015; Al-Hadhrami, 2015; Alam, 2015). Con base en lo anterior, las ventajas que ofrece una central PHES son:

- Arranque y paro flexible, velocidad de respuesta rápida.
- Capacidad para rastrear cambios de carga y adaptarse a cambios drásticos.
- Modulación de la frecuencia y proporcionar estabilidad en el voltaje.

#### **6.4.1. Centrales de almacenamiento hídrico por bombeo a nivel mundial**

Debido a que el almacenamiento por bombeo proporciona facilidades y beneficios, muchas empresas desarrollan centrales nuevas o bien rehabilitan y aumentan la capacidad de centrales existentes. Para 2009, estaban en funcionamiento una cantidad de superior a 127,000 MW, instalados mediante almacenamiento hídrico por bombeo. (Álvarez, 2012)

La eficiencia que han mostrado estos sistemas está en un rango de 70 y 80 %. Para 2012, la capacidad instalada en centrales PHES de la Unión Europea, junto con Suiza, Turquía y Noruega, era de 63,999 MW. (Cabrales, 2015)

En la tabla 3 se observa la capacidad instalada y en construcción para el año 2014 de centrales hidroeléctricas por bombeo, de los países más importantes alrededor del mundo.

**Tabla 3.***Capacidad en centrales de transferencia de agua por bombeo*

<b>País</b>	<b>Potencia instalada en centrales de transferencia de agua por bombeo en 2014 (GW)</b>	<b>Potencia en centrales de transferencia de agua por bombeo en construcción en 2014 (GW)</b>	<b>Participación de las centrales de transferencia de agua por bombeo en la capacidad total en 2014 (%)</b>
<b>Japón</b>	24.5	3.3	8.5
<b>China</b>	22.6	11.6	1.8
<b>Estados Unidos</b>	20.5	0.0	1.9
<b>Italia</b>	7.1	0.0	5.7
<b>España</b>	6.8	0.0	6.6
<b>Alemania</b>	6.3	0.0	3.5
<b>Francia</b>	5.8	0.0	4.4
<b>Austria</b>	4.8	0.2	21.0
<b>Reino Unido</b>	2.7	0.0	3.0
<b>Suiza</b>	2.5	2.1	12.0
<b>Portugal</b>	1.1	1.5	6.1

*Nota.* Clasificación de centrales de transferencia de agua en servicio y en construcción en el año 2014. Adaptado de M. Sethom (2022). *Hydraulic power with reversible pump of Foz do Tua Dam* [Energía hidráulica con bomba reversible de la presa de Foz do Tua] (p. 9.). Instituto Politécnico de Braganca. (<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/25270>), consultado el 16 de marzo de 2023. De dominio público. Realizado con Excel.

En 2021, China contaba con 36 GW instalados y anunció planes para ampliar su capacidad nacional a 120 GW para 2030. Estados Unidos agregó aproximadamente 70 MW de PHES. También la central PHES Gouvães de Portugal de 880 MW se puso en funcionamiento a principios de 2022. (International Hydropower Association, 2022)

## Figura 6.

Capacidad instalada (GW) de PHES global para 2021



*Nota.* Clasificación por países de la capacidad instalada de almacenamiento por bombeo global para el año 2021. Obtenido de International Hydropower Association (2022). *2022 Hydropower status report. Sector trends and insights* [Informe de estado de la energía hidroeléctrica 2022. Tendencias y perspectivas del sector] (p. 17.). ([https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594\\_IHA202212-status-report-02.pdf](https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594_IHA202212-status-report-02.pdf)), consultado el 14 de marzo de 2023. De dominio público.

Los sistemas PHES ven un crecimiento debido a la madurez y flexibilidad que ofrecen a los sistemas eléctricos, sobre todo por la penetración de sistemas solares y eólicos, pues ante la intermitencia de ellos, una central PHES proporciona estabilidad. (Villagrán, 2017)

### 6.4.2. Tipos de centrales PHES

Existen tres sistemas de centrales PHES, las cuales dependen de las características del lugar. (Rojas, 2019)

#### **6.4.2.1. Sistema de ciclo cerrado**

Este tipo de sistema considera que ninguno de los dos embalses está conectada a un sistema fluvial. Generalmente un embalse es construido y el otro corresponde a un lago existente que ha sido modificado. (Rojas, 2019). La energía generada es obtenida solamente del agua que se bombea.

#### **6.4.2.2. Sistema de ciclo semiabierto**

En este sistema se tiene un embalse artificial y el otro corresponde al sistema fluvial de un río. También como embalse inferior podría establecerse el mar, así la potencia instalada en una central podría ser mayor. (Rojas, 2019)

#### **6.4.2.3. Sistema de ciclo abierto**

Este sistema contiene sus dos embalses unidos a un sistema fluvial de un río. (Rojas, 2019)

### **6.4.3. Esquemas de centrales PHES**

Los sistemas PHES se pueden caracterizar por la cantidad de máquinas hidráulicas y eléctricas (generador, motor, bomba y turbina) que se utilizan. (Rojas, 2019)

#### **6.4.3.1. Esquema binario**

Es el esquema más económico, pues está constituido por una turbina reversible (turbina-bomba), acoplada a una máquina síncrona (alternador-motor), la cual gira en dos direcciones, dependiendo si se encuentra entregando

energía a la red o recibiendo energía. Cuando está en periodo de generación, el funcionamiento es similar a una turbina Francis. Es importante contemplar el diseño de pipas y válvulas que permitan reducir la presión de agua, ya que la variación del recurso hídrico hace variar la velocidad de la turbina y no se puede moderar con cerrar las compuertas. (Rojas, 2019)

Generalmente se coloca la turbina con el eje de forma vertical y utilizan una tecnología eficaz para almacenar una considerable cantidad de energía, la cual consiste en la variación de velocidad, aumentando la estabilidad, eficacia energética y capacidad de control. (Cabrales, 2015)

#### **6.4.3.2. Esquema ternario**

Es un esquema formado por una turbina y una bomba separada, acoplada a una máquina síncrona que puede funcionar como motor o generador. Cuando está en operación, tanto la turbina como la bomba, giran en una dirección común. (Rojas, 2019). Esta configuración permite el control de frecuencia de carga, elasticidad de funcionamiento y un rápido cambio de turbina a bomba y viceversa. Dependiendo de las características hidráulicas del lugar, la turbina puede ser Pelton o Francis. Los costos son más elevados que un esquema binario por las máquinas, tuberías, válvulas y accesorios. (Cabrales, 2015). Las tres máquinas se pueden instalar con dirección de eje vertical, que permite instalar el generador entre la turbina y la bomba. La bomba se instala por debajo del nivel en que se encuentre el embalse inferior, mientras que la turbina por arriba de dicho nivel. (Rojas, 2019)

### **6.4.3.3. Esquema cuaternario**

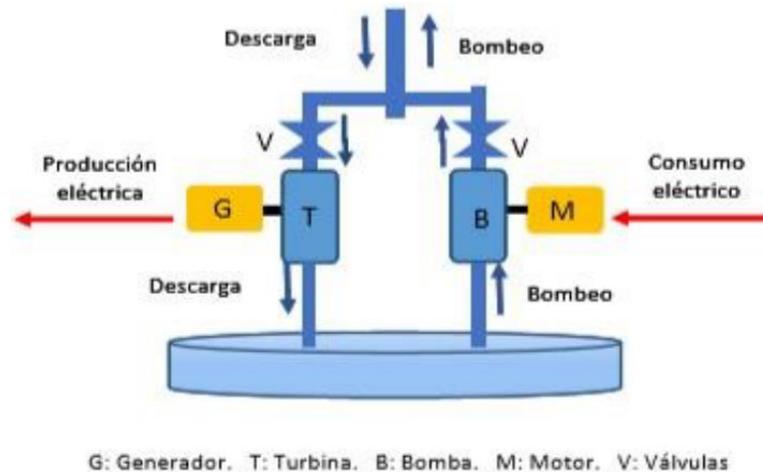
Comprende dos máquinas diferentes no acopladas mecánicamente, una máquina para bombeo y otra como turbina, las cuales pueden ir instaladas en dos cuartos de máquinas diferentes. Es un sistema que requiere una alta inversión cita Rojas (2019), si se considera la construcción completa desde cero.

Este esquema ofrece flexibilidad y máximo rendimiento. “También es la configuración que permite turbinar y bombear el agua al mismo tiempo, generando un ciclo cerrado y continuo” (Alarcón, 2022, p. 34). Dentro del sistema de funcionamiento se debe mencionar que se debe contar con dos trazos de tuberías con una función aislada, siendo una tubería para la descarga de agua y generación de energía proveniente del embalse superior a la casa de máquinas aguas abajo y, la otra tubería, para el bombeo del agua desde el embalse inferior y descargándolo en el embalse superior. (Alarcón, 2022)

Para una central hidroeléctrica con embalse existente es, sin duda, una opción viable, ofreciendo una mayor estabilidad de producción de energía, También brinda la oportunidad de realizar mantenimientos por separado, o bien, en caso de falla en el sistema de bombeo no es necesario detener la generación, por lo que también representa una menor pérdida de ingresos por venta de energía.

## Figura 7.

### Esquema cuaternario



*Nota.* La imagen muestra un sistema de bombeo y un sistema de generación. Obtenido de F. Alarcón (2022). *Diseño conceptual de centrales hidroeléctricas a bombeo usando agua desalinizada* (p. 35.). Universidad de Chile. (<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189091>), consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público.

#### 6.4.4. Elementos principales de un central PHES

Estos son elementos adicionales o sustitutos de una central hidroeléctrica de embalse para su funcionamiento como central reversible, partiendo de la premisa de contar con dos embalses.

##### 6.4.4.1. Embalse o reservorio

“Un embalse es una acumulación artificial de agua en un ambiente natural, es producto de una intervención humana con el objetivo de almacenar agua para fines de uso y/o consumos” (Chán, 2012, p. 9). Mediante el embalse,

se puede regular el caudal. (Monroy y Montaña, 2015). Una central PHES cuenta con dos embalses: uno superior y uno inferior.

Los reservorios superior e inferior pueden ubicarse en la superficie terrestre, construyendo una presa o utilizando un lago. En este sentido, la casa de máquinas será ubicada sobre o bajo la superficie del terreno. (Cabrales, 2015). También, dependiendo de las condiciones del terreno, el embalse inferior se puede ubicar de manera subterránea, ya sea en un sistema de cavernas excavadas por debajo de la tierra o bien utilizando un acuífero, mientras que el embalse superior se ubica a nivel del terreno. La casa de máquinas debe ser construida necesariamente bajo la superficie del terreno.

#### **6.4.4.2. Presa**

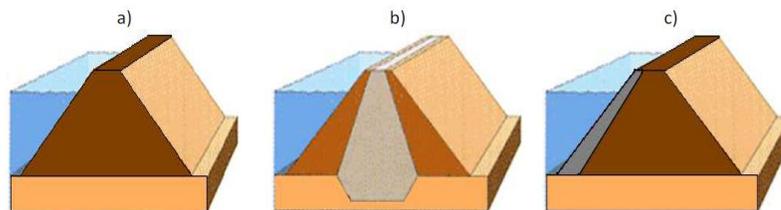
Es una barrera que tiene el objetivo de acumular el agua que va en su cauce y elevar su nivel. Puede construirse con distintos materiales como: tierra con un núcleo impermeable y pantalla de concreto, escollera (arcilla y rocas mezcladas) y de mampostería o de concreto con gran resistencia, impermeabilidad y menos cantidad de material. (Berga, 2008, citado en Chán, 2012, p. 11). Las presas se pueden clasificar como lo describe Alvarez (2012):

- Presas de gravedad: es una presa con un perfil triangular, muy utilizada debido a la fiabilidad de su peso y la compensación del empuje del agua, por el par de reacción que se ejerce en la presa desde el suelo.
- Presas de contrafuertes: esta presa tiene secciones que están separadas de forma regular, se construyen generalmente en valles anchos, y también implican un menor costo de material.

- Presas curvatura simple: son también llamadas de arco sencillo. Es una presa ligera que lleva hacia las pendientes del valle el esfuerzo provocado por la fuerza de empuje que induce el agua. También tiene gargantas estrechas y altas.
- Presas de bóveda: son también llamadas de doble arco. “Cuentan con arcos horizontales y verticales, se utilizan en valles estrechos y profundos y admiten alturas superiores a las de las presa de gravedad” (Álvarez, 2012, p. 15).
- Presas de arco-gravedad: es el resultado de la combinación de una presa de arco y una presa de gravedad.

### Figura 8.

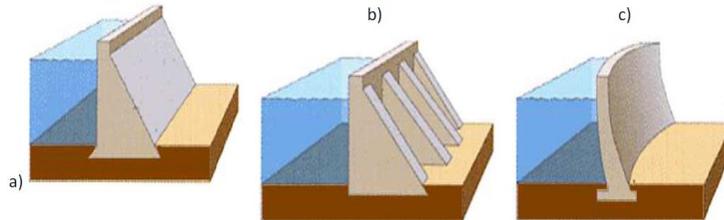
#### *Presas de tierra y de escollera*



*Nota.* a) Presa de tierra (arcilla), b) Presa de tierra o escollera con núcleo impermeable, c) Presa de tierra o escollera con pantalla impermeable. Obtenido de M. Chán (2012). *Métodos de almacenamiento de agua. Un elemento clave para la adaptación al cambio climático* (p. 12.). Instituto privado de investigación sobre el cambio climático. (<https://icc.org.gt/es/metodos-de-almacenamiento-del-agua-un-elemento-clave-para-la-adaptacion-al-cambio-climatico/>), consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público.

## Figura 9.

### Presas de concreto



Nota. a) Presa de gravedad, b) Presa de contrafuertes, c) Presa de bóveda. Obtenido de M. Chán (2012). *Métodos de almacenamiento de agua. Un elemento clave para la adaptación al cambio climático* (p. 12.). Instituto Privado de Investigación sobre el Cambio Climático. (<https://icc.org.gt/es/metodos-de-almacenamiento-del-agua-un-elemento-clave-para-la-adaptacion-al-cambio-climatico/>), consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público.

#### 6.4.4.3. Tubería de presión o forzada

Como lo menciona Monroy y Montaña (2015), la tubería de presión hace la función de “conducir el caudal de diseño a presión desde la cámara de carga hasta la turbina hidráulica en la casa de máquinas” (p. 20). Además, deben ir sostenidas por estructuras de hormigón, especialmente en los codos o curvas. Las tuberías de alta presión son de hierro fundido o de planchas de acero cilindradas. Para presiones no muy altas, la tubería puede ser de plástico, con la ventaja de presentar una reducción en los costos, pero debe instalarse bajo el suelo para evitar el deterioro del material.

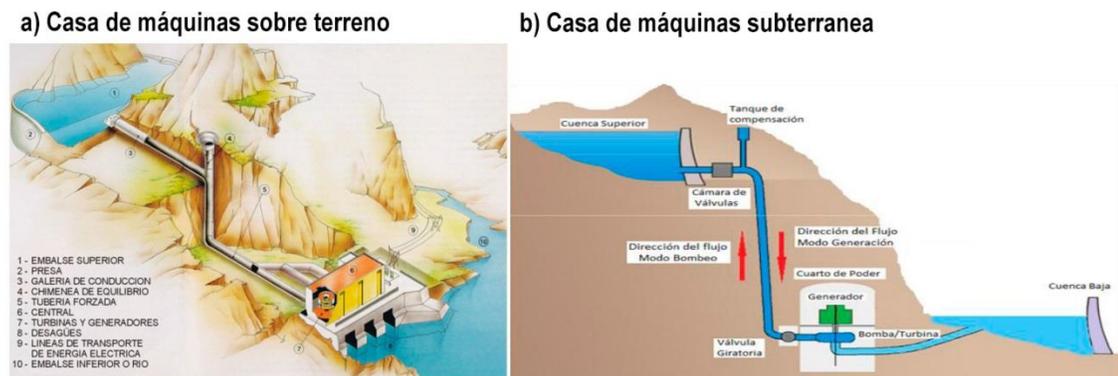
#### 6.4.4.4. Casa de máquinas

Es el lugar en donde está instalado el equipo útil para la generación eléctrica y los tableros de control, con espacio disponible para el desmontaje de equipos y que permita la circulación del personal. También debe tener un canal

de restitución, para devolver el agua al embalse inferior o curso del río. (Monroy y Montaña, 2015)

### Figura 10.

*Casa de máquinas según su embalse inferior*



*Nota.* Dos tipos de casa de máquinas. Adaptado de I. Florindo (2021). *Estudio de viabilidad de la transformación de una central hidroeléctrica en una central reversible en el País Vasco* (p. 6.). Universidad de Alcalá. (<https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/49383>); de S. Cabrales (2015). *Análisis del comportamiento de centrales hidroeléctricas de bombeo en la operación de sistemas interconectados* (p. 6.). Universidad de Chile. (<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134671>), consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público. Realizado con Adobe Photoshop.

#### 6.4.4.5. Turbinas hidráulicas

Es una máquina cuya función es transformar la energía mecánica que posee el agua en energía mecánica para girar sobre su propio eje. (Alvarez, 2012). La selección de una u otra depende de la diferencia de elevación entre el agua en el embalse y la descarga. Además, se debe considerar la elevación de la turbina, la confiabilidad y el costo. (Sethom, 2022). Las turbinas se

constituyen de: el distribuidor o inyector, que se utiliza para dirigir el agua, y el rodete, que es el elemento móvil giratorio. (Monroy y Montaña, 2015)

Existen dos clasificaciones de turbinas: las turbinas de reacción y las de acción. (Sethom, 2022). A partir de ellas, se tienen turbinas con funciones específicas.

#### **6.4.4.5.1. Turbinas de acción o impulso**

También llamadas turbinas de impulso o de presión constante. (Osorio, 2017). En estas turbinas el agua proviene de un inyector a presión que hace girar el rotor con una fuerza de empuje. (Monroy y Montaña, 2015). Además, estas turbinas tienen un bajo costo, saltos elevados mayores a 200m y funcionan con caudales bajos. (F. Sanz, 2021). Se mencionan las siguientes:

- Pelton: es una turbina construida por un rodete, que tiene montada una serie de cazoletas o cucharas en su superficie. El agua sale de uno o más inyectores, que tienen la función de aumentar o disminuir el caudal para poder golpear las cucharas y hacer girar el rotor. Normalmente, este tipo de turbina funciona con saltos altos, que van de 40 a 1200 m, (Monroy y Montaña, 2015), y caudales pequeños que van de 0.01 m<sup>3</sup>/s a 0.5 m<sup>3</sup>/s. (Sethom, 2022)
- De flujo cruzado: es una turbina conocida como Michell-Banki, Ossberger, de flujo cruzado, de doble impulsión o flujo radial. Está construida por un rodete hecho de un tambor de discos en paralelo, que contiene álabes curvos, la cual recibe el flujo de agua regulado por una válvula tipo mariposa. (Monroy y Montaña, 2015). En comparación con las turbinas Pelton, estas turbinas son diseñadas para trabajar con

caudales más grandes (0.1–5 m<sup>3</sup>/s) y alturas más bajas (2–40 m). (Sethom, 2022)

#### **6.4.4.5.2. Turbinas de reacción**

Este tipo de turbinas consiste en un rotor que se coloca dentro de un recipiente y se somete a presión hidrostática provocada por el agua que ingresa desde un inyector; esto genera el giro de la turbina por reacción a la presión. (Monroy y Montaña, 2015). Estas turbinas trabajan completamente llenas de agua. Se utilizan en ubicaciones con diferencias de nivel bajo y con caudales grandes. (Sethom, 2022)

- Francis: el agua recorre dentro de una cámara bajo presión, en dirección radial y se orienta la salida de forma axial. (Álvarez, 2012). Generalmente, el eje de trabajo es vertical y se utilizan en caídas medias (hasta 200 m) y caudales medios (0.5 – 4 m<sup>3</sup>/s). (Alarcón, 2022)
- Hélice: generalmente, tiene un rodete con tres a seis paletas, gira al entrar en contacto con el agua; la fricción debe ser constante para que no se pierda el control. (Sethom, 2022)
- Kaplan: es una turbina con rango de operación amplio, que se impulsa por recurso hídrico a alta presión. (Álvarez, 2012). Son muy buenas con rangos de operación que están bajo condiciones de mucho caudal (mayor a 15 m<sup>3</sup>/s) y poca altura, logrando llegar hasta 50 metros. (Alarcón, 2022)

## **6.5. Sistemas de bombeo**

Son sistemas que tiene la finalidad de mover una cantidad volumétrica de un fluido desde un nivel a otro, transformando un trabajo mecánico a un trabajo hidráulico, (Álvarez, 2012), mediante el apoyo de un equipo motor-bomba. (Martínez, 2020)

### **6.5.1. Elementos constructivos básicos**

En este apartado se describirán los elementos básicos que componen un sistema de bombeo sumergible.

- Motor: “Es una máquina que transforma energía eléctrica en energía mecánica. Dependiendo del tipo de alimentación eléctrica” (Alonso y Chenlo, 2013, p. 14).
- Bomba: “Es una máquina capaz de transformar energía mecánica en energía hidráulica” (Alonso y Chenlo, 2013, p. 16).
- Tubería de impulsión: a partir de la salida de impulsión se conecta la tubería que transportará el fluido. (Álvarez, 2012)

### **6.5.2. Tipos de bombas hidráulicas**

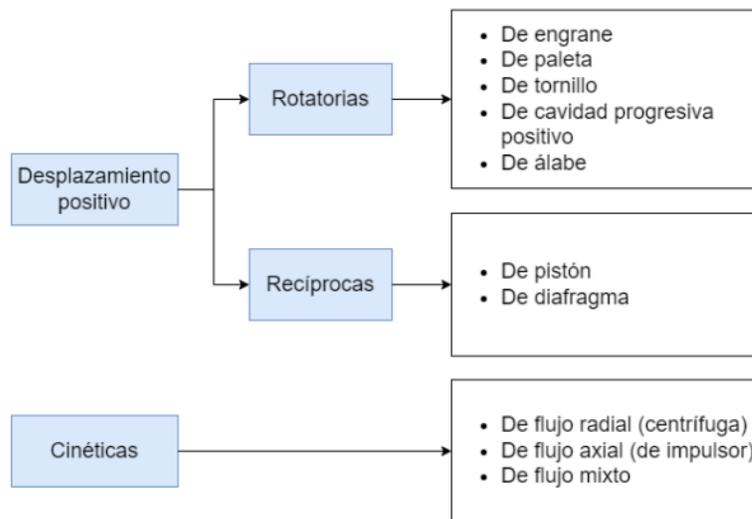
Las bombas hidráulicas “se dividen en dos grandes grupos: bombas cinéticas y bombas de desplazamiento positivo” (Sánchez, 2022, p. 2).

Cada tipo de bomba tiene una clasificación determinada por su tipo de operación, variando en caudal y altura. Aunque los dos tipos de bombas tienen

elementos en común, ambas se utilizan para distintas necesidades de uso, en consecuencia, tienen curvas de desempeño diferentes. (Sánchez, 2022)

**Figura 11.**

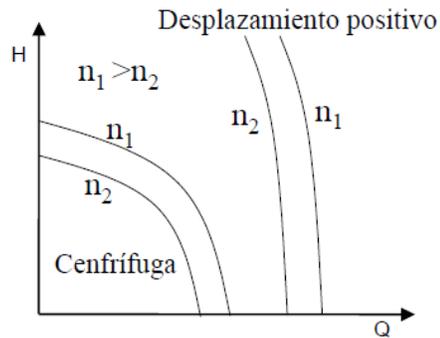
*Clasificación de bombas hidráulicas*



*Nota.* Componentes de bombas hidráulicas. Obtenido de L. Sánchez (2022). *Reconocimiento de cavitación y anomalías en un bomba hidráulica con técnicas de aprendizaje automático* (p. 3.). Universidad de Costa Rica. (<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/87543?show=full>), consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público.

## Figura 12.

Comparación de caudal y altura de bombeo



*Nota.* Se observa que las bombas de desplazamiento manejan caudal más estable y alturas mayores. Obtenido de M. Alonso y F. Chenlo (2013). *Sistema de bombeo fotovoltaico*. (p. 16.) Centro de investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45332.pdf>, consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público.

### 6.5.2.1. Bombas cinéticas

Se refiere a bombas centrífugas que constan de un impulsor radial que gira y sus aspas hacen descargar el fluido. (Sánchez, 2022). Estas son bombas que se utilizan para alturas manométricas bajas y profundidades de aspiración que no superen los cinco o seis metros, devolviendo caudales elevados. (Alonso y Chenlo, 2013)

### 6.5.2.2. Bombas de desplazamiento positivo

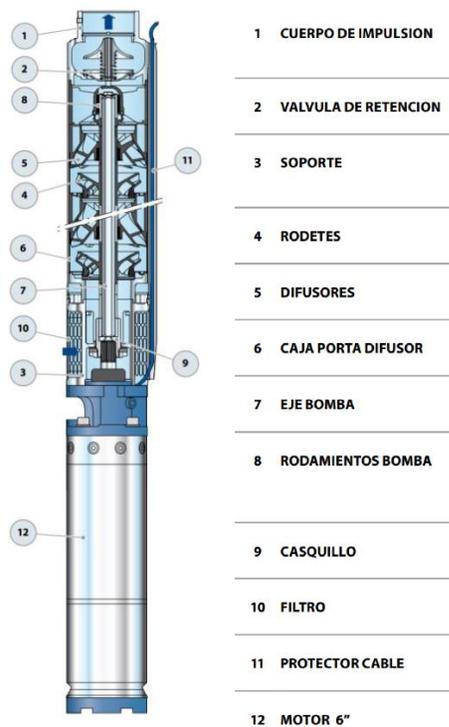
También son llamadas bombas volumétricas. Esta clase de bombas “desplazan un volumen fijo de fluido en cada una de sus pulsaciones” (Sánchez, 2022, p. 2). Son bombas que conllevan un aumento en la presión, trabajan con

caudales bajos y regularmente se utilizan en mayores elevaciones de descarga. (Chiliquinga, 2022)

En comparación con las bombas centrífugas, estas bombas tienen un rendimiento mayor; en contraste, el par de arranque es elevado. También necesitan el acople de un motor AC o DC. (Fuentes, 2017)

### Figura 13.

*Bomba de desplazamiento positivo*



*Nota.* Imagen de bomba y motor acoplado. Obtenido de D. Chiliquinga (2022). *Estudio de sostenibilidad con energía fotovoltaica para el abastecimiento de electricidad al sistema de agua del barrio Mariscal Sucre* (p. 14.). Universidad Técnica de Ambato. (<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/36942>), consultado el 20 de marzo de 2023. De dominio público.

### 6.5.3. Cálculo de sistemas de bombeo

Este apartado muestra los factores a tomar en cuenta para el cálculo de un sistema de bombeo.

#### 6.5.3.1. Caudal

El caudal en una tubería con área transversal  $A$  en  $m^2$  y velocidad del fluido  $v$  en  $m/s$ , (Mott, 2006), es:

$$Q = A \cdot v$$

#### 6.5.3.2. Principio de Bernoulli

Esta ecuación describe un fluido dentro de una tubería cuya energía es constante y que es sometido a condiciones variantes. (Hermosin, 2016). Partiendo de que la energía no se crea ni destruye y que para establecer el flujo en tuberías se considera la energía de posicionamiento, la energía de movimiento, energía del fluido y pérdidas por rozamiento, (Mott, 2006), para dos puntos diferentes, se obtiene:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 + W = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2$$

En donde:

$v_1$  : velocidad del agua en el punto 1 (m/s)

$v_2$  : velocidad del líquido en el punto 2 (m/s)

$P_1$  : presión en el punto 1 (Pa)

$P_2$  : presión en el punto 2 (Pa)

$z_1$  : altura en el punto 1 (m)

$z_2$  : altura en el punto 2 (m)

$W$  : pérdidas de carga (m)

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

$g$  : gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

Se debe considerar que en el punto 1 y el punto 2, la presión es igual a cero si los fluidos están expuestos a la atmosfera; además, la velocidad se considera cero en el área superficial de un tanque y la misma dentro de una tubería. (Mott, 2006)

#### **6.5.3.3. Altura neta**

También se denomina salto efectivo o neto; se define como la diferencia entre la altura útil y las pérdidas de carga que se producen dentro de una tubería. (Hermosin, 2016)

$$H_N = H_U + h_p [m]$$

#### **6.5.3.4. Pérdidas de carga**

Las pérdidas de carga la componen las pérdidas por fricción en la tubería y las pérdidas por accesorios. (Hermosin, 2016)

$$H_p = H_f + H_L$$

#### 6.5.3.4.1. Pérdidas en tubería por fricción

Para efectuar el cálculo se emplea la ecuación de Darcy–Weisbach, que permite determinar “la pérdida de energía debido a la fricción en secciones rectilíneas y largas de tubos redondos” (Mott, 2006, p. 233). “Dependiendo del tipo de material, el diámetro de la tubería y la velocidad del agua se produce una cantidad de pérdidas de presión determinada” (Hermosin, 2016, p. 34), obteniendo:

$$H_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

En donde:

$H_f$ : pérdida de energía por fricción (N\*m/N)

$f$  : factor de fricción (adimensional)

$L$  : longitud de corriente de flujo (m)

$D$  : diámetro de tubería (m)

$v$  : velocidad promedio del flujo (m/s)

Tanto la rugosidad intrínseca de la tubería (rugosidad relativa), como el número de Reynolds, proporcionan un factor de fricción. (Mott, 2006). Se determina así:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta}$$

En donde:

$N_R$ : número Reynolds (adimensional)

$v$  : velocidad promedio del fluido (m/s)

$D$  : diámetro de la tubería (m)

$\rho$  : densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$\eta$  : viscosidad de fluido (m\*s/kg)

La rugosidad relativa (adimensional) se obtiene de la medida del diámetro ( $D$ ) de la tubería, sobre el coeficiente de rugosidad ( $\epsilon$ ) de la pared del material. (Mott, 2006)

Con el valor de  $N_R$  y el valor de rugosidad relativa, se observa el diagrama gráfico de Moody para estimar el factor de fricción  $f$ . (Mott, 2006)

#### **6.5.3.4.2. Pérdidas en accesorios**

Cuando un fluido recorre una curva tiene un aumento en la presión en la parte exterior y una disminución en la parte interna, provocando un cambio de presión que implica pérdidas. (Hermosin, 2016). Las pérdidas “se deben a cualquier obstáculo en que el flujo emplee energía útil para superarlo, pueden ser por: entrada a la conducción, rejillas, ampliación, reducción, cambios de dirección, válvulas, bifurcaciones, salidas, etc.” (Cafaggi, 2021; Rodal, 2021; Sánchez, 2021, p. 39). La expresión es:

$$H_L = k \frac{v^2}{2g}$$

El coeficiente  $K$  varía dependiendo del accesorio que se analice, cada uno tiene un valor que puede ser proporcionado por el fabricante. (Cafaggi et al., 2021)

#### 6.5.4. Potencia efectiva

Corresponde a la energía aprovechable en la bomba, es decir, será la energía que se aplique al agua y se representa por la ecuación que aquí se muestra. (Hermosin, 2016)

$$p = \rho Q g H_N [Watts]$$

#### 6.5.5. Potencia eléctrica

Es la potencia necesaria que proporcione el motor a la bomba sumergible para su funcionamiento, para lo cual, mediante la eficiencia se puede obtener la relación entre potencia efectiva ( $P$ ) y potencia eléctrica ( $P_a$ ). (Hermosin, 2016)

$$\eta_{bomba} = \frac{P}{P_a}$$

## 7. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

#### 1.1. Energía eléctrica en Guatemala

##### 1.1.1. Mercado eléctrico

##### 1.1.2. Matriz de generación de electricidad

#### 1.2. Centrales hidroeléctricas

##### 1.2.1. Contribución hidroeléctrica en Guatemala

##### 1.2.2. Clasificación por potencia de centrales hidroeléctricas

##### 1.2.3. Tipos de centrales hidroeléctricas

###### 1.2.3.1. Centrales hidroeléctricas de embalse

###### 1.2.3.2. Centrales mixtas

##### 1.2.4. Aspectos de una central hidroeléctrica

###### 1.2.4.1. Altura de salto o carga de agua

###### 1.2.4.2. Caudal

###### 1.2.4.2.1. Curva de caudales medios diarios de un año estacional

- 1.2.4.2.2. Curva de caudales medios clasificados
      - 1.2.4.2.3. Curva de caudales del año más seco
    - 1.2.4.3. Potencia instalada
    - 1.2.4.4. Energía producida
- 1.3. Sistemas para almacenar energía
  - 1.3.1. Sistemas electroquímicos
    - 1.3.1.1. Baterías de estado sólido
    - 1.3.1.2. Baterías de flujo
    - 1.3.1.3. Cédulas o celdas de combustible
    - 1.3.1.4. Hidrógeno
  - 1.3.2. Sistemas térmicos
  - 1.3.3. Sistemas electromagnéticos
    - 1.3.3.1. Por superconductores
    - 1.3.3.2. Por superconductividad
  - 1.3.4. Sistemas electromecánicos
    - 1.3.4.1. Por aire comprimido
    - 1.3.4.2. Volante de inercia
    - 1.3.4.3. Gravitacional
- 1.4. Sistema de almacenamiento hídrico por bombeo
  - 1.4.1. Centrales de almacenamiento hídrico por bombeo a nivel mundial
  - 1.4.2. Tipos de centrales PHES
    - 1.4.2.1. Sistema de ciclo cerrado
    - 1.4.2.2. Sistema de ciclo semiabierto
    - 1.4.2.3. Sistema de ciclo abierto
  - 1.4.3. Esquemas de centrales PHES
    - 1.4.3.1. Esquema binario

- 1.4.3.2. Esquema ternario
- 1.4.3.3. Esquema cuaternario
- 1.4.4. Elementos principales de una central PHES
  - 1.4.4.1. Embalses o reservorios
  - 1.4.4.2. Presa
  - 1.4.4.3. Tubería de presión o forzada
  - 1.4.4.4. Casa de máquinas
  - 1.4.4.5. Turbinas hidráulicas
    - 1.4.4.5.1. Turbinas de acción o impulso
    - 1.4.4.5.2. Turbinas de reacción
- 1.5. Sistemas de bombeo
  - 1.5.1. Elementos constructivos básicos
  - 1.5.2. Tipos de bombas hidráulicas
    - 1.5.2.1. Bombas cinéticas
    - 1.5.2.2. Bombas de desplazamiento positivo
  - 1.5.3. Cálculo de sistemas de bombeo
    - 1.5.3.1. Caudal
    - 1.5.3.2. Principio de Bernoulli
    - 1.5.3.3. Altura neta
    - 1.5.3.4. Pérdidas de carga
      - 1.5.3.4.1. Pérdidas en tubería por fricción
      - 1.5.3.4.2. Pérdidas en accesorios
    - 1.5.3.5. Potencia efectiva
    - 1.5.3.6. Potencia eléctrica

## 2. ANÁLISIS TÉCNICO

- 2.1. Cálculo del volumen de agua a bombear

- 2.2. Ubicación de embalse inferior
    - 2.2.1. Volumen del embalse disponible
    - 2.2.2. Tipo de presa
  - 2.3. Plano de trazo de tubería de bombeo
  - 2.4. Cálculo de tubería de bombeo
  - 2.5. Cálculo del sistema de bombeo
3. ANÁLISIS ECONÓMICO
- 3.1. Presupuesto
  - 3.2. Estimación de ingresos anuales
  - 3.3. Costos de operación y mantenimiento
  - 3.4. Cálculo de VAN
  - 3.5. Cálculo de TIR
4. RESULTADOS
- 4.1. Plano de curvas de nivel
  - 4.2. Equipo de bombeo optimo
  - 4.3. Viabilidad técnica
  - 4.4. Viabilidad económica
  - 4.5. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

## **8. MARCO METODOLÓGICO**

### **8.1. Tipo de estudio**

El estudio presentado en este documento obedece a un método analítico, con una investigación de tipo cuantitativa descriptiva, ya que a partir de la información obtenida de una central hidroeléctrica existente se pueda estimar el incremento de energía generada durante un año estacional de producción, definiendo las variables y calculando valores que serán necesarios para el dimensionamiento de todos los elementos, sistemas y esquemas involucrados en la propuesta de sistema de solución.

### **8.2. Diseño de investigación**

Mediante la recopilación de información y la toma medición directa de datos de campo, se generará las condiciones necesarias para el almacenamiento de energía, para construir un diseño de investigación estadística.

### **8.3. Variables de estudio**

Dentro del desarrollo de investigación se hará uso de variables independientes como variables dependientes, las cuales se exponen en la siguiente tabla.

**Tabla 4.***Descripción de variables*

<b>Variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Altura</b>	Es la distancia vertical entre dos puntos	Cálculo de salto neto Profundidad de embalse Ubicación de bomba centrífuga	Altura en m
<b>Distancia</b>	Diferencia entre dos cosas	Cálculo de longitud de tubería	Distancia en m
<b>Área</b>	Es una medida superficial comprendida entre ciertos límites	Área superficial mínima de embalse inferior	Área total en m <sup>2</sup>
<b>Volumen</b>	Espacio ocupado por un cuerpo	Volumen mínimo para almacenamiento de agua a bombear	Volumen total en m <sup>3</sup>
<b>Caudal</b>	Volumen de agua por unidad de tiempo que atraviesa una superficie	Cálculo de velocidad específica del agua Útil para el cálculo de bomba centrífuga Cálculo de tubería	Caudal en m <sup>3</sup> /s
<b>Potencia</b>	Es la capacidad de hacer un trabajo	Potencia de bomba centrífuga	Potencia en kW
<b>Energía</b>	Es la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo y producir cambios en ellos mismos o en otros cuerpos	Energía despachada promedio Cálculo de generación de energía proyectada Energía consumida por el sistema de bombeo	Energía en kWh
<b>Diámetro</b>	Anchura máxima de un cuerpo circular	Determinación de coeficientes de pérdidas de carga de agua Cálculo presión	Diámetro en pulgadas

Continuación de la tabla 4.

<b>Variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Presión</b>	Magnitud física que expresa la fuerza ejercida por un cuerpo sobre la unidad de superficie	Determinación de barómetro a instalar	Presión en Pascales
<b>Tiempo</b>	Duración de las cosas sujetas a mudanzas	Duración de trabajo del sistema de bombeo Proyección de energía generada de la central Cálculo de caudal	Tiempo en h
<b>Costos</b>	Gasto realizado para la obtención de una cosa	Elaboración de presupuesto Precio del proyecto Tasa interna de retorno	Costos en Q

*Nota.* Desglose de las variables. Elaboración propia, realizado con Word.

#### **8.4. Fases metodológicas.**

Para el desarrollo y obtención de resultados se seguirá la metodología descrita en los siguientes párrafos.

##### **8.4.1. Fase uno: recolección de información**

La recolección de información se realizará en torno a los datos existentes en la central hidroeléctrica: la potencia nominal de la central, el historial de generación de energía a lo largo de los años, historial de caudal del embalse, historial de niveles o volumen del embalse, características técnicas de las turbinas y generación de energía eléctrica máxima.

La información se analizará mediante métodos estadísticos descriptivos y se harán gráficos de curvas con el programa de análisis de datos Excel.

#### **8.4.2. Fase dos: ubicación para la construcción del embalse inferior**

A partir de una perspectiva amplia del terreno de la central hidroeléctrica, se recopilará información para la propuesta de construcción de un embalse inferior, mediante la observación y medición topográfica del terreno; esto será para obtener un volumen de acumulación de recurso hídrico mínimo, para la obtención de generación de energía máxima en un periodo de cuatro horas (correspondiente al horario de banda en punta). Así mismo, se evaluará la construcción de una presa.

#### **8.4.3. Fase tres: trazado de tubería de bombeo**

Teniendo la ubicación del reservorio inferior, se trazará una ruta para la tubería encargada de devolver un volumen de agua al reservorio superior, esto con el apoyo de una medición topográfica. De esa manera, se podrá establecer la cantidad de tubos y accesorios necesarios preliminarmente.

#### **8.4.4. Fase cuatro: cálculo de bomba y tubería**

Considerando la información recopilada, se realizará el cálculo de caudal requerido.

$$Q = \frac{\text{Volumen de agua (m}^3\text{)}}{\text{Tiempo (s)}}$$

Teniendo estos datos, se calculará el diámetro económico y presión a soportar de la tubería a instalar.

A partir de ello, se establecerán las características de la bomba o bombas sumergibles que se consideran instalar, con la ayuda de la ecuación de Bernoulli, teniendo en cuenta las pérdidas de carga por los factores de pérdidas en las tuberías y accesorios.

#### **8.4.5. Fase cinco: proyección de despacho de energía anual**

Se realizará una proyección de la energía máxima generada con la utilización del sistema de almacenamiento por bombeo.

#### **8.4.6. Fase seis: análisis económico**

- Se realizará un presupuesto de la instalación del sistema de bombeo con las características determinadas anteriormente.
- Se estimará los ingresos anuales por venta de energía producida, recurriendo a un historial de precios de energía del último año.
- Se calculará los costos de operación y mantenimiento.
- Se obtendrá el VAN y una TIR.
- Se seleccionará el caudal de máximo rendimiento económico.

#### **8.4.7. Fase siete: análisis y discusión de resultados**

Se analizará el impacto en la matriz de generación eléctrica de Guatemala. También se podrá establecer la viabilidad del sistema y aplicabilidad a otras centrales hidroeléctricas existentes.



## **9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN**

Para el desarrollo de análisis y obtención de datos se utilizarán las herramientas que se describen en seguida.

### **9.1. Herramientas de recolección de información**

- Plano de curvas de nivel del embalse inferior.
- Plano área disponible para la construcción del embalse inferior.
- Topográfica de distancia y salto de la tubería de bombeo.

### **9.2. Herramientas de estadística descriptiva**

- Cálculo de promedios (caudales, demandas, energía generada).
- Gráficas de dispersión para la elaboración de curvas que representen los valores promedios de energía, caudal y demanda.
- Gráficos de curvas proyectadas.
- Tablas de generación de energía proyectada.
- Elaboración de presupuesto.
- Elaboración de costos de mantenimiento y operación.
- Tabla de costos general.
- Cálculo de TIR.

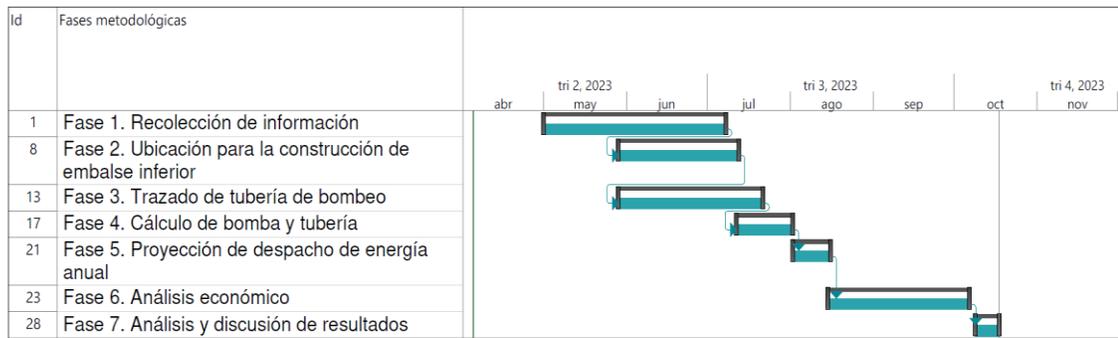


## 10. CRONOGRAMA

En la siguiente figura se presenta el cronograma para la ejecución del presente trabajo de investigación. Los tiempos se definen en función de cada fase metodológica propuesta.

**Figura 14.**

*Cronograma de actividades*



*Nota.* Descripción por fechas para la realización del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Project.



## 11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se ejecutará con fondos propios del estudiante de maestría. A continuación, se describen los recursos que se tendrán en cuenta para este trabajo de graduación.

**Tabla 5.**

*Recursos necesarios para la investigación*

<b>Recursos</b>	<b>Costos</b>
Una resma de hojas	Q. 55.00
Viáticos (combustible, hospedaje y alimentación)	Q. 1,200.00
Levantamiento topográfico	Q. 3,000.00
Tóner de impresora	Q. 150.00
Asesor	Q. 2,500.00
<b>Total</b>	<b>Q. 6,905.00</b>

*Nota.* Detalle del presupuesto para la realización del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

Considerando que los recursos aportados para la investigación son suficientes, se concluye que el desarrollo de la presente investigación es factible.



## REFERENCIAS

- Administrador del Mercado Mayorista (2023). *Generación y demanda*. [https://www.amm.org.gt/portal/?page\\_id=2617](https://www.amm.org.gt/portal/?page_id=2617)
- Alarcón, F. (2022). *Diseño conceptual de centrales hidroeléctricas a bombeo usando agua desalinizada*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Archivo digital. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/189091>
- Alonso, M., y Chenlo, F. (2013). *Sistema de Bombeo Fotovoltaico*. [Tesis de maestría, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas]. Archivo digital. <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45332.pdf>
- Álvarez, A. (2012). *Caracterización y evaluación de esquemas no convencionales de plantas hidroeléctricas*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Archivo digital. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5351/alvarezramirez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Administrador del Mercado Mayorista (2020). *Mercado eléctrico de Guatemala y posibilidades de inversión*. [https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb\\_dl=610](https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=610)Guía para inversiones mercado eléctrico de Guatemala -VF-[4] (1).pdf
- Beltrán, A., García, H., Rodríguez, D., & Rodríguez, L. (2018). Diseño y cálculo de una central híbrida solar-hidráulica en Gran Canaria.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49659032031>

- Blázquez, A. (2021). *Análisis tecno-económico del almacenamiento mediante centrales hidráulicas de bombeo de agua marina en el sistema eléctrico de Baja California Sur*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Archivo digital. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/160479/BI%c3%a1zquez%20-%20AN%c3%81LISIS%20TECNO-ECON%c3%93MICO%20DEL%20ALMACENAMIENTO%20MEDIANTE%20CENTRALES%20HIDR%c3%81ULICAS%20DE%20BOMBEO%20D....pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Cabrales, S. (2015). *Análisis del comportamiento de centrales hidroeléctricas de bombeo en la operación de sistemas interconectados*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Archivo digital. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134671/Analisis-del-comportamiento-de-centrales-hidroelectricas-de-bombeo....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cafaggi, A., Rodal, E., y Sánchez, A. (2021). *Sistemas de bombeo* (Primera Edición digital). Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/17564>
- Chán, M. (2012). *Métodos de almacenamiento del agua. Un elemento clave para la adaptación al cambio climático*. <https://icc.org.gt/es/metodos-de-almacenamiento-del-agua-un-elemento-clave-para-la-adaptacion-al-cambio-climatico/>

Chiliquinga Chariguamán, D. A. (2022). *Estudio de sostenibilidad con energía fotovoltaica para el abastecimiento de electricidad al sistema de agua del barrio Mariscal Sucre*. [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Ambato]. Archivo digital.  
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/36942>

Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (marzo de 2023). *Monitoreo del Mercado Mayorista*.  
[https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page\\_id=9336](https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?page_id=9336)

Díaz, F., Sumper, A., Gomis, O., & Villafáfila, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications [Una revisión de las tecnologías de almacenamiento de energía para aplicaciones de energía eólica]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Revisiones de energía renovable y sostenible], 16(4), 2154–2171.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>

Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration [Evaluación de las opciones de almacenamiento de energía de utilidad pública para una mayor penetración de las energías renovables]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Reseña sobre energías renovables y sostenibles], 16(6), 4141–4147.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.048>

Florindo, I. (2021). *Estudio de viabilidad de la transformación de una central hidroeléctrica en una central reversible en el País Vasco*. [Tesis de maestría, Universidad de Alcalá]. Archivo digital.  
[https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/49383/TFM\\_FL](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/49383/TFM_FL)

[ORINDO MORAN 2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unan.edu.ni/4367/1/17906.pdf)

Fuentes, L. (2017). *Modelo de Evaluación Integral Sostenible para los Sistemas de Bombeo Fotovoltaicos en Comunidades Rurales: El Limón y El Lagartillo* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. Archivo digital.  
<https://repositorio.unan.edu.ni/4367/1/17906.pdf>

González, M. (2019). *Metodología para evaluar el impacto de las tecnologías de almacenamiento de energía en sistemas de distribución eléctricos*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña]. Archivo digital.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/128620/tfm-mariagonzalez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hermosin, A. (2016). *Diseño y estudio de viabilidad de una central hidroeléctrica reversible en la Isla de La Gomera* [Tesis de maestría, Universidad Pontificia Comillas]. Archivo digital.  
<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/17436>

International Hydropower Association. (2022). *2022 Hydropower status report. Sector trends and insights* [Informe de estado de la energía hidroeléctrica 2022. Tendencias y perspectivas del sector].  
[https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594\\_IHA202212-status-report-02.pdf](https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594_IHA202212-status-report-02.pdf)

Martínez, C. (2020). *Diseño de sistema de bombeo a base de energía solar para suministro de agua*. [Tesis de maestría, Universidad

Veracruzana]. Archivo digital.

[https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis\\_Carlos-Alberto-Martinez-Farias.pdf](https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis_Carlos-Alberto-Martinez-Farias.pdf)

Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Subsector eléctrico en Guatemala*.

<https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Subsector-Eléctrico-en-Guatemala.pdf>

Monroy, J., y Montaña, E. (2015). *Hidrogenación en pequeña escala. Una experiencia local programa hidroenergético*. Instituto de Hidráulica e

Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés.  
[http://www.energetica.org.bo/energetica/pdf/publicaciones/libro\\_hpe.pdf](http://www.energetica.org.bo/energetica/pdf/publicaciones/libro_hpe.pdf)

Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación.

<https://dredgarayalaherrera.files.wordpress.com/2019/10/mecanica-de-fluidos-robert-mott-6ta-edicion.pdf>

Núñez, I. (2014). *Almacenamiento de energía por bombeo (hydro-pumped storage) en el marco regulatorio chileno*. [Tesis de maestría,

Pontificia Universidad Católica de Chile]. Archivo digital.  
<https://repositorio.uc.cl/handle/11534/16558>

Osorio, I. (2017). *Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Antioquia*. [Tesis de maestría,

Universidad EAFIT]. Archivo digital.  
[https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11732/Osorio\\_Londo%  
c3%b1o\\_lverson\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/11732/Osorio_Londo%c3%b1o_lverson_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ould, S., Rekioua, D., Rekioua, T., & Bacha, S. (2016). Overview of energy storage in renewable energy systems [Descripción general del almacenamiento de energía en sistemas de energía renovable]. *International Journal of Hydrogen Energy* [Revista internacional de energía de hidrógeno], 41(45), 20914–20927. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243>

Pitorac, L. (2021). *Upgrading of Hydropower Plants to Pumped Storage Plants: Tunnel System Hydraulics* [Transformación de centrales hidroeléctricas a centrales de bombeo: Sistema hidráulico de Túneles]. [Tesis doctoral, Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología]. Archivo digital. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2826677>

Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista. Acuerdo gubernativo No. 299-98. (2 de junio de 1998). Presidente de la República. Guatemala. <https://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/Reglamento%20del%20AMM.pdf>

Rehman, S., Al-Hadhrani, L., & Alam, M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review [Sistema de almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo: una revisión tecnológica]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Revisiones de energía renovable y sostenible], 44, 586–598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040>

Richter, W., Piki, F., Zenz, G., Vereide, K., Pummer, E., & Lia, L. (del 26 al 28 de octubre de 2020). Economic and Sustainable Energy Transition Enabled by Pumped-Storage Hydropower Plants [Transición

energética económica y sostenible habilitada por plantas hidroeléctricas de almacenamiento por bombeo] [Conferencia]. *Hydro 2020*.  
Virtuell, Francia.  
[https://www.researchgate.net/publication/346218275\\_Economic\\_and\\_Sustainable\\_Energy\\_Transition\\_Enabled\\_by\\_Pumped-Storage\\_Hydropower\\_Plants](https://www.researchgate.net/publication/346218275_Economic_and_Sustainable_Energy_Transition_Enabled_by_Pumped-Storage_Hydropower_Plants)

Rodríguez, J. (2021). *Almacenamiento de energía mediante baterías para aliviar la curva de demanda del alimentador 0524*. [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca]. Archivo digital.  
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35445/1/Trabajo%20de%20Titulacion.pdf>

Rojas, L. (2019). *Modelado de un sistema de almacenamiento de energía por rebombeo y su esquema de protección diferencial*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Archivo digital.  
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27505/Tesis%20CD%20Modelado%20de%20un%20sistema%20de%20almacenamiento%20de%20energ%C3%ACA%20por%20rebombeo%20y%20su%20esquema%20de%20protecci%C3%B2n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sánchez, L. (2022). *Reconocimiento de cavitación y anomalías en una bomba hidráulica con técnicas de aprendizaje automático*. [Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica]. Archivo digital.  
[https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/87543/TFIA\\_Luis\\_Sanchez\\_A65285\\_LSC-JGC-GMR-LDM-JGM-ACL.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/87543/TFIA_Luis_Sanchez_A65285_LSC-JGC-GMR-LDM-JGM-ACL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sanz, J. (2016). *Energía Hidroeléctrica*. Prensas de la Universidad de

Zaragoza.

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Q5BfDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA33&dq=definicion+hidroelectrica&ots=CwsMCVqW9e&sig=3Ozn53j6fFOZi23-zsJ4MnZ0vOM#v=onepage&q=definicion%20hidroelectrica&f=false>

Sanz, F. (2021). *Acumulación de energía por bombeo y sus efectos en el sistema eléctrico*. [Tesis de maestría, Universidad de la República Uruguay]. Archivo digital. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/28343/1/San21.pdf>

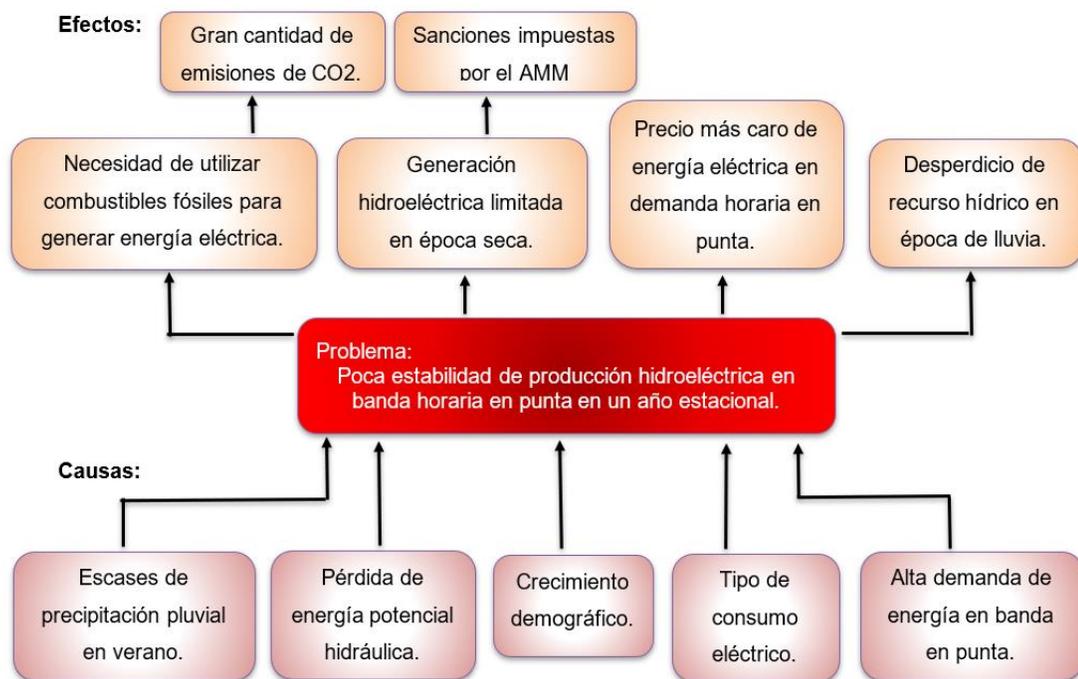
Sethom, M. (2022). *Hydraulic power with reversible pump of Foz do Tua Dam* [Energía hidráulica con bomba reversible de la presa de Foz do Tua]. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico de Bragança]. Archivo digital. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/25270/1/MohamedSethom.pdf>

Villagrán, C. (2017). *Modelo de optimización para una central hidroeléctrica de bombeo*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Archivo digital. <https://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/22964>

# APÉNDICES

## Apéndice 1.

### Árbol de problemas



*Nota.* La imagen muestra las causas del problema, el problema central y los efectos que genera dicho problema. Elaboración propia, realizado con Word.

## Apéndice 2.

### Matriz de coherencia

Planteamiento del problema	Objetivos	Variables e indicadores	Diseño Metodológico
<b>Pregunta general:</b>	<b>Objetivo General</b>	Independientes:	Método
¿Cuánto aportaría un sistema de almacenamiento por bombeo a la generación de energía eléctrica, en un horario de demanda en punta durante un año estacional, en una hidroeléctrica con horario de regulación diario en Guatemala?	Analizar técnica y económicamente la implementación de un sistema de almacenamiento por bombeo en la generación de energía, en un horario de banda en punta a largo de un año estacional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área geográfica disponible (m<sup>2</sup>)</li> <li>• Área topográfica disponible (m<sup>2</sup>)</li> <li>• Caudal disponible (m<sup>3</sup>/s)</li> <li>• Distancias (m)</li> <li>• Alturas (m)</li> <li>• Evaporación (mm/día)</li> <li>• Irradiación solar (kWh/m<sup>2</sup>)</li> </ul>	Almacenamiento por bombeo, lo cual comprende aplicar: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecuación de diseño de caudal, mediante método de flotador</li> <li>• Ecuaciones para el cálculo de tubería</li> <li>• Ecuación de costos de inversión</li> <li>• Cálculo de valores de irradiación solar en la ubicación determinada</li> <li>• Ecuación de eficiencia global</li> <li>• Ecuación de pérdidas por evaporación</li> <li>• Cálculo de energía consumida</li> <li>• Cálculo de turbina derivado de la altura de salto</li> <li>• Aplicación de estadística descriptiva</li> </ul>
<b>Preguntas específicas</b>	<b>Objetivos específicos</b>	Dependientes:	
1. ¿Cuál es el dimensionamiento adecuado de un embalse aguas abajo, para obtener la capacidad de generación máxima de potencia, en horario de banda en punta durante un año estacional?	1. Calcular el dimensionamiento óptimo de un embalse aguas abajo para obtener la capacidad de generación máxima a lo largo de un año estacional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro de tubería (m)</li> <li>• Rugosidad relativa</li> </ul>	
2. ¿Qué características técnicas deben tener los equipos que se adecuen a la instalación de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo, que cubra la demanda en la banda horaria en punta?	2. Determinar las características técnicas de los equipos para la instalación de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo que cubra la demanda máxima en la banda horaria en punta.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia consumida (kWh)</li> <li>• Potencia Generada (kWh)</li> </ul>	
3. ¿Cuánta energía y eficiencia se genera en la banda horaria en punta a partir de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo?	3. Calcular la energía y eficiencia generada en la banda horaria en punta a partir de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo.		
4. ¿Cuál es la viabilidad económica en la aplicación de un sistema de almacenamiento hídrico en una central hidroeléctrica de Guatemala?	4. Analizar la viabilidad económica en la implementación de un sistema de almacenamiento hídrico por bombeo en una central hidroeléctrica de Guatemala.		

Nota. Detalles de la matriz de coherencia. Elaboración propia, realizado con Word.

# ANEXOS

## Anexo 1.

### Currículum del asesor



**Daniel Angel  
Figueroa García**

**Edad**  
36 años

**DPI-CUI**  
1842 40751 1412

**Lugar de  
Nacimiento:**  
Joyabaj, El Quiché.

**Dirección:**  
12 Av. 14-43 Zona 7  
Residenciales  
Petapa 2 San Miguel  
Petapa

**Teléfonos:**  
5183-9795

**E-mail**  
dnnyfg@hotmail.com  
dfigueroa@inde.gob.gt

#### Formación académica

- Ingeniero Mecánico Electricista, Colegiado Activo 13,087**
- 2016-2017 Maestría en Negocios Energéticos**  
Universidad Galileo
- 2015-2016 Maestría de Ingeniería del Mantenimiento**  
Universidad de San Carlos de Guatemala
- 06/2016 Especialización en Mantenimiento**  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
USAC
- 2005-2011 Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica,**  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
USAC
- 2005-2006 Escuela de idiomas y lenguas de la Universidad**  
de San Carlos de Guatemala
- 2002-2004 Bachiller Industrial y Perito en Computación.**  
Instituto Tecnológico K'iche,  
Chichicastenango, El Quiché.
- 1999-2001 Estudios de nivel Básico**  
Instituto de Educación Básica con orientación  
Experimental Francisco Méndez Escobar,|  
Joyabaj, Quiché.
- 1993-1998 Estudios de Pre-primaria y Primaria**  
Escuela Oficial Urbana Mixta  
Zacualpa, El Quiché.

#### Experiencia Laboral

- 10/2022- A la fecha Jefe**  
**Planta Hidroeléctrica Chixoy**  
Realizando funciones de Jefatura de Planta
- 01/2019- 09-2022 Subjefe**  
**Planta Hidroeléctrica Chixoy**  
Encargado de la Operación y Mantenimiento de la Planta Hidroeléctrica
- 10/2019 11/2020 Jefe Interino**  
**Planta Hidroeléctrica Chixoy**
- 11/2021 01/2022 Realizando funciones de Jefatura de Planta**

Continuación de anexo 1.

11/2018 01/2019	<b>Jefe de Planta</b> <b>Sistema Hidroeléctrico Jurún Marinalá- Michatoyas</b> Realizando funciones de Jefatura de Planta
07/2017- 10/2018	<b>Subjefe</b> <b>Planta Hidroeléctrica Aguacapa</b> Encargado de la Operación y Mantenimiento de la Planta Hidroeléctrica
12/2015 01/2016 06/2016 12/2017 06/2018 10/2018	<b>Jefe Interino</b> <b>Planta Hidroeléctrica Aguacapa</b> Realizando funciones de Jefatura de Planta
02/2013- 06/2017	<b>Supervisor de Mantenimiento</b> <b>Jefe de Sección II</b> <b>Planta Hidroeléctrica Aguacapa</b> <b>INDE- EGEE</b> Realización de actividades de Supervisor de turno, programación, ejecución y realización de mantenimientos preventivos y correctivos, supervisión, diseño y cálculos de proyectos y términos de referencia, montaje y puesta en servicio de equipos
09/2012- 01/2013	<b>Asesor de Proyectos</b> <b>OHM</b> Organización Eléctrica de Guatemala OEG,S.A. Enfocado en Motores Eléctricos, Diseños de media, Alta Tensión, CCM, Diseños Eléctricos, Mantenimientos S/E, etc.
11/2011- 06/2012	Encargado de producción Transportes de Material y Equipos Figueroa & García
9/2010- 11/2010	Prácticas Finales de Ingeniería EGEE Instituto Nacional de Electrificación INDE Planta Hidroeléctrica Jurún Marinalá. Aldea Agua Blanca, Escuintla. Enfocadas Principalmente en Motores Eléctricos, Diseños de Media Tensión, Revisión y Mantenimiento de S/E Practica Final.
09/2016 - 09-2022	<b>Catedrático Universidad Galileo</b> en Instituto de Recursos Energéticos IRE En Técnico de Centrales Hidroeléctricas y Postgrados en Sostenibilidad, Ambiente y Energía Renovable Postgrado en Hidroenergía
01/2021 - 04-2022	<b>Catedrático Universidad de San Carlos de Guatemala</b> Facultad de Ingeniería Campus Central Maestría en Ingeniería del Mantenimiento

*Nota.* Información académica y laboral del asesor. Elaboración propia.

## Anexo 2.

### Carta de aceptación de protocolo

Guatemala, 07 de abril 2023

Ingeniero M.Sc.  
Edgar Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería USAC  
Ciudad Universitaria, Zona 12

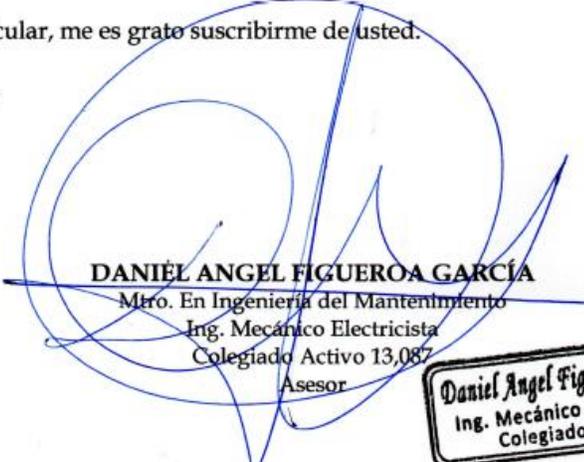
Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del estudiante MARLON SMAILLI XICARÁ SUM, carné número 999008856, he procedido a la revisión del protocolo cuyo título es "DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO HÍDRICO POR BOMBEO EN HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA EN GUATEMALA", para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Xicará Sum, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

  
**DANIEL ANGEL FIGUEROA GARCÍA**  
Mtro. En Ingeniería del Mantenimiento  
Ing. Mecánico Electricista  
Colegiado Activo 13,087  
Asesor



*Nota.* Gestión de aceptación de protocolo de tesis por parte del asesor. Elaboración propia.

