

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL COSTO VARIABLE DE PRODUCCIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

**CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS PARA LA  
AUTOMATIZACIÓN EN EL PROCESAMIENTO DE LA  
INFORMACIÓN RELACIONADA CON LA OPERACIÓN DE  
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN EL ECUADOR.  
IMPLEMENTACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA  
LA AUTOMATIZACIÓN DEL CÁLCULO DE COSTOS VARIABLES  
DE PRODUCCIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.  
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y HERRAMIENTA  
DESARROLLADA PARA EL CÁLCULO DE CENTRALES  
HIDROELÉCTRICAS ACTUALMENTE EN OPERACIÓN EN EL  
ECUADOR.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRICIDAD**

**ÓSCAR ANDRÉS CADENA YÁNEZ**

**oscar.cadena02@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Dr. Ing. GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ**

**gabriel.salazar@epn.edu.ec**

**DMQ, abril 2023**

## CERTIFICACIONES

Yo, Óscar Andrés Cadena Yánez declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Óscar Andrés Cadena Yánez

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por, Óscar Andrés Cadena Yánez, bajo mi supervisión.



Dr. Ing. Gabriel Benjamín Salazar Yépez  
DIRECTOR

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ÓSCAR ANDRÉS CANDENA YÁNEZ

GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mi familia, especialmente a mis padres los cuales me han apoyado constantemente en todos los años de mi carrera lo que me permitió terminar mis estudios universitarios.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi padre Óscar Cadena y mi madre Nancy Yáñez, quienes me han guiado y aconsejado constantemente, me supieron dar el apoyo necesario para siempre mantenerme firme en mis estudios y poderlos culminar en esta prestigiosa universidad por lo que siempre estaré agradecido.

A mi hermana Karen Cadena y a mi pareja Erika Ruiz quienes siempre me han brindado su cariño y ayuda.

A mis tíos, primos y amigos los cuales en estos años me han dado su amistad sincera, apoyo mental y emocional que me permitieron siempre contar con un lugar seguro.

Al Dr. Gabriel Salazar quien fue un mentor y guía para realizar este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT.....	IXX

### 1. Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo General .....	1
1.2. Objetivos específicos .....	1
1.3. Alcance .....	2
1.4. Marco teórico .....	2
1.4.1. Central de generación eléctrica .....	2
1.4.2. Definiciones importantes dentro de la generación eléctrica.....	3
1.4.3. Tipos de centrales de generación eléctrica. ....	5
1.4.5. Central de generación solar .....	9
1.4.6. Central de generación mareomotriz.....	10
1.4.7. Central de generación hidroeléctrica .....	10
1.4.8. Central hidroeléctrica de bombeo .....	18
1.4.9. Costos de producción de energía eléctrica .....	18
1.4.10. Costos variables de producción de centrales de generación hidroeléctrica 20	
1.4.11. Regulación Nro. ARCERNNR – 004/20 Para el cálculo de costo variable de producción de centrales hidroeléctricas en Ecuador .....	21

2. METODOLOGÍA.....	22
2.1. Consideraciones .....	22
2.2. Componentes propuestos para el cálculo de los CVP de centrales hidroeléctricas de Ecuador.....	23
2.3. Cálculo del costo del agua .....	23
2.3.1. Descripción de la metodología propuesta para el cálculo de costos por uso de agua.....	24
2.4. Cálculo de costos por servicios auxiliares .....	25
2.4.1. Descripción de la metodología propuesta para el cálculo de Costos por Servicios Auxiliares.....	26
2.5.1. Descripción de la metodología propuesta para el cálculo de costos por operación y mantenimiento.....	28
3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE CVP DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL ECUADOR.....	35
3.1. Descripción de la herramienta informática y su aplicación .....	35
3.2. Cálculo del CVP de centrales hidroeléctrica en Ecuador.....	37
3.3. Resultados.....	37
3.3.1. Centrales con potencia instalada mayor a 100 [MW].....	37
3.3.2. Centrales con potencia instalada entre 50 [MW] a 100 [MW] .....	40
3.3.3. Centrales con potencia instalada entre 10 [MW] a 50 [MW] .....	43
3.4. Análisis de Resultados .....	44
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	46
4.1. Conclusiones .....	46
4.2. Recomendaciones .....	47
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
6. ANEXOS .....	52

## RESUMEN

El presente proyecto plantea una metodología técnica para el cálculo de los costos variables de producción (CVP) para las centrales hidroeléctricas actualmente en operación en Ecuador, adicionalmente se incluye una herramienta informática que permite calcular los costos variables de producción de manera dinámica y de fácil comprensión.

En Ecuador el 1 de abril de 1999 empieza un régimen de operaciones del mercado eléctrico conocido como MEM (Mercado Eléctrico Mayorista) el cual es el punto de partida para distintas intervenciones de dicho mercado el cual está compuesto por la división de las actividades de generación, transporte y distribución de energía eléctrica. Por lo que surgen regulaciones para el despacho económico de energía eléctrica, para el caso de centrales hidroeléctricas el costo variable de producción obedece una suposición del valor del agua dentro del modelo de despacho económico al inicio del mercado eléctrico mayorista en el año 1999, este valor está plasmado en la disposición transitoria tercera de la Regulación No. CONELEC 013/08, que obedece a un valor de 2 US\$/MWh como costo variable de producción para centrales hidroeléctricas.

Ya que dicho valor establecido por la Regulación No. CONELEC 013/08 para el costo variable de producción no cuenta con una justificación técnica exclusiva para centrales de generación hidroeléctrica el presente proyecto desarrolla un estudio de los factores que componen el CVP de los cuales se conforma una metodología de cálculo técnica para dichos costos, considerando que Ecuador cuenta con centrales de generación hidroeléctrica pequeñas, medianas y grandes con distintas tecnologías.

En el capítulo uno del presente proyecto se describe las definiciones básicas que se debe conocer para comprender todos los componentes descritos para el desarrollo del presente proyecto. En el capítulo dos se describe la metodología propuesta describiendo los factores de cada componente los cuales están relacionados con la producción de energía eléctrica, estos son: costo por uso del agua, costo por operación y mantenimiento y costo por servicios auxiliares, la suma de estos componentes permite establecer el costo variable de producción de centrales hidroeléctricas de Ecuador para diferente tamaño y tecnología.

Finalmente, en el capítulo tres se describe como se emplea una herramienta informática (Excel) que permite calcular los CVP de centrales hidroeléctricas en Ecuador de manera dinámica estableciendo variables de entrada que debe proporcionar la central



hidroeléctrica, la herramienta informática realiza el cálculo de los CVP, y a su vez guarda estos resultados en una base de datos.

**PALABRAS CLAVE:** costos variables de producción de centrales hidroeléctricas, costo por uso del agua, costo por operación y mantenimiento, costo por servicios auxiliares

## ABSTRACT

This project proposes a technical methodology for the calculation of variable production costs (CVP) for hydroelectric plants currently in operation in Ecuador, also includes a computer tool that allows calculating variable production costs in a dynamic and easy-to-understand manner.

In Ecuador, on April 1, 1999, an electricity market operations regime began, known as MEM (Wholesale Electricity Market), which is the starting point for different interruptions of said market, which is made up of the division of generation activities, transportation and distribution of electrical energy. Therefore, regulations arise for the economic dispatch of electrical energy, in the case of hydroelectric plants, the variable cost of production obeys an assumption of the value of water within the economic dispatch model at the beginning of the wholesale electricity market in 1999, this value is embodied in the third transitory provision of Regulation No. CONELEC 013/08, which establishes a value of 2 US\$/MWh as variable cost of production for hydroelectric plants.

Since said value established by Regulation No. CONELEC 013/08 for the variable cost of production does not have an exclusive technical justification for hydroelectric generation plants, this project develops a study of the factors that make up the CVP of which a technical calculation methodology for said costs, considering that Ecuador has small, medium and large power generation plants with different technologies.

Chapter one of this project describes the basic definitions that must be known to understand all the components described for the development of this project. In chapter two, the proposed methodology is described, describing the factors of each component which are related to the production of electrical energy, these are: cost for water use, cost for operation and maintenance, and cost for auxiliary services, the sum of These components allows establishing the variable cost of production of hydroelectric power plants in Ecuador for different sizes and technologies.

Finally in chapter three it is described how a computer tool (Excel) is used to calculate the CVP of hydroelectric power plants in Ecuador dynamically. support input variables that must be provided by the hydroelectric plant, the computer tool

**KEYWORDS:** variable production costs of production of hydroelectric power plants, water use costs, operation and maintenance costs, ancillary services costs.

# **1. INTRODUCCIÓN**

En el presente documento se indica un resumen general de las regulaciones emitidas por las diferentes agencias en Ecuador para definir el costo variable de producción "CVP" de centrales hidroeléctricas, así como definiciones necesarias para comprender la metodología propuesta para el cálculo de los CVP, se describe y se diferencia entre costo fijo y variable y en base a lo descrito se discrimina los componentes que conforman los costos variables de producción para centrales hidroeléctricas, de esta manera se desarrolla metodología donde se incluye un procedimiento paso a paso sustentado para cada componente empleado en el mismo.

Se describe los distintos componentes que conforman los CVP para centrales hidroeléctricas en Ecuador, así como los factores que lo constituye y se determina un cálculo en US\$/MWh para cada componente, el cual en conjunto permite obtener el CVP para centrales hidroeléctricas de distinta potencia instalada y tecnología.

Finalmente se incluye una aplicación práctica de la metodología propuesta mediante una herramienta informática con la ayuda de Microsoft Excel, la cual permite determinar los CVP mediante una interfaz de fácil uso.

## **1.1. Objetivo General**

Desarrollar una metodología de cálculo de costos variables de operación para centrales hidroeléctricas en Ecuador, estructurar una base de datos y emplear una herramienta informática automatizada para calcular los costos variables operativos de centrales hidroeléctricas.

## **1.2. Objetivos específicos**

- Realizar una investigación de los costos variables de producción "CVP" en las centrales hidroeléctricas en el Ecuador, analizar los factores que componen estos CVP según la tecnología de la central hidroeléctrica.
- Crear una base de datos que permita recopilar, organizar y clasificar información relacionada con los costos variables para la producción de centrales hidroeléctricas en el Ecuador de distinta tecnología y tamaño.

- Implementar una herramienta informática interactiva para la automatización del cálculo de costos variables de producción de centrales hidroeléctricas en el Ecuador y emplear la metodología y herramienta desarrollada para el cálculo de costos variables de centrales hidroeléctrica actualmente en operación en el Ecuador con su análisis.

### **1.3. Alcance**

El desarrollo de este trabajo busca realizar una investigación sobre los componentes de los costos variables de producción de las diferentes plantas de generación eléctrica, enfocándose principalmente en las plantas hidroeléctricas del Ecuador, una vez realizado un análisis general de los componentes de los CVP como primera instancia se desarrollará una metodología para el cálculo de los costos variables de producción donde se incluirá todos los factores encontrados en la investigación.

Una vez que se haya detallado los factores que conformen los CVP de una central hidroeléctrica se desarrollada una base de datos que detalle los CVP de centrales hidroeléctricas mediante el análisis de informes técnicos-económicos que caractericen estos costos.

Ya con la base de datos establecida se utilizará una herramienta informática en la cual se implementará la metodología establecida al principio para la automatización del cálculo de costos variables de producción de centrales hidroeléctricas de diferentes tecnologías.

Finalmente se debe analiza los resultados de la aplicación de la metodología y herramienta informática desarrollada para el cálculo de costos variables de producción para centrales hidroeléctrica actualmente en operación en el Ecuador.

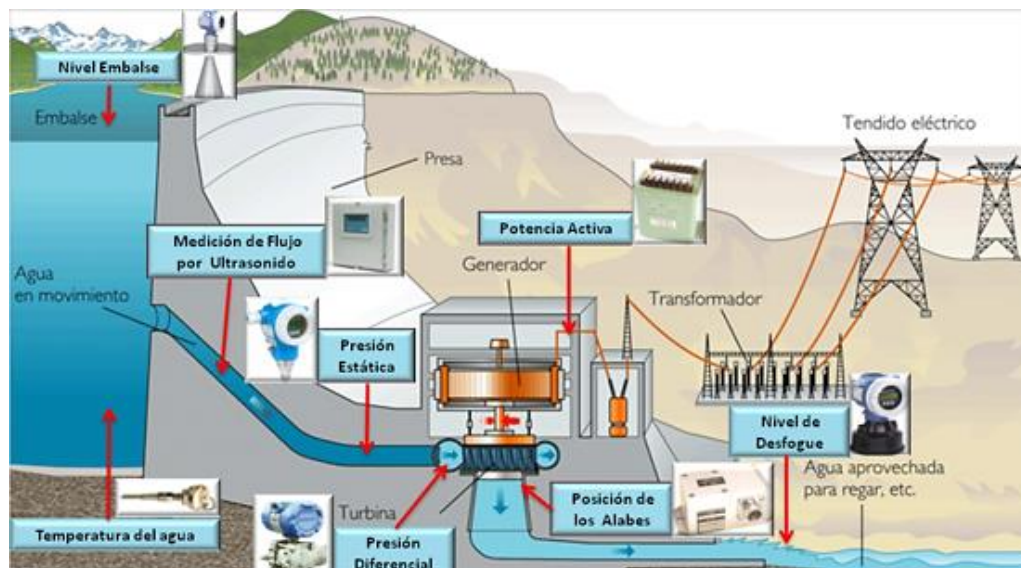
### **1.4. Marco teórico**

#### **1.4.1. Central de generación eléctrica**

Una central de generación eléctrica se puede definir como un sistema conformado por una instalación industrial con equipos mecánicos y eléctricos que transforma energía primaria en energía eléctrica.

El principio de funcionamiento de la generación eléctrica se da mediante el uso de una máquina motriz, la cual puede transformar distintos tipos de energía primaria en energía eléctrica; esta energía primaria puede provenir de fuentes como: química, térmica, mecánica, etc. Este principio de funcionamiento es de suma importancia para lograr suministrar energía eléctrica y está conformado por un conjunto de componentes que permiten la generación eléctrica como lo son: turbinas, generadores, transformadores, entre otros [1].

Esta actividad de generación de energía eléctrica puede proveerse de distintas formas como: hidráulica, solar, eólica, térmica, nuclear entre otras, en la Figura 1.1 se indica el esquema de una central de generación hidroeléctrica donde se muestra los componentes de infraestructura y maquinaria necesaria para la generación de energía eléctrica. Todos estos tipos de generación de energía mencionados cuentan con diferentes tecnologías y estructuras de costos y características técnicas [2].



**Figura 1.1.** Esquema de infraestructura y maquinaria de una planta hidroeléctrica [3].

## 1.4.2. Definiciones importantes dentro de la generación eléctrica

### 1.4.2.1. Turbina

Es una máquina motriz la cual capta el movimiento de un tipo de energía primaria y la emite como energía mecánica, esta cuenta con un rotor el cual es el encargado de la conversión de dichas energías [4].

#### **1.4.2.2. Generador**

El generador es parte de los componentes principales de una central de generación, ya que es el encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica, su principio de funcionamiento radica en la inducción electromagnética [5].

#### **1.4.2.3. Potencia Instalada**

Corresponde al sumatorio de la potencia activa nominal con la que cuenta una planta de generación conectado a un sistema eléctrico de potencia.

#### **1.4.2.4. Energía bruta**

La generación de energía bruta es la cantidad de energía total que se produce en los terminales por unidad de generación [6].

#### **1.4.2.5. Energía Neta**

La generación de energía neta es la diferencia que se guarda entre la energía total generada (Energía bruta) y la energía por consumo de servicios auxiliares de la planta de generación eléctrica [6].

#### **1.4.2.6. Servicios Auxiliares**

Estos servicios direccionados a centrales hidroeléctricas son destinados a mantener una condición de funcionamiento normal y establecer un buen servicio de operación que proporciona un funcionamiento adecuado en las instalaciones de la central hidroeléctrica. En otras palabras, los servicios auxiliares vienen a ser la energía consumida y los costos para mantener el funcionamiento de bombas, sistemas de enfriamiento y sistemas de control [7].

Los servicios auxiliares están conformados por los siguientes componentes:

- Protecciones de los circuitos eléctricos dentro de la central.
- Transformadores dentro de la central de generación.
- Servicios que se alimentan con energía AC.
- Servicios que se alimentan con energía DC.

### 1.4.3. Tipos de centrales de generación eléctrica.

En el mundo existe distintos tipos de energía primaria que permiten la generación eléctrica los cuales definen en la siguiente sección [8].

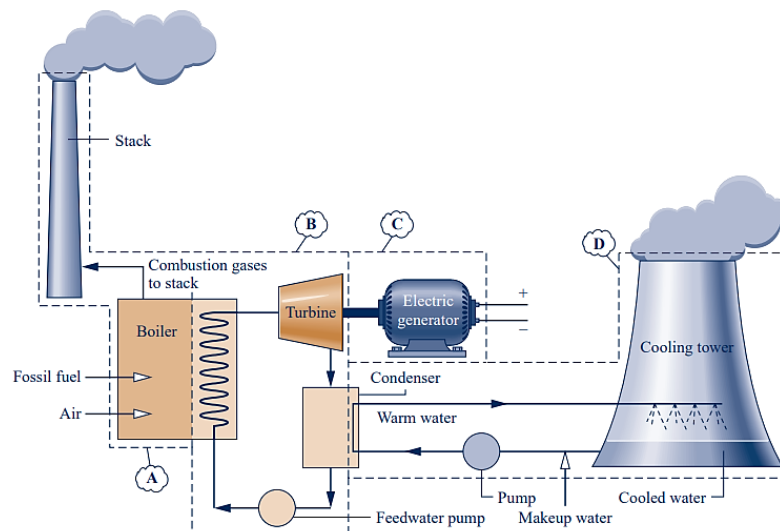
#### 1.4.3.1. Central de generación termoeléctrica o de vapor

Estas centrales de generación utilizan el calor como fuente de energía que proviene de materia prima como: combustibles fósiles, carbono, nuclear y gas natural entre otras; por lo que su principio de funcionamiento se basa en transformar la materia prima en energía térmica con el fin de calentar agua y que esta a su vez se convierta en vapor a alta presión [9].

La generación termoeléctrica puede dividirse en los siguientes sistemas:

##### 1.4.3.1.1. Central termoeléctrica de combustible fósil.

El sistema de generación termoeléctrica a base de combustible fósil se basa en cuatro subsistemas como se indica en la Figura 1.2 donde se los puede identificar con las letras A, B, C, D cada sistema que conforma dicha central de generación [10].



**Figura 1.2.** Planta de generación a base de combustible fósil [10].

La función del subsistema A es suministrar la energía necesaria para transformar de estado líquido a estado gaseoso el agua, este vapor es requerido para la energía de trabajo del

subsistema B, el vapor producido pasa por la turbina donde se expande a una menor presión de esta forma desarrolla la energía mecánica. El subsistema B se encuentra conectado al subsistema C, el cual viene a ser el generador eléctrico mediante un eje de potencia, este subsistema C es el encargado de entregar la energía eléctrica en sus terminales, finalmente en el subsistema D donde el vapor pasa por un condensador el cual cuenta con sistema de tubería de refrigeración para enfriar el vapor a altas temperaturas [10].

#### 1.4.3.1.2. Central termoeléctrica nuclear

El principio de funcionamiento de este tipo de central es similar a la de combustible fósil con la diferencia de que la energía primaria para la generación de energía térmica es la fisión nuclear es por ello que emplean reactores, los cuales calientan el agua para generar vapor a alta presión y temperatura [11].

El reactor de agua a presión que se muestra en la Figura 1.3 tiene dos circuitos de agua; un circuito hace circular el agua a través del núcleo del reactor y una caldera dentro de la estructura de contención, esta agua se mantiene bajo presión para que se caliente, pero no hierva. El segundo circuito de agua separado lleva el vapor de la caldera a la turbina [10].

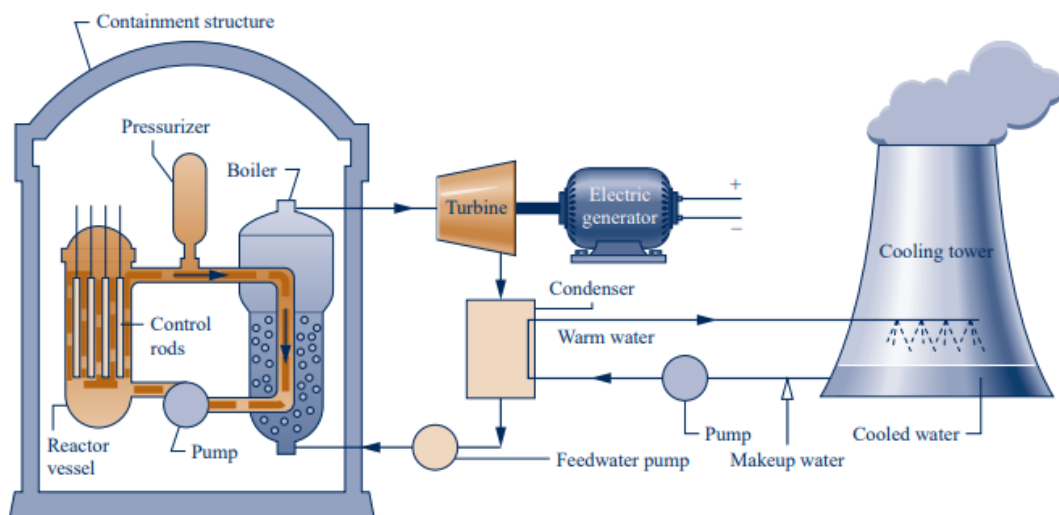


Figura 1.3. Planta de generación de energía nuclear [10].



### 1.4.3.1.3. Central de generación termo solar

Las plantas de energía solar tienen receptores para recolectar y concentrar la radiación solar como se muestra en la Figura 1.4 donde se indica el esquema de funcionamiento de una central de generación termo solar. Una sustancia adecuada, sal fundida o aceite, fluye a través del receptor, donde se calienta, se dirige a un intercambiador de calor interconectado que reemplaza la caldera de las plantas de combustibles fósiles y nucleares; finalmente regresa al receptor la sal o el aceite fundido proporcionando la energía necesaria para vaporizar el agua que fluye en la otra corriente del intercambiador de calor. Este vapor a alta presión y temperatura se pasa a la turbina cumpliendo con el sistema de generación eléctrica mediante vapor [10].

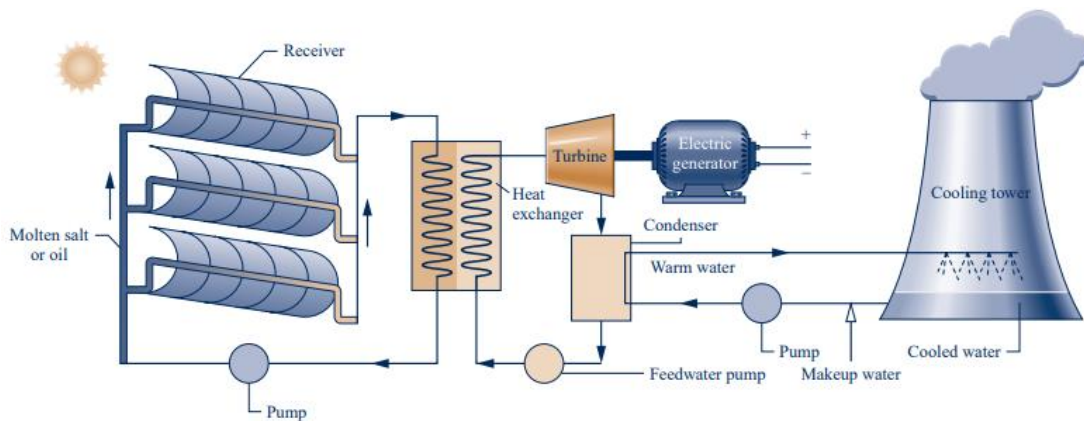
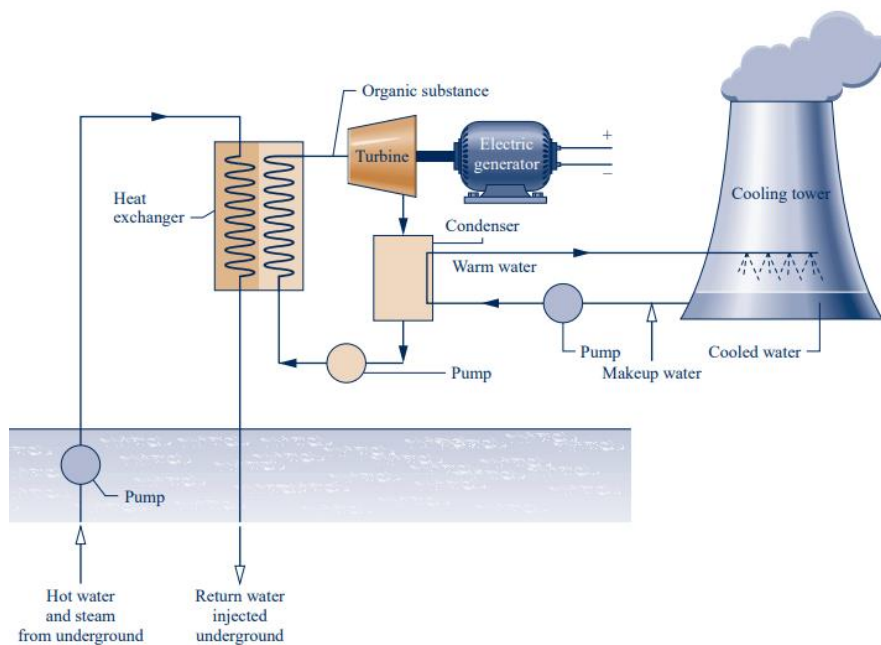


Figura 1.4. Central de generación termo solar [10].

### 1.4.3.1.4. Central de generación de energía geotérmica

El principio de funcionamiento de este tipo de planta de generación se representa en la Figura 1.5 donde se utiliza un intercambiador de calor el cual está interconectado, en este caso, el agua caliente y el vapor de las profundidades de la superficie de la tierra fluyen a un lado del intercambiador de calor, un fluido de trabajo secundario que tiene un punto de ebullición más bajo que el agua (sustancia orgánica) se vaporiza al otro lado del intercambiador de calor por consiguiente el vapor del fluido de trabajo secundario se proporciona a la turbina generando la energía eléctrica [10].



**Figura 1.5.** Planta de generación geotérmica [10].

#### 1.4.4. Central de generación eólica

La generación de energía eólica es de una fuente de energía renovable, este tipo de energía proviene de la fuerza generada por el viento, el principio de funcionamiento de esta generación se basa en aprovechar las corrientes de aire que al chocar con unas palas conectadas a un aerogenerador de esta forma se transforma la energía cinética en energía eléctrica [12].

Este tipo de energía puede ser generada en la superficie terrestre conocido como “onshore” o en la superficie marina conocido como “offshore”, como todo tipo de instalación industrial cuenta con ciertas ventajas y desventajas como se menciona en [12], las cuales son las siguientes:

##### Ventajas

- Es un tipo de energía renovable ya que su fuente primaria de energía es la corriente de viento la cual es una fuente abundante.
- Este tipo de generación eléctrica no contamina ya que la fuente de energía es limpia por lo que en el proceso de generación de energía eléctrica no produce ningún tipo de contaminación.
- El costo de mantenimiento de las turbinas son relativamente bajos comparado a los otros tipos de centrales de generación, mientras el área donde se ubique la planta

eólica cuenta con corrientes de viento constantes y altas el costo por kW generado se reduce considerablemente.

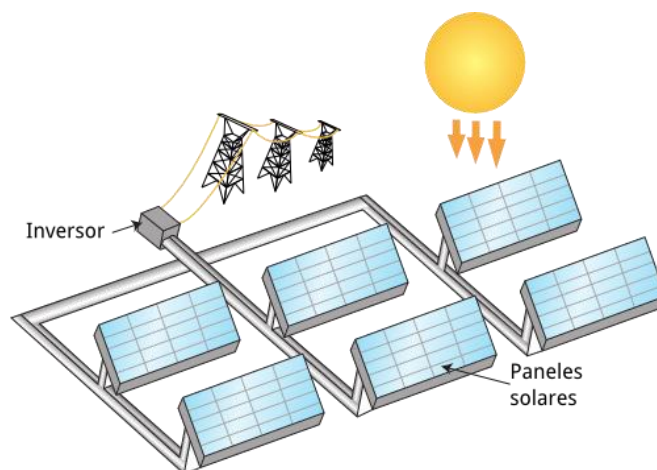
#### Desventajas

- Las centrales de generación eléctrica eólicas no cuentan con un sistema de almacenamiento de energía por lo que la energía generada debe ser consumida al instante.
- Al ser las corrientes de viento la materia prima no se puede garantizar que sean constantes en el tiempo y esto produce que no se pueda implementar en cualquier tipo de zona esta planta de generación, es por ello que se debe realizar un estudio previo donde se pueda tener previsiones de que exista flujo de aire.

#### 1.4.5. Central de generación solar fotovoltaica

Siendo el sol una fuente energía sin costo alguno por su uso esta fuente puede ser aprovechada para la generación de energía eléctrica adicionalmente este tipo de generación no produce ningún tipo de contaminación. El principio de funcionamiento de las centrales de generación solar fotovoltaica es el uso de celdas fotovoltaicas las cuales convierten la radiación del sol en electricidad, este proceso se da gracias a que las celdas fotovoltaicas absorben los fotones emitidos por el sol y liberan electrones lo que a su vez produce una corriente eléctrica [13], [14].

En la Figura 1.6 se puede apreciar un ejemplo de esta central donde la corriente que produce las celdas fotovoltaicas es del tipo DC (corriente continua), es por ello que es necesario que pasen por un inversor que convierta la corriente continua en corriente alterna como se ejemplifica.



**Figura 1.6** Ejemplo de central eléctrica solar [15].

#### 1.4.6. Central de generación mareomotriz

La corriente de agua marina al estar en constante movimiento cuenta con un gran potencial, lo cual puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica mediante el flujo de corrientes marinas, esta generación se la conoce como mareomotriz y es del tipo de energías renovables ya que no producen ningún tipo de contaminación. La energía generada se debe gracias al subir y bajar de la marea lo cual guarda una energía cinética y potencial [16].

El principio de funcionamiento de este tipo de central de generación es similar al de generación eólica ya que se emplean aspas que aprovechan el flujo de la marea para mover una turbina como se aprecia en la Figura 1.7 y de ese modo convertir la energía cinética y potencial en energía mecánica la cual a su vez se convierte en energía eléctrica. Es necesario aclarar que la infraestructura es un dique que almacena el agua donde se produce el movimiento del líquido por efecto de la marea haciendo girar las aspas de las turbinas [17].

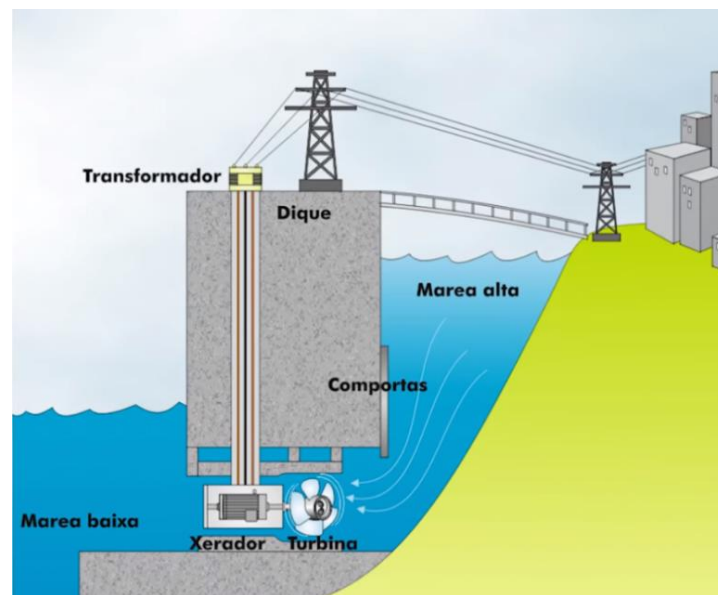


Figura 1.7. Esquema de una central mareomotriz [18].

#### 1.4.7. Central de generación hidroeléctrica

La central de generación hidroeléctrica es un conjunto de elementos y equipos mecánicos y eléctricos que permiten convertir energía primaria en energía eléctrica para su transmisión y distribución con el fin de prestar un servicio a la comunidad. Esta energía primaria como su nombre lo dice proviene de una fuente hídrica que permite aprovechar la

energía potencial la cual se convierte en energía cinética para producir el movimiento de un rotor conectado a un generador que finalmente produce energía eléctrica [19].

La fuente hídrica para la generación de energía se da gracias al aprovechamiento del movimiento del agua lo cual viene a ser la energía cinética, este movimiento proviene de una acumulación de lluvia, deshielo entre otras que usualmente nacen en montañas creando los ríos, ya que la energía que producen los caudales de dichos ríos puede llegar a ser altos y al ser un tipo de recurso renovable puede ser aprovechada mediante la construcción de centrales hidroeléctricas [20].

En cuanto a centrales hidroeléctricas se trata existen 3 tipos de centrales hidroeléctricas las cuales son: Centrales Hidroeléctrica de Pasada, Central Hidroeléctrica de Embalse y Central Hidroeléctrica de Bombeo.

#### **1.4.7.1. Definiciones importantes para centrales de generación hidroeléctrica.**

La presente investigación se centra en las centrales de generación hidroeléctrica por ello es importante considerar definiciones esenciales para comprender el funcionamiento de cada tipo de central de generación.

##### **1.4.7.1.1. Caudal**

Es la cantidad de agua que circula por una red hídrica medida en [m<sup>3</sup>/s]. Al relacionar el caudal con una central hidroeléctrica se deriva definiciones adicionales que deben ser contempladas para comprender el funcionamiento de una central hidroeléctrica, en [21] se menciona las siguientes definiciones:

- Caudal de equipamiento ( $Q_e$ ). – Es el caudal máximo que se puede turbinar expresado en la ecuación 1.1.

$$Q_e = Q_{medio} - Q_{sr} \quad (1.1)$$

- Caudal medio ( $Q_{medio}$ ). – Es el promedio aritmético de los consumos diarios que se registran en un año.
- Caudal de servidumbre ( $Q_{sr}$ ). – Es el caudal que se deja circular por su cauce normal.

- Caudal mínimo turbinable ( $Q_{mt}$ ). – Es el caudal mínimo que se puede turbinar, ya que si el caudal es menor a éste las turbinas trabajan en malas condiciones, el caudal mínimo turbinable esta expresado en la ecuación 1.2.

$$Q_e = k * Q_e \quad (2.2)$$

El factor k expresando en la ecuación 1.2 va a cambiar dependiendo de la turbina empleada en la central hidroeléctrica teniendo los valores presentados en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Factor k de las turbinas en centrales hidroeléctricas en Ecuador [21].

Turbina	K
Pelton	0.10
Francis	0.35
Kaplan	0.22

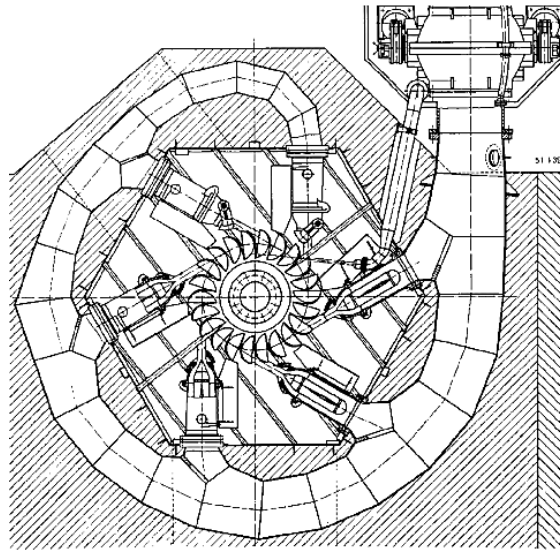
#### 1.4.7.1.2. Salto

La potencia mecánica generada por la turbina de una central hidroeléctrica es proporcional a la diferencia de altura entre el nivel máximo y la casa de máquinas, es por ello que se distinguen tres tipos de saltos al trabajar en centrales hidroeléctricas, en [21] los define de la siguiente forma:

- Salto bruto ( $H_b$ ). – Es la diferencia de altura total entre el nivel superior del caudal con el nivel inferior dependiendo de la turbina.
- Salto útil ( $H_u$ ). – Es la diferencia de altura que existe entre el nivel de la cámara de carga y el nivel de desfogue de agua de la turbina.
- Pérdidas de carga ( $h_p$ ). – Esta variable se define como la pérdida de altura efectiva. ya que existe rozamiento en la tubería de conducción y control del caudal.
- Salto neto ( $H_n$ ). – Es la diferencia entre el salto útil y las pérdidas de carga.

#### 1.4.7.1.3. Turbina Pelton

El funcionamiento de las turbinas Pelton están conformadas por tres componentes principales, la tubería forzada, inyector distribuidor y un rodete lo cual permite que el inyector emita un chorro de agua a presión que incide sobre los álabes del rodete haciéndolo girar. En la Figura 1.8 se indica el esquema de una turbina tipo Pelton con sus componentes [22].

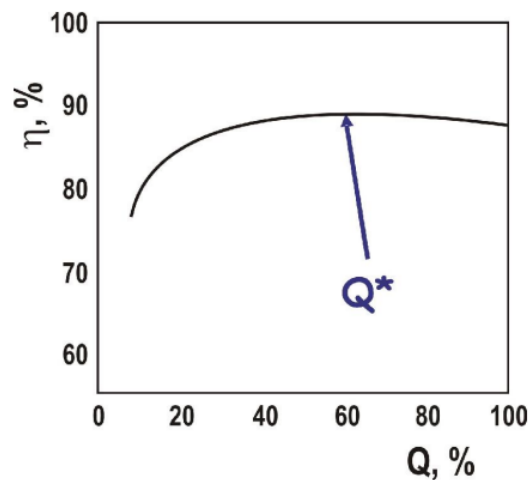


**Figura 1.8.** Esquema general de una turbina Pelton [22].

El flujo de agua que se deriva del caudal ingresa a una tubería forzada la cual converge en forma cónica hacia un inyector, el inyector está constituido por una espiga capaz de moverse axialmente de esta forma se controla el área de paso del chorro hacia la cuchara del rotor, en cuanto ha dicho rotor este cuenta con un disco con cucharas en su borde; de esta forma la energía cinética y potencial que proviene del flujo del chorro hace girar al rotor convirtiendo esta energía primaria a energía mecánica.

Es necesario aclarar que las cucharas del rotor están diseñadas de tal manera que permiten interceptar el chorro de agua suavemente y desviarlo [22].

El diseño de una turbina es específico para cada central hidroeléctrica para poder implementar correctamente dependiendo de la infraestructura y el caudal de equipamiento para el uso de esa turbina, en el caso de las turbinas tipo Pelton su rendimiento se encuentra en función del caudal nominal, en la Figura 1.9 se observa la dependencia de este rendimiento gráficamente, donde al superar el 50% del caudal nominal la eficiencia de la turbina alcanza hasta el 90 % [23].



**Figura 1.9.** Curva de rendimiento vs caudal relativo de una turbina Pelton [23].

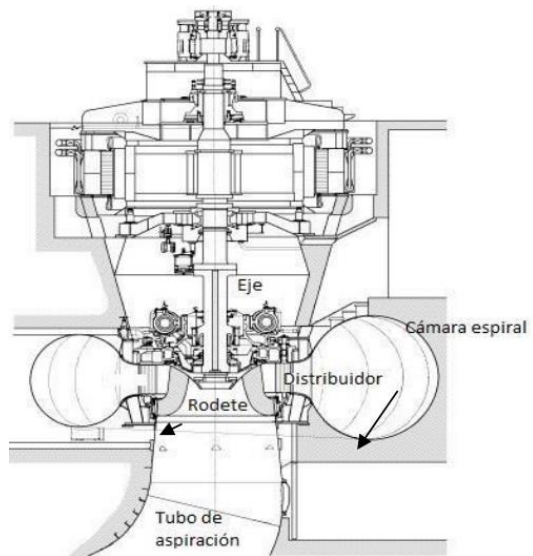
#### 1.4.7.1.4. Turbina Francis

Este tipo de turbina trabaja con flujo interno de agua, por eso su principio de funcionamiento se basa en que el flujo del agua llegue a una cámara espiral mediante la tubería forzada, este flujo de agua llega a una zona de distribución la cual permite el paso del agua al rodete para así mover sus palas en composición radial y axial. Esta turbina la cual se indica en la Figura 1.10 es empleada en varias centrales hidroeléctricas ya que se puede ajustar a todo tipo de salto y caudales [24].

En [25] describe los componentes principales de esta turbina los cuales son:

- Tubería forzada. – Conducto por el cual ingresa parte del caudal del río hacia la máquina generando una gran cantidad de energía cinética y potencial.
- Cámara espiral. – Es un conducto con forma espiral el cual se conecta con la tubería forzada, esta cámara va reduciendo su diámetro para elevar la energía cinética del flujo del agua dirigiéndola al distribuidor.
- Distribuidor. – Está constituido por un conjunto de álabes en forma circular, estos permiten guiar el flujo del agua hacia el rodete mediante una regulación de dicho caudal.
- Rodete. – Es el componente principal de la turbina, esta pieza mecánica está conformada por álabes los cuales captan el flujo del agua y giran convirtiendo la energía cinética en energía mecánica.



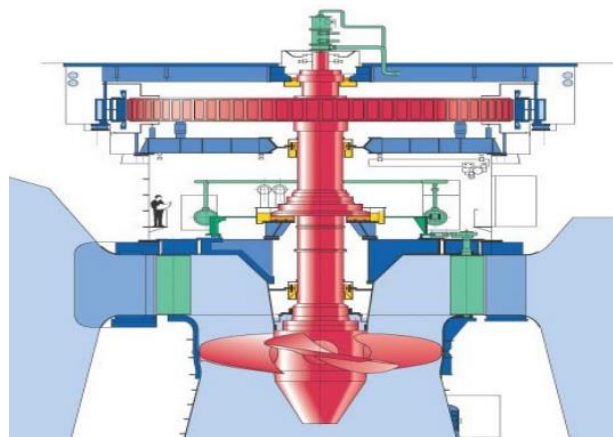


**Figura 1.10** Esquema de una turbina tipo Francis [25].

#### 1.4.7.1.5. Turbina Kaplan

Este tipo de turbina cuenta con un flujo axial, en la Figura 1.11 se indica su disposición la cual está constituida por álabes con forma de hélices los cuales son regulables; su construcción es en forma vertical y están diseñadas para caudales grandes comúnmente para saltos no mayores a los 50 metros, el principio de funcionamiento de estas turbinas se base en aprovechar el flujo del agua haciendo que los álabes giren en sentido interno [26].

Dentro de las componentes de esta turbina se cuenta con un sistema de doble regulación, el cual consta con paletas regulables permitiendo que el rendimiento de esta turbina pueda alcanzar un 90% [27].



**Figura. 1.11.** Esquema y componentes de una turbina Kaplan [27].

Finalmente es necesario aclarar que estas turbinas son empleadas en función del tipo de caudal y el salto con el que cuenta la infraestructura de la central hidroeléctrica, esta puede ser representada mediante un gráfico Salto vs Caudal como se indica en la Figura 1.12 la cual indica que dependiendo del caudal de equipamiento y el salto que tenga dicha central se tendrá una turbina diferente de tal manera que se puede obtener la mejor eficiencia ante su uso.

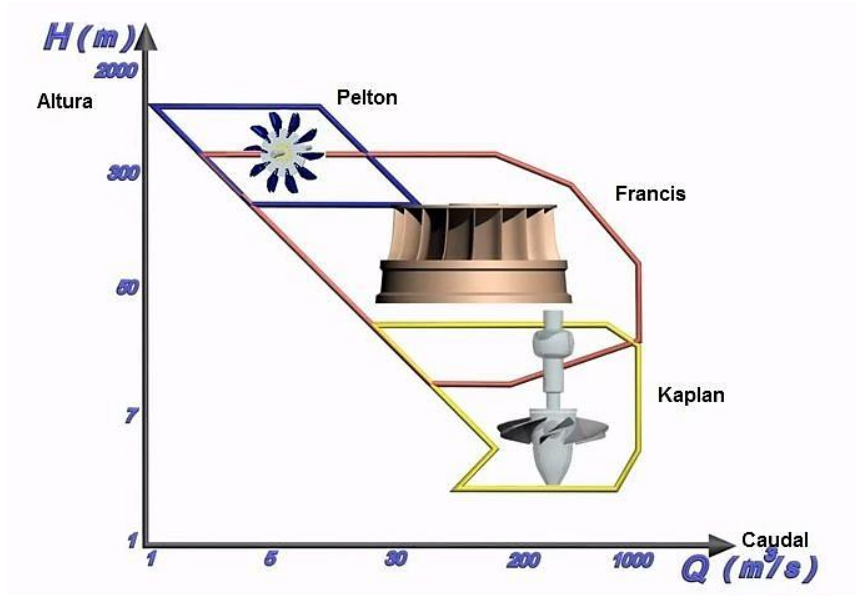
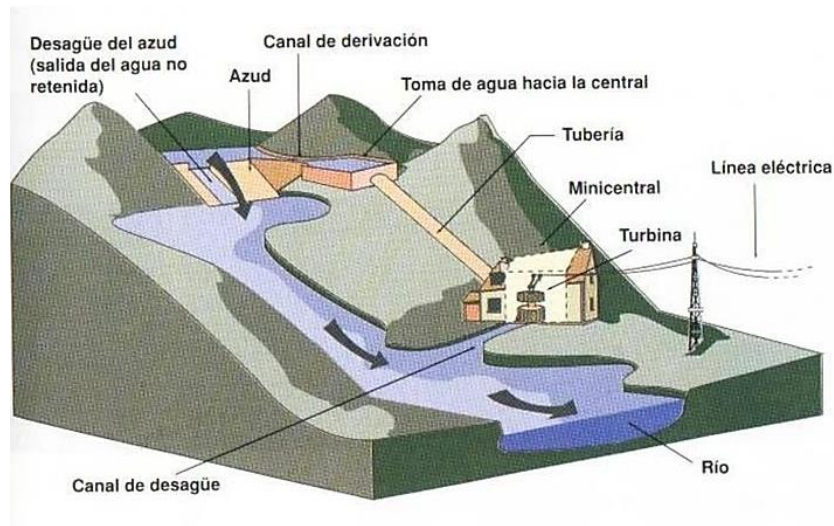


Figura 1.12. Curva de salto vs caudal para diferentes tipos de turbina [28].

#### 1.4.7.2. Central hidroeléctrica de pasada

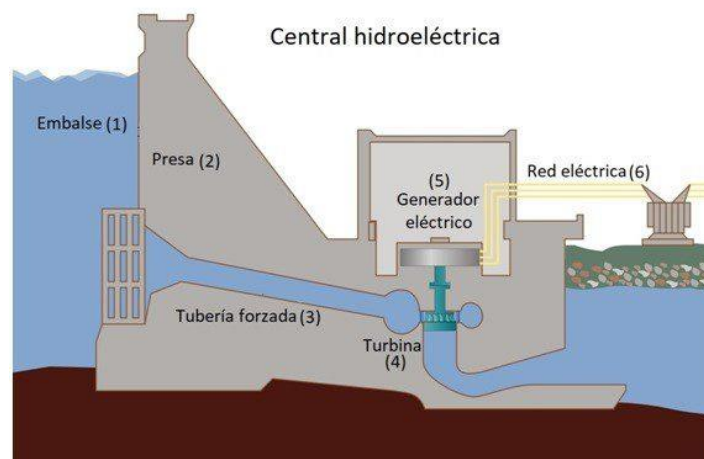
También conocida como central hidroeléctrica de agua fluvente, este tipo de central de generación aprovecha la velocidad con la que cuenta un caudal de río que a su vez tiene niveles de altura diferente, la central de generación se construye de tal manera que cuenta con un canal que deriva el agua del caudal fluvente, esta derivación puede contar con la ayuda de tuberías forzadas hasta llegar a la casa de máquinas que es donde se encuentran las turbinas, en la Figura 1.13 se indica un ejemplo del esquema de una central hidroeléctrica de pasada [20].



**Figura 1.13** Esquema de una central de generación hidroeléctrica de pasada [20].

### 1.4.7.3. Central hidroeléctrica de embalse

Son las centrales donde su tipo de aprovechamiento hídrico se da mediante el almacenamiento de agua proveniente de los caudales de un río, este almacenamiento se produce gracias a la construcción de una presa o embalse, dichos embalses permiten crear un desnivel y separar con una diferencia de altura el agua de la turbina y al igual que en la central de agua fluyente utilizan tubería forzada para conducir el recurso hídrico hacia la turbina conectada al generador, en la Figura 1.14 se indica un ejemplo de una central de embalse y sus principales componentes descritos previamente para su funcionamiento apropiado. [29].



**Figura 1.14** Esquema de una central de generación hidroeléctrica de embalse (Dominio público).

#### 1.4.8. Central hidroeléctrica de bombeo

Este tipo de centrales cuentan con dos embalses ubicados estratégicamente a diferente nivel, en la Figura 1.15 se indica como está dispuesto dicho desnivel. El principio de funcionamiento de este tipo de central es aprovechar el agua del embalse del nivel superior para la generación de energía, el agua turbinada se embalsa en una reserva ubicada en el nivel inferior la cual es bombeada por motores hacia el nivel superior cuando hay poca demanda energética de esta forma se reinicia el ciclo productivo de este tipo de central [30].

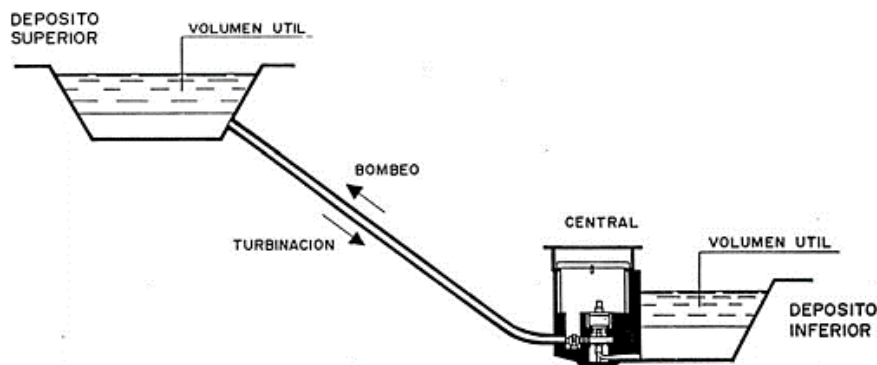


Figura 1.15 Esquema de una central de generación hidroeléctrica de bombeo [30].

#### 1.4.9. Costos de producción de energía eléctrica

El concepto general para los costos se lo define como un valor económico que tiene como fin adquirir un bien o servicio, mientras que el costo de producción es un valor económico de un grupo de bienes y acciones que se ha incurrido los cuales deben ser consumidos por la planta para poder entregar en condiciones de consumo el producto terminado.

Entre los principales objetivos del estudio de costos se tiene:

- Determinar una base sólida para establecer los precios de venta.
- Determinar las políticas para la comercialización del producto terminado.
- Monitorear la eficiencia de las operaciones de la planta.
- Gestionar de manera correcta el planeamiento y control de la empresa.

Al hablar de plantas de generación hidroeléctrica los costos pueden ser clasificados en costos fijos y costos variables, es de suma importancia comprender cuales son los componentes que conforman dichos costos con el fin de preparar un presupuesto para la operación y manejo correcto de la planta [31].

#### **1.4.9.1. Costos fijos**

En términos generales los costos fijos son aquellos gastos que permanecen constantes durante un ciclo relevante de actividad y son independientes del nivel de operación, en otras palabras, son los costos que deben ser cancelados sin importar la cantidad de producto terminado [32].

Se define como costo fijo ya que se mantienen constante en un plazo de tiempo a diferentes cantidades de producción, por lo que estos cubren costos como: salarios de personal administrativo y ejecutivo, alquileres de inmuebles, maquinaria, impuestos, equipo y seguros.

Para las centrales de generación hidroeléctrica el valor de los costos fijos se determina en función del tipo central, tipo de equipamiento y la potencia de dicha central, bajo este criterio se puede relacionar los costos fijos con la potencia instalada mas no con el nivel de producción.

Es necesario aclarar que los costos fijos si pueden cambiar si se llegase a modificar la capacidad de producción lo cual comúnmente se efectúa en un periodo de largo tiempo, entonces el término costo fijo se lo debe establecer para periodos relativamente cortos [31].

##### **1.4.9.1.1. Distribución de los costos fijos para centrales de generación hidroeléctrica**

Dentro de las centrales hidroeléctricas los costos fijos se clasifican de la siguiente manera:

- Inversión inicial. – Esta hace referencia a los costos iniciales de implementación de la central de generación, la inversión varía según el tipo de tecnología utilizada [33].
- Impuestos y Gastos legales. – Los impuestos son atribuidos al valor que requiere el estado de su contribuyente, se dividen en: impuesto municipal, impuesto predial, impuesto a la circulación de capital y contribuciones especiales. Por otro lado, los gastos legales se refieren son los costos atribuidos a seguros para protección en caso de daños en la central hidroeléctrica [31].
- Costos administrativos. – Como su nombre lo dice son los gastos que pertenecen a la gestión, dirección y la organización para realizar una correcta administración, estos siempre deben ser pagados durante la actividad de la central hidroeléctrica [34].

- Costos fijos de operación y mantenimiento: Estos son atribuidos a los costos para materiales y mano de obra ya previstos independiente de la producción de energía eléctrica, dentro de estos se contempla mantenimiento preventivo y correctivo [35].
- Costos ambientales. – Finalmente, estos costos se designan para no generar un impacto ambiental negativo en los proyectos hidroeléctricos, esto abarca tanto al impacto en el medio ambiente como lo es: la flora, fauna y agua. Adicionalmente este costo implica el impacto a la población en cuanto a agricultura, vías terrestres o cualquier otro aspecto que modifique de forma negativa la actividad económica; por lo que en términos generales este impacto ambiental se da cuando la central hidroeléctrica se empieza a construir entonces este costo se genera para la adaptación y reasentamiento de las condiciones socioeconómicas afectadas [31].

#### **1.4.9.2. Costos variables**

Los costos variables en términos generales son aquellos costos que pueden aumentar o disminuir su valor monetario en función de la cantidad de producción, por lo que son necesarios para el funcionamiento de la infraestructura [36].

#### **1.4.10. Costos variables de producción de centrales de generación hidroeléctrica**

Para las centrales de generación hidroeléctrica los costos variables de producción están directamente relacionados con los costos necesarios para mantener en marcha la central y generar X cantidad de energía eléctrica, es necesario mencionar que al hablar de centrales eléctricas los costos variables de producción pueden ser reconocidos como US\$/MWh.

Esta investigación se centra en los CVP para centrales hidroeléctricas del Ecuador, por lo que se toma como base general la última resolución del Nro. ARCERNNR – 004/20 para el desarrollo de la metodología propuesta en esta investigación. Los componentes, factores y metodología desarrollada se describen en las siguientes secciones.

#### 1.4.11. Regulación Nro. ARCERNNR – 004/20 Para el cálculo de costo variable de producción de centrales hidroeléctricas en Ecuador

En la actual Regulación Nro. ARCERNNR – 004/20 publicada en el año del 2022 la Agencia definió una metodología que permite determinar el costo variable de producción para centrales hidroeléctricas.

“En Ecuador el 16 de enero del 2015 empezó a regir el reglamento a la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica el cual en su Disposición Transitoria Sexta se estableció que para el proceso de despacho económico y liquidación de transacciones comerciales que el costo variable de producción para la generación Hidroeléctrica es de 2 US\$/MWh, hasta que la ARCERNNR (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables) establezca en una regulación una metodología de cálculo adecuada” [37].

En el informe de sustento [37] de la ARCERNNR menciona que en base a los criterios de CELEC EP se define un cálculo para los CVP de las centrales hidroeléctricas el cual este compuesto por los siguientes componentes:

- **Costos del agua turbinada para generación**

$$C_A = \frac{X * Vol}{GB} \quad (1.3)$$

Donde:

**X:** Tarifa de uso y aprovechamiento del agua para hidroelectricidad, determinado por la Autoridad Ambiental y del Agua, en [US\$/m<sup>3</sup>].

**Vol:** Corresponde a un % del total del caudal autorizado, determinado considerando técnicamente el volumen turbinado, en m<sup>3</sup>.

**GB:** Generación bruta estimada durante el ciclo operativo [kWh].

- **Costos de lubricantes, químicos y otros**

$$C_{LQI} = \frac{\sum(PU_i * MC_i)}{GB} \quad (1.4)$$

Donde:

**C<sub>LQI</sub>:** Costo unitario de lubricantes, químicos y otros, [US\$/kWh].

**PU<sub>i</sub>:** Precio unitario del insumo “i” para el mes de la declaración, [US\$].

**MC<sub>i</sub>:** Consumo del insumo “i” durante el ciclo operativo.

**GB:** Generación bruta estimada para un ciclo operativo, [kWh]

- **Costos de energía eléctrica para servicios auxiliares**

$$C_{EE} = \frac{(CA + C_{LQI})}{\left(1 - \frac{CE_{AX}}{GB}\right)} * \frac{CE_{AX}}{GB} \quad (1.5)$$

Donde:

**C<sub>EE</sub>**: Costo de energía eléctrica para servicios auxiliares en [US\$/kWh].

**C<sub>E<sub>AX</sub></sub>**: Pertenece al consumo de energía para servicios de la planta de generación conocido como servicios auxiliares en [kWh].

## 2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta ha sido desarrollada en base a los diferentes criterios técnicos encontrados en varias bibliografías, y la metodología propuesta por la ARCERNNR, es necesario aclarar que la metodología propuesta ha considerado los factores más importantes encontrados en dichas bibliografías.

### 2.1. Consideraciones

Se ha descartado una metodología estocástica en base a la calidad del agua debido al grado de dificultad del estudio y la carencia de datos que se requiere para que se pueda contemplar dicha metodología.

Las centrales hidroeléctricas que empiezan su funcionamiento al no tener costos de combustibles su mayor gasto se da en mantener la operación y un buen mantenimiento de la central, por lo que en general se suele considerar como costos variables los costos de operación y mantenimiento que en base a lo investigado se obtiene mediante un porcentaje de la inversión por potencia instalada.

Por ejemplo, la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) mediante una investigación examinó los componentes de costos fijos y variables de la generación hidroeléctrica y detalla que para centrales convencionales cercanas a 500 MW de potencia instalada los costos variables serán considerados como operación y mantenimiento de la central hidroeléctrica dando un costo general de 3 US\$/MWh [38].

Por otro lado, en un estudio realizado en Irán publicó la investigación en la revista Renewable Energy Organization of Iran en el 2018 una tabla de CVP para centrales hidroeléctricas donde se determina el valor mediante la aplicación del LCOE (Levelized Costs of Energy) los cuales son:



Para centrales de generación hidroeléctrica grandes se tiene un valor de 2 c€/kWh, lo que en centavos de dólar es 2,18 cUS\$/kWh mientras que, para centrales de generación hidroeléctrica pequeñas se tiene un valor de 1,09 -1,6 cUS\$/kWh [39].

Es necesario mencionar que es poco eficiente tomar valores ya establecidos para el cálculo de los CVP ya que también dependerá de la tecnología y el tamaño de la central hidroeléctrica, por esa razón se propone una metodología que se adapte al parque generador eléctrico del Ecuador.

## **2.2. Componentes propuestos para el cálculo de los CVP de centrales hidroeléctricas de Ecuador.**

En base a lo descrito en las secciones anteriores se proponen los siguientes componentes que conforman los CVP, estos componentes dan como resultado una ecuación final que permite determina dichos costos.

- Costos del uso de agua
- Costos de O&M
- Costos por servicios auxiliares

De tal manera que el cálculo de los CVP para centrales hidroeléctricas propuesto se describe en la ecuación 2.1.

$$CVP = C_{agua} + C_{SA} + C_{O\&M} \left[ \frac{US\$}{MWh} \right] \quad (2.1)$$

## **2.3. Cálculo del costo del agua**

Este costo se incluye en la metodología ya que en Ecuador se encuentra vigente el Acuerdo Ministerial Nro. 2017-0010 del 2017 emitido por la Secretaría del Agua, el cual en su Art. 2 aprueba el cálculo para la tarifa referencial por aprovechamiento de agua cruda para hidroelectricidad con un valor de 0,0049 [US\$/m<sup>3</sup>], adicionalmente se cuenta con el Art. 4 el cual dicta que “La tarifa establecida para el aprovechamiento hidroeléctrico, se aplicará al 6% del total del caudal autorizado, dado que ha sido determinada considerando técnicamente el volumen turbinado” [40].

### 2.3.1. Descripción de la metodología propuesta para el cálculo de costos por uso de agua.

El cálculo de este costo debe dar como resultado un valor en US\$/MWh, por lo que se emplea las tarifas de aprovechamiento del agua relacionado con la generación bruta de la central hidroeléctrica de la siguiente manera:

$$C_{agua} = \frac{X * Vol}{Potencia\ bruta * t} \left[ \frac{US\$}{MWh} \right] \quad (2.2)$$

Donde:

- **X:** Tarifa de uso y aprovechamiento del agua para hidroelectricidad actualmente el valor es de 0,0049 [UD\$/m<sup>3</sup>].
- **Vol:** Es el 6% del caudal autorizado para el aprovechamiento del agua para el aprovechamiento hidroeléctrico [m<sup>3</sup>].
- **t:** Es el tiempo en horas del ciclo operativo [horas].

En cuanto a centrales hidroeléctricas se trata, es posible determinar la potencia bruta producida por la turbina, en [29] la definen mediante la ecuación 2.3.

$$Potencia\ bruta = \gamma * H_n * Q_e * n_t [MW] \quad (3.3)$$

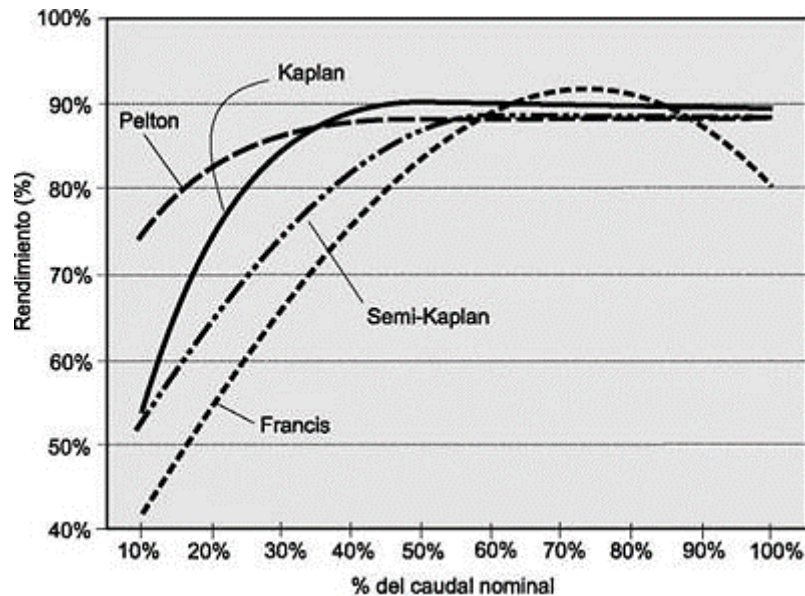
Donde:

- **$\gamma$ :** Es el peso específico del agua que equivale a 9,81 [kN/m<sup>2</sup>].
- **$H_n$ :** Es el salto neto que es la diferencia entre el salto total existente o salto bruto y las pérdidas de carga [m].
- **$Q_e$ :** Caudal de equipamiento [m<sup>3</sup>/s], se refiere al caudal máximo que se puede turbinar y resulta de la diferencia entre el Caudal medio y el Caudal de servidumbre.
- **$n_t$ :** Rendimiento de la turbina [p.u].

Reemplazando la ecuación 2.3 en 2.2 se obtiene la ecuación 2.4 correspondiente al costo variable de producción debido al uso del agua:

$$C_{agua} = \frac{X * Vol}{\gamma * H_n * Q_e * n_t * t} \left[ \frac{US\$}{MWh} \right] \quad (2.4)$$

El rendimiento de la turbina puede ser determinado mediante una gráfica que permite establecer un valor en función del porcentaje del caudal nominal. En la Figura 2.1 se indica la variación del rendimiento vs el caudal nominal de los diferentes tipos de turbinas utilizadas en Ecuador.



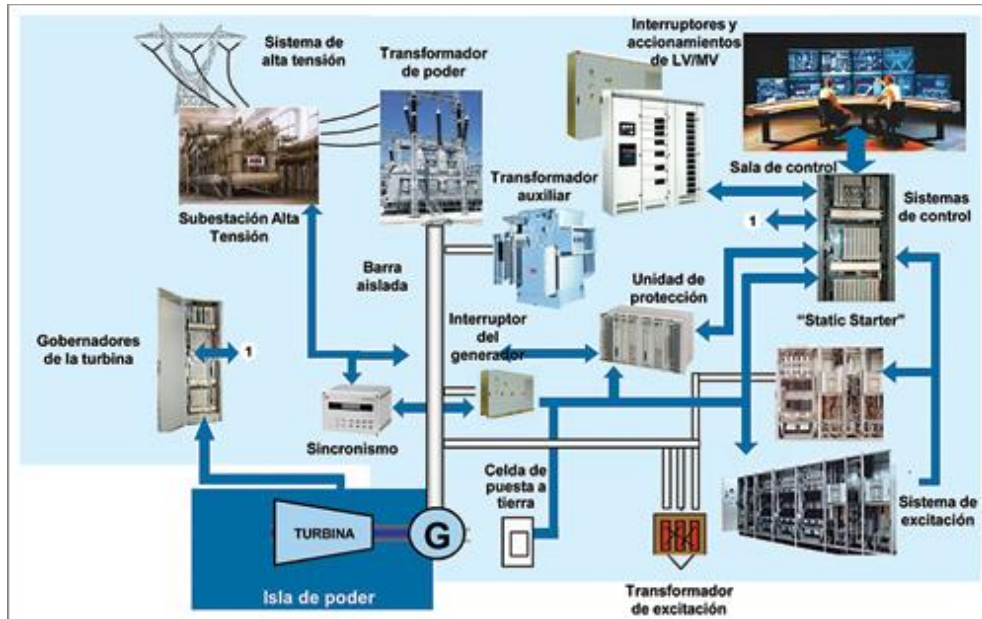
**Figura 2.1.** Rendimiento vs caudal nominal de turbinas empleadas en hidroeléctricas en Ecuador [41].

Para una turbina tipo Pelton la curva indica que para un 20% del caudal nominal el rendimiento será mayor al 80%, mientras que para una turbina tipo Francis para un caudal mayor al 50% del nominal el rendimiento será aceptable logrando llegar hasta un 90% de rendimiento, pero en el caso de ser inferior al 50% del caudal nominal el rendimiento no es aceptado para la generación de energía eléctrica ya que deben presentar un valor rendimiento mayor al 80% [41].

## 2.4. Cálculo de costos por servicios auxiliares

Como se menciona previamente la energía por servicios auxiliares es una parte fundamental de las centrales de generación eléctrica puesto que permite una operación confiable, a su vez se toma en cuenta como un costo variable ya que a mayor producción de energía eléctrica mayor será el consumo por estos servicios, como lo son el control de: sistemas de lubricación, refrigeración, sistema de protecciones eléctricas, consumo de energía del personal en la planta entre otros.

En la figura 2.2 se puede ejemplificar el sistema que cubre el consumo de energía para los servicios auxiliares, estos servicios en palabras simplificadas cubren toda la energía que se utiliza dentro de la central y la subestación [42].



**Figura 2.2** Esquema de consumo de energía por servicios auxiliares [43].

Por la consideración descrita previamente y según el informe de sustento ARCERNR-024 los servicios auxiliares conllevan las “Liquidaciones que se desprenden de las transacciones de corto plazo que efectuará el CENACE para la energía suministrada desde la red de transmisión o distribución para abastecer los consumos de servicios auxiliares de Generadores y Auto productores “ [37].

#### **2.4.1. Descripción de la metodología propuesta para el cálculo de Costos por Servicios Auxiliares.**

Para el cálculo de S.A. se toma como base la experiencia empírica de los gerentes de centrales hidroeléctricas en Ecuador los cuales nos brindaron la información para poder plantear la siguiente ecuación:

$$C_{SA} = \%S.A * CMG * \frac{Gb}{Gn} \left[ \frac{US\$}{MWh} \right] \quad (2.5)$$

Donde:

- **C<sub>SA</sub>**: Costo por el uso de energía para servicios auxiliares en generación hidroeléctrica [US\$/MWh].
- **% S.A**: Se refiere al porcentaje de energía usada para servicios auxiliares, este dato que se obtuvo de investigar y charlar con los gerentes de centrales hidroeléctricas de Ecuador, los cuales en forma resumida expresaron que los servicios auxiliares consumen en promedio en un rango de 0,3% a 0,7 % de la generación bruta.
- **CMG**: En el Informe Técnico – Económico aprobado con resolución Nro. ARCERNNR 033/2020 menciona que:

“El componente de Costo Medio de Generación se calcula como el promedio ponderado, durante el período del estudio, de la suma de los costos fijos y variables de generación; y de la energía en bornes de generación, resultado de una simulación de despacho óptimo de las centrales de generación. Como parte del cálculo del CMG se determina la anualidad de los costos fijos aprobados por la ARCERNNR, así como, los costos variables de acuerdo a la tecnología de cada central, para el caso de las empresas públicas; o la modalidad para las transacciones, en el caso de las empresas privadas que suscriban contratos regulados con la demanda” [44].

Como resultado del estudio realizado por el ARCERNNR se determina que el costo medio de generación es de 33,6 [US\$/MWh].

- **G<sub>b</sub>**: Generación bruta del ciclo operativo en [MWh].
- **G<sub>n</sub>**: Generación neta del ciclo operativo en [MWh].

## 2.5. Cálculo de costos de operación y mantenimiento

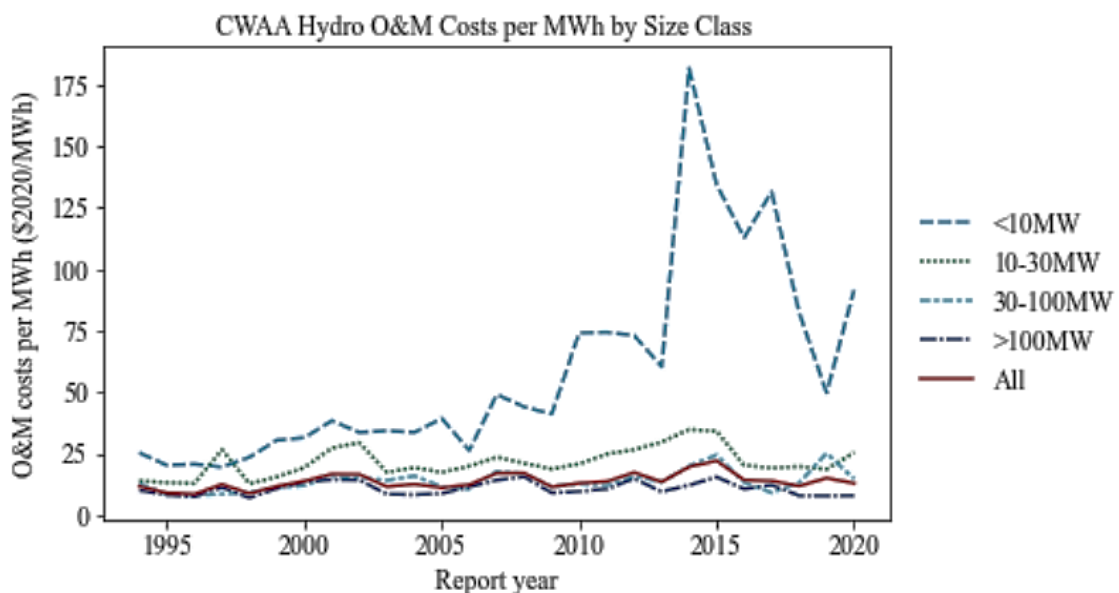
Finalmente, el último componente de la metodología propuesta es el más complicado de desglosar puesto que en varias bibliografías lo manejan como un costo fijo mientras que en otras como un costo variable. Dado esto se concluye que las centrales de generación hidroeléctrica cuentan con ambos tipos de costos: fijos y variables por lo cual la presente investigación desglosa los componentes que conforman estos costos y separa los fijos de los variables.

### 2.5.1. Descripción de la metodología propuesta para el cálculo de costos por operación y mantenimiento

Para el análisis de este componente se investigó en base a los datos dados de la Federal Energy Regulatory Commission (FERC), el cual es un informe publicado en febrero del 2022 del análisis de costos de operación y mantenimiento de las centrales hidroeléctricas de Estados Unidos de América, este es el reporte más actual encontrado para la presente investigación en donde se centran en un estudio de estos costos para futuras inversiones y toma de decisiones respecto a centrales hidroeléctricas.

Este informe presenta un estudio de costos fijos y variables de operación y mantenimiento desde el año de 1995 hasta el 2020 los cuales se obtiene de una base de datos de diferentes compañías de generación hidroeléctrica de, dicha base datos se encuentra publicada en la página de FERC [45].

De la Figura 2.3 brindada por el informe de FERC se obtiene como varían con el tiempo los costos de O&M para centrales hidroeléctricas de diferentes potencia y tecnología como se puede observar los costos de operación y mantenimiento son mayores cuando la central hidroeléctrica es de menor potencia instalada, mientras que al ir creciendo la potencia instalada dichos costos se reducen.



**Figura 2.3.** Costos de O&M por MWh para centrales hidroeléctricas de diferente potencia [46].

Para el desarrollo de este componente se analizó la base de datos que ofrece esta institución, obteniendo los costos de operación y mantenimiento totales, en donde los

componentes que se consideran en el cálculo de los costos de operación y mantenimiento de una central hidroeléctrica han sido tomados del Formulario No. 1 dado por [46], el mismo que presenta el informe financiero y operativo integral presentado para la regulación de la tarifa eléctrica y las auditorías financieras en Estados Unidos.

Factores que comprende el componente para Operación:

- Supervisión de Operación e Ingeniería
- Gastos Hidráulicos
- Gatos Eléctricos
- Gastos Misceláneos de Generación de Energía Hidráulica
- Rentas

Factores que comprende el componente para el Mantenimiento:

- Supervisión e Ingeniería de Mantenimiento
- Mantenimiento de las estructuras
- Mantenimiento de Embalses, Presas y vías fluviales
- Mantenimiento de la Planta Eléctrica
- Mantenimientos misceláneos de la planta hidráulica

De los factores dados para los costos de O&M se selecciona los que pertenecen a los costos fijos, para realizar una sustracción y separarlos y así obtener únicamente los costos variables. Estos componentes fijos son tomados de la bibliografía [47], la cual establece que son:

- Cuotas administrativas
- Mano de obra administrativa
- Seguros
- Pago de arrendamiento de terrenos
- Cuotas legales
- Mano de obra operativa
- Impuestos de propiedad
- Seguridad en sitio
- Impuestos
- Gestión de proyectos
- Reemplazo de rodamientos
- Reparación de daños por cavitación
- Rebobinado del estator

A su vez establece una metodología para calcular los costos fijos la cual es el resultado de un estudio estadístico según [47], la misma que ha sido tomada para esta investigación siendo descrita en la ecuación 2.6.

$$CF_{O\&M} = 227 * P^{0,547} \left[ \frac{US\$}{kW} \right] \quad (2.6)$$

Donde:

- **CF<sub>O&M</sub>**: Son los costos fijos de operación y mantenimiento en [US\$]
- **P**: Es la potencia instalada de la central hidroeléctrica

En la tabla 2.1 se indica las plantas de generación tomadas de la base de datos de Estados Unidos de América donde se indica la potencia instalada, la energía generada y los costos de O&M para un ciclo operativo de un año.

**Tabla 2.1** Base de Datos de un año operativo de las plantas hidroeléctricas de Estados Unidos de América.

Nombre de la Planta de Generación Hidroeléctrica	Potencia Instalada [MW]	Energía Generada [MWh]	Costos O&M total [\$]
Alabama Power Company	697,14	5531100	41750096
Allete Inc	90,6	546847	4522470
Alaska Electric Light and Power Company	14,3	127491	1781776
Appalachian Power Company	115	831452	17391495
Avista Corporation	901,1	3650548	33476634
Central Hudson Gas & Electric Corporation	14,4	68000	868315
Catalyst Old River Hydroelectric Limited Partnership	192	1204047	17878925
Chugach Electric Association	66,38	105841	1378552
Consumers Energy Company	50,52	1480037	21330825
Dominion Energy South California	222,18	442530	7187409
Duke Energy Carolinas, LLC	678,33	3016594	34956932
Duke Energy Indiana, LLC	64,8	204671	1645969
Duke Energy Progress, LLC	108,6	879934	5583870
Entergy Arkansas, LLC	65	210389	4556368
Georgia Power Company	315,9	2769468	31922608
Idaho Power Company	629,84	6966848	41870224
Kentucky Utilities Company	33,6	125254	430091
Lockhart Power Company	43,6	153992	2006236



Louisville Gas and Electric Company	100,64	241950	1669337
Wisconsin River Plant	35	222126	2634523
Wisconsin Public Service Corporation	17,1	361379	6201920
Wisconsin Power and Light Company	41,1	242130	2078183
Wisconsin Electric Power Company	32,4	532095	5527632
Virginia Electric and Power Company	315	777530	15313182
Upper Peninsula Power Company	12	156156	2617330
Union Electric Company	396	1889321	13549261
The Empire Distric Electric	16	29194	770634
Puget Sound Energy	196	980194	12740121
Portland General Electric Company	233,25	1204249	18728654
Pacific Gas and Electric Company	1125,49	6285290	188278361
Northern States Power Company (Wisconsin)	62,67	1141789	11831250
Northern States Power Company (Minnesota)	13,89	66864	1227988

Con los datos de la Tabla 2.1 se puede obtener los costos de O&M fijos únicamente, y restarl de los costos de O&M totales como se presenta en la Tabla 2.2 donde se indica los costos totales, fijos y finalmente variables en el ciclo operativo.

**Tabla 2.2.** Costos de O&M variables para un ciclo operativo.

<b>Nombre de la Planta de Generación Hidroeléctrica</b>	<b>Costos O&amp;M total [\$]</b>	<b>Costo de O&amp;M fijo [\$]</b>	<b>Costos de O&amp;M variable [\$]</b>
Alabama Power Company	41750096	815308,365	40934787,6
Allete Inc	4522470	267039,177	4255430,82
Alaska Electric Light and Power Company	1781776	97273,5285	1684502,47
Appalachian Power Company	17391495	304247,891	17087247,1
Avista Corporation	33476634	938181,106	32538452,9
Central Hudson Gas & Electric Corporation	868315	97645,0294	770669,971
Catalyst Old River Hydroelectric Limited Partnership	17878925	402709,272	17476215,7
Chugach Electric Association	1378552	225258,004	1153294
Consumers Energy Company	21330825	194008,298	21136816,7
Dominion Energy South California	7187409	436187,757	6751221,24

Duke Energy Carolinas, Llc	34956932	803200,736	34153731,3
Duke Energy Indiana, LLC	1645969	380877,845	1265091,16
Duke Energy Progress, LLC	5583870	381118,082	5202751,92
Entergy Arkansas, LLC	4556368	222684,23	4333683,77
Georgia Power Company	31922608	528785,457	31393822,5
Idaho Power Company	41870224	771267,085	41098956,9
Kentucky Utilities Company	430091	155214,912	274876,088
Lockhart Power Company	2006236	178988,433	1827247,57
Louisville Gas and Electric Company	1669337	282840,366	1386496,63
Wisconsin River Plant	2634523	158719,789	2475803,21
Wisconsin Public Service Corporation	6201920	107269,123	6094650,88
Wisconsin Power and Light Company	2078183	173299,51	1904883,49
Wisconsin Electric Power Company	5527632	118139,073	5409492,93
Virginia Electric and Power Company	15313182	527960,863	14785221,1
Upper Peninsula Power Company	2617330	88376,7443	2528953,26
Union Electric Company	13549261	481322,443	13067938,6
The Empire Distric Electric	770634	103437,851	667196,149
Puget Sound Energy	12740121	407277,041	12332844
Portland General Electric Company	18728654	193440,446	18535213,6
Pacific Gas and Electric Company	188278361	1059521,4	187218840
Northern States Power Company(wisconsin)	11831250	218281,792	11612968,2
Northern States Power Company (Minnesota)	1227988	95737,9195	1132250,08

Al tener los datos de costos variables de O&M y la energía generada para un ciclo operativo de un año, se puede determinar un rango de costos variables según la potencia instalada, este rango surge de la relación entre la energía generada en el ciclo operativo y los costos variables de O&M para dicho ciclo.

**Tabla 2.3** Costos variables de O&M de la Centrales hidroeléctricas de Estados Unidos de América.

<b>Nombre de la Planta de Generación Hidroeléctrica</b>	<b>Potencia Instalada [MW]</b>	<b>Costos de O&amp;M [\$/MWh]</b>
Upper Peninsula Power Company	12	16,19504
Northern States Power Company (Minnesota)	13,89	16,93363

Alaska Electric Light and Power Company	14,3	13,21272
Central Hudson Gas & Electric Corporation	14,4	11,33338
Wisconsin Public Service Corporation	17,1	16,86498
Wisconsin Electric Power Company	32,4	10,1664
Wisconsin River Plant	35	11,14594
Wisconsin Power And Light Company	41,1	7,867193
Lockhart Power Company	43,6	11,86586
Consumers Energy Company	50,52	14,28128
Northern States Power Company (Wisconsin)	62,67	10,17085
Duke Energy Indiana, Llc	64,8	6,181096
Chugach Electric Association	66,38	10,89648
Allete Inc	90,6	7,781758
Louisville Gas and Electric Company	100,64	5,730509
Duke Energy Progress, Llc	108,6	5,912662
Puget Sound Energy	196	12,58204
Georgia Power Company	315,9	11,33569
Union Electric Company	396	6,916738
Idaho Power Company	629,84	5,899218
Duke Energy Carolinas, Llc	678,33	11,32195
Alabama Power Company	697,14	7,40084
Avista Corporation	901,1	8,913306

Ya que realizar un cuantificación exacta y exclusiva para el cálculo de los costos variable de O&M para cada central hidroeléctrica conlleva una complejidad muy alta porque entre centrales existe variaciones en las condiciones de trabajo como lo son la sedimentación, tipo de lubricantes y las turbinas son diseñadas exclusivamente para cada tipo de central; con los datos de la Tabla 2.3 la metodología propone crear una tabla de referencia para tener un rango de valores de costos variables de O&M según la potencia instalada de la central, esto con el fin de obtener el valor más exacto posible y con la capacidad de ser aplicado a diferentes centrales hidroeléctricas que maneja el Ecuador.

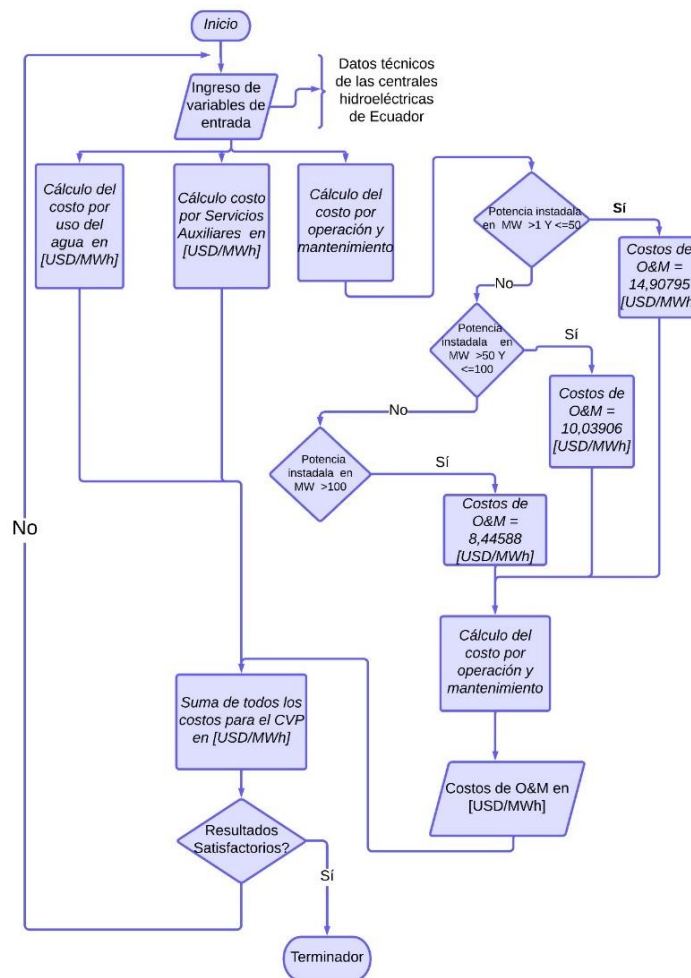
En la Tabla 2.4 se propone dichos rangos de potencia, ya que en Ecuador se trabaja con 3 tipo de centrales en general:

- Centrales pequeñas: Potencia de 10 a 50 [MW]
- Centrales Medianas: Potencia de 50 a 100 [MW]
- Centrales Grandes: Potencia mayor a 100 [MW]

**Tabla 2.4.** Costos de O&M propuestos para diferentes potencias de centrales hidroeléctricas.

	<b>Potencia Instalada [MW]</b>	<b>Costos de O&amp;M [US\$/MWh]</b>	<b>Valor mínimo [US\$/MWh]</b>	<b>Valor máximo [US\$/MWh]</b>
Entre	10 - 50	14,90795073	11,33338192	16,93362767
Entre	50 - 100	10,03965091	6,181096272	14,28127588
Mayor a	100	8,445884009	5,730508923	12,58204392

De esta forma la metodología propuesta se adapta a centrales hidroeléctricas del Ecuador, en la Figura 2.4 se indica el diagrama de flujo correspondiente a la metodología desarrollada la cual está conformada por los componentes propuestos para el cálculo de los CVP.



**Figura 2.4** Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

### **3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO DE CVP DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL ECUADOR**

La metodología propuesta en el capítulo dos describe los factores que componen cada costo que pertenecen a los costos variables de producción para centrales hidroeléctricas de Ecuador; para el cálculo de estos CVP se implementa la metodología desarrollada en una herramienta informática (Excel) de fácil uso y dinámico.

#### **3.1. Descripción de la herramienta informática y su aplicación**

La herramienta informática Excel cuenta con tres pestañas divididas:



- Menú. – En esta pequeña se ingresa los parámetros de entrada de la central hidroeléctrica de la cual se desea calcular el CVP, se cuenta tres botones: uno para el cálculo de los CVP donde los parámetros al ser ingresados correctamente por el usuario los resultados pueden ser agregados a una base de datos mediante el segundo botón. El tercer botón es para limpiar los parámetros ingresados en caso de que el usuario desee realizar otro cálculo. Adicionalmente cuenta con una tabla de valores donde se expresa el valor en [US\$/MWh] para cada componente, así como el valor total de los CVP finalmente esta pestaña indica de manera gráfica cada costo variable y su total para una mejor apreciación. En el Anexo I se indica la composición de esta pestaña.
- CVP: Esta pestaña contiene los componentes de la metodología en forma de cálculo, pues toma los datos ingresados de la pestaña Menú y calcula los costos por uso de agua, costo variable de O&M, y costos por uso de servicios auxiliares, los valores calculados se agregan a la tabla de la pestaña Menú. En el Anexo II se indica la composición de esta pestaña.
- Base de Datos: Esta pestaña permite almacenar tanto los datos ingresados por el usuario como los costos variables de producción calculados para el uso adecuado de ellos, en el Anexo III se indica la composición de esta pestaña.

##### **3.1.1. Variables de entrada y variables de salida**

Es importante definir cuáles son las variables de entrada que el usuario debe ingresar y cuáles son las de salida, como parámetros de entrada se tiene:

- Nombre de la central
- Tipo de central
- Potencia Instalada en [MW]
- Volumen de gua turbinada en [m<sup>3</sup>]
- Salto neto en [m]
- Caudal de equipamiento en [m<sup>3</sup>/s]
- Tipo de turbina
- Rendimiento de la turbina en [pu]
- Tiempo “t” en [horas]
- Generación bruta en [MW]
- Generación Neta en [MW]
- Porcentaje de energía para Servicios Auxiliares
- Costo medio de generación en [US\$/MWh]
- Número de turbinas operando en la central hidroeléctrica

En la Figura 3.1 se indica las variables de entrada que el usuario debe ingresar, estas variables son datos técnicos propios de cada central hidroeléctrica, el volumen de agua turbinada debe ingresarse por cada unidad de generación y en cuanto a rendimiento y porcentaje de energía para servicios auxiliares el usuario debe escoger el valor únicamente con la barra de control que se encuentra debajo de cada nombre respectivamente.

Datos de entrada	
Nombre Central :	
Tipo de Central :	Pasada
Potencia Instalada [MW]:	
Vol [m <sup>3</sup> ]:	
Salto neto [m]:	
Qe[m <sup>3</sup> /s]:	
Tipo de turbina:	
Rendimiento de la turbina [pu]:	0,9
	
t [horas]:	
Generación bruta [MWh]:	
Generación neta [MWh]:	
% De energía para Servicios auxiliares	0,5
	
Costo Medio de Generación [USD/MWh]	33,6
Número de turbinas	2

**Figura 3.1** Variables de entrada para el CVP.

Cada variable de entrada cuenta con sus unidades, es por ello que el usuario debe tomar en cuenta estas unidades para ingresar los parámetros solicitados, en cuanto al rendimiento de la turbina los parámetros están en [pu] y únicamente se puede variar entre 0,8 [pu] a 0,99 [pu], en caso de que el usuario no conozca el rendimiento de la turbina se recomienda asumir 0,9 para este parámetro.

En cuanto al porcentaje de energía para servicios auxiliares se podrá variar en un rango de 0,3% a 0,7% según el consumo de servicios auxiliares, dado el caso de no conocer este dato se recomienda asumir un valor del 0,5%.

Por otro lado, las variables de salida son los costos variables de agua, costos de operación y mantenimiento y costos por servicios auxiliares, estos valores son dados en [US\$/MWh], adicionalmente se genera una gráfica de estos costos para una mejor apreciación.

### **3.2. Cálculo del CVP de centrales hidroeléctrica en Ecuador**

La metodología propuesta se aplica con centrales hidroeléctricas de Ecuador para diferente potencia y tecnología, en el Anexo IV se muestra los datos de diferentes centrales, de las cuales la eficiencia de la turbina se asume un valor de 0,9 [pu], para el porcentaje de servicios auxiliares se asume de 0,5% mientras que el costo medio de generación actual es de 33,6 [US\$/MWh].

### **3.3. Resultados**

A continuación, se indica los resultados para las centrales hidroeléctricas estos resultados se clasifican según su potencia instalada.

#### **3.3.1. Centrales con potencia instalada mayor a 100 [MW]**

- **Central Coca Codo Sinclair**

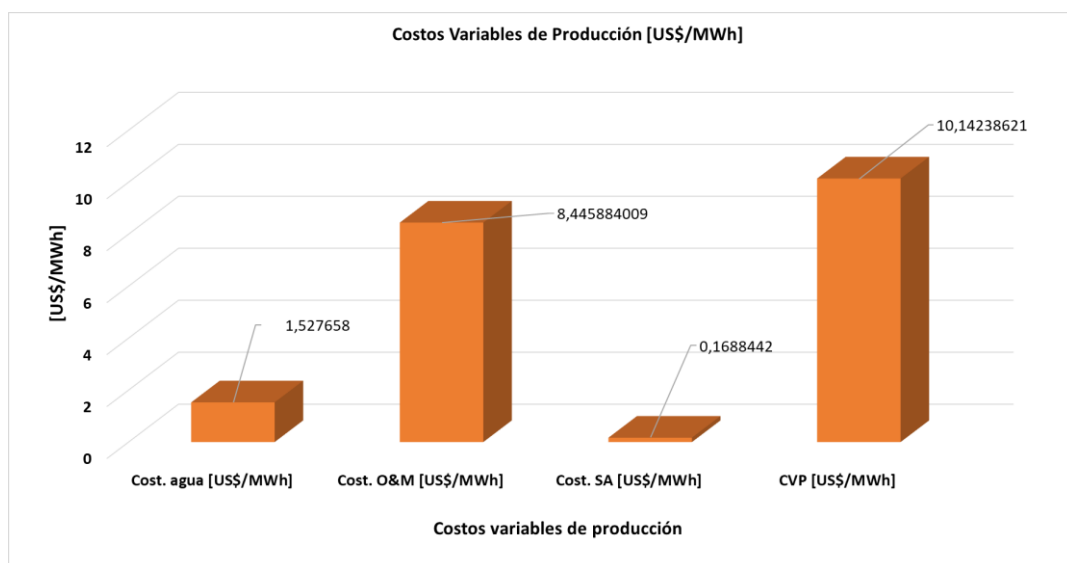
En la Figura 3.2 se muestra cómo se ingresó las variables de entrada de esta central, mientras que en la Tabla 3.1 muestra los resultados del cálculo de cada componente para los costos variables de producción, así como su gráfica respectivamente.

Datos de entrada	
Nombre Central :	Coca Codo Sinclair
Tipo de Central :	Pasada
Potencia Instalada [MW]:	1500
Vol [m <sup>3</sup> ]:	44081632,65
Salto neto [m]:	620
Qe[m <sup>3</sup> /s]:	287
Tipo de turbina:	Kaplan
Rendimiento de la turbina [pu]:	0,9
t [horas]:	720
Generación bruta [MWh]:	1085427
Generación neta [MWh]:	1080000
% De energía para Servicios auxiliares	0,5
Costo Megio de Generación [USD/MWh]	33,6
Número de turbinas	8

**Figura 3.2.** Datos de entrada de la central Coca Codo Sinclair.

**Tabla 3.1.** Resultados de los CVP para la central Coca Codo Sinclair.

Nombre de la central	Tipo de Central	Cost. agua [US\$/MWh]	Cost. O&M [US\$/MWh]	Cost. SA [US\$/MWh]	CVP [US\$/MWh]
Coca Codo Sinclair	Pasada	1,527658	8,445884009	0,1688442	10,142



**Figura 3.3.** CVP para la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair.



- **Central Paute Molino**

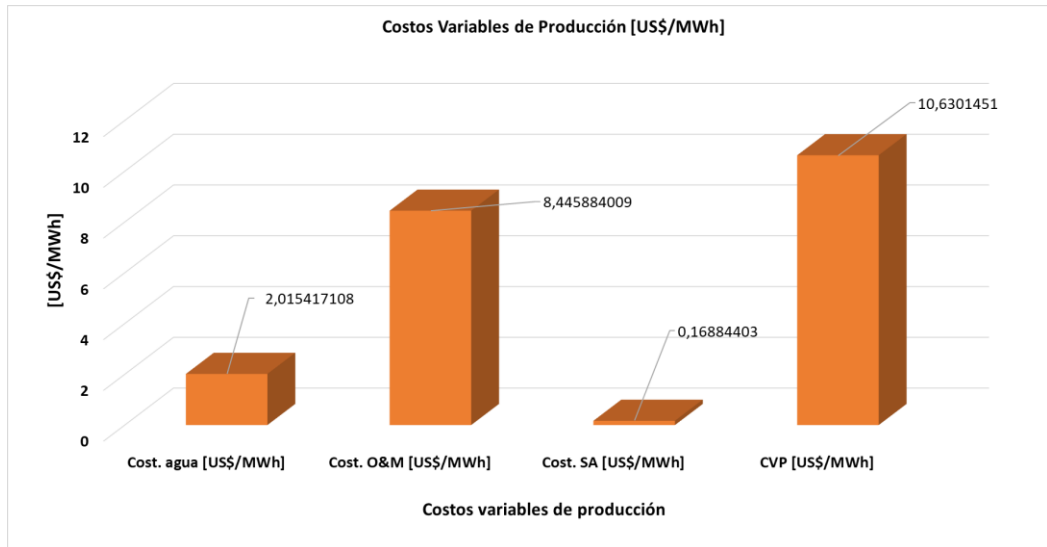
En la Figura 3.4 se muestra cómo se ingresó las variables de entrada de esta central, mientras que en la Tabla 3.2 se muestra los resultados del cálculo de cada componente para los costos variables de producción, así como los CVP en la Figura 3.5 respectivamente.

Datos de entrada	
Nombre Central :	Molino
Tipo de Central :	Embalse
Potencia Instalada [MW]:	1100
Vol [m <sup>3</sup> ]:	17779591,84
Salto neto [m]:	170
Qe[m <sup>3</sup> /s]:	200
Tipo de turbina:	Pelton
Rendimiento de la turbina [pu]:	0,9
t [horas]:	720
Generación bruta [MWh]:	795979
Generación neta [MWh]:	792000
% De energia para Servicios auxiliares	0,5
Costo Megio de Generación [USD/MWh]	33,6
Número de turbinas	5

**Figura 3.4.** Datos de entrada de la central Paute Molino.

**Tabla 3.2** Resultados de los CVP para la central Paute Molino.

Nombre de la central	Tipo de Central	Cost. agua [US\$/MWh]	Cost. O&M [US\$/MWh]	Cost. SA [US\$/MWh]	CVP [US\$/MWh]
Molino	Embalse	2,015417108	8,445884009	0,16884403	10,6301451



**Figura 3.5.** CVP para la central hidroeléctrica Paute Molino.

### 3.3.2. Centrales con potencia instalada entre 50 [MW] a 100 [MW]

- Central Pucará**

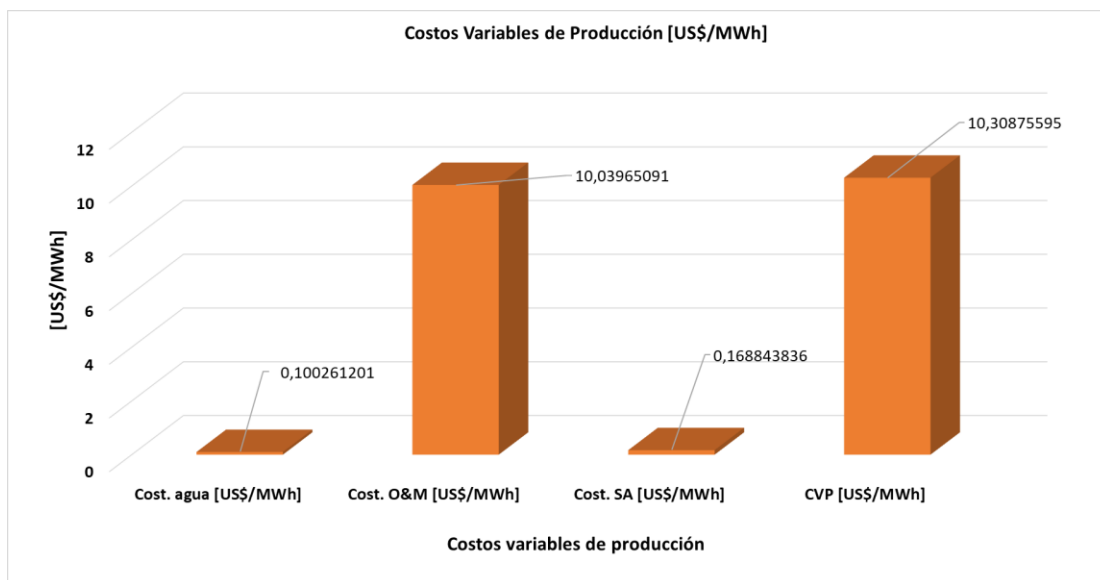
En la Figura 3.6 se muestra cómo se ingresó las variables de entrada de esta central, mientras que en la Tabla 3.3 se muestra los resultados del cálculo de cada componente para los costos variables de producción, al igual que en la Figura 3.7 respectivamente.

Datos de entrada	
Nombre Central :	Pucará
Tipo de Central :	Embalse
Potencia Instalada [MW]:	73
Vol [m <sup>3</sup> ]:	1608979,592
Salto neto [m]:	200
Qe[m <sup>3</sup> /s]:	123,7
Tipo de turbina:	Pelton
Rendimiento de la turbina [pu]:	0,9
t [horas]:	720
Generación bruta [MWh]:	52824
Generación neta [MWh]:	52560
% De energía para Servicios auxiliares	0,5
Costo Megio de Generación [USD/MWh]	33,6
Número de turbinas	2

**Figura 3.6.** Datos de entrada de la central Pucará.

**Tabla 3.3.** Resultados de los CVP para la central Pucará.

Nombre de la central	Tipo de Central	Cost. agua [US\$/MWh]	Cost. O&M [US\$/MWh]	Cost. SA [US\$/MWh]	CVP [US\$/MWh]
Pucará	Embalse	0,100261201	10,03965091	0,168843836	10,30875595



**Figura 3.7.** CVP para la central hidroeltrica Pucará.

- **Central Manduriacu**

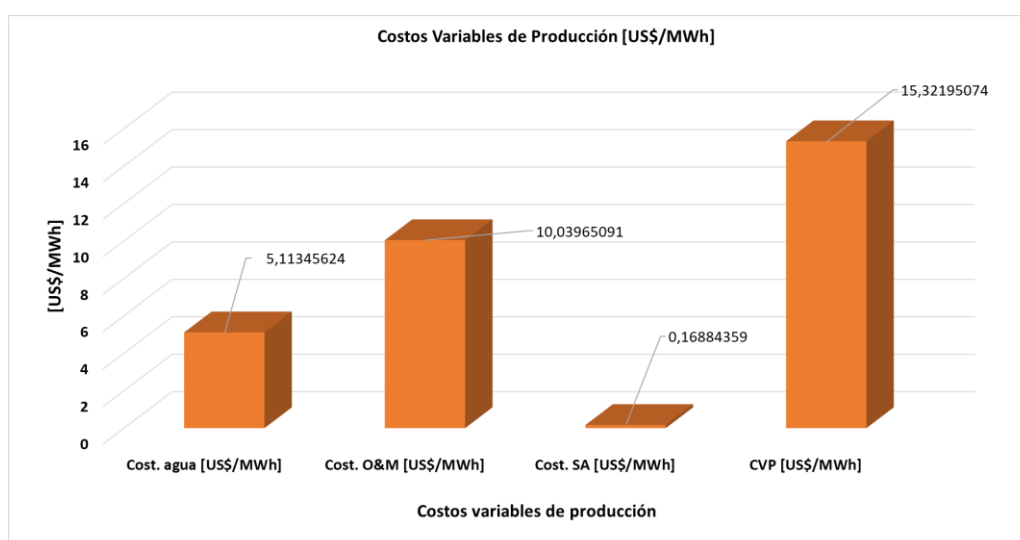
En la Figura 3.8 se muestra cómo se ingresó las variables de entrada de la central Manduriacu, mientras que en la Tabla 3.4 se muestra los resultados del cculo de cada componente para los costos variables de producción, al igual que en la Figura 3.9 respectivamente.

Datos de entrada	
Nombre Central :	Manduriacu
Tipo de Central :	Embalse
Potencia Instalada [MW]:	65
Vol [m <sup>3</sup> ]:	34479183,67
Salto neto [m]:	210
Qe[m <sup>3</sup> /s]:	49,5
Tipo de turbina:	Kaplan
Rendimiento de la turbina [pu]:	0,9
t [horas]:	720
Generación bruta [MWh]:	47035
Generación neta [MWh]:	46800
% De energía para Servicios auxiliares	0,5
Costo Megio de Generación [USD/MWh]	33,6
Número de turbinas	2

**Figura 3.8.** Datos de entrada para la central Manduriacu.

**Tabla 3.4.** Resultados de los CVP para la central Manduriacu.

Nombre de la central	Tipo de Central	Cost. agua [US\$/MWh]	Cost. O&M [US\$/MWh]	Cost. SA [US\$/MWh]	CVP [US\$/MWh]
Manduriacu	Embalse	5,11345624	10,03965091	0,16884359	15,321





**Figura 3.9.** CVP para la central hidroeléctrica Manduriacu.

### 3.3.3. Centrales con potencia instalada entre 10 [MW] a 50 [MW]

- **Central Alazán**

En la Figura 3.10 se muestra cómo se ingresó las variables de entrada de la central Alazán, mientras que en la Tabla 3.5 se muestra los resultados del cálculo de cada componente para los costos variables de producción, al igual que en la Figura 3.11 respectivamente.

Datos de entrada	
Nombre Central :	Alazan
Tipo de Central :	Pasada
Potencia Instalada [MW]:	6
Vol [m^3]:	661224,48
Salto neto [m]:	210
Qe[m3/s]:	3,44
Tipo de turbina:	Pelton
Rendimiento de la turbina [pu]: 	0,9
t [horas]:	720
Generación bruta [MWh]:	4341
Generación neta [MWh]:	4320
% De energía para Servicios auxiliares 	0,5
Costo Megio de Generación [USD/MWh]	33,6
Número de turbinas	2

**Figura 3.10.** Datos de entrada para la central Alazán.

**Tabla 3.5.** Resultados de los CVP para la central Manduriacu.

Nombre de la central	Tipo de Central	Cost. agua [US\$/MWh]	Cost. O&M [US\$/MWh]	Cost. SA [US\$/MWh]	CVP [US\$/MWh]
Alazán	Pasada	1,411085239	14,90795073	0,168816667	16,4878

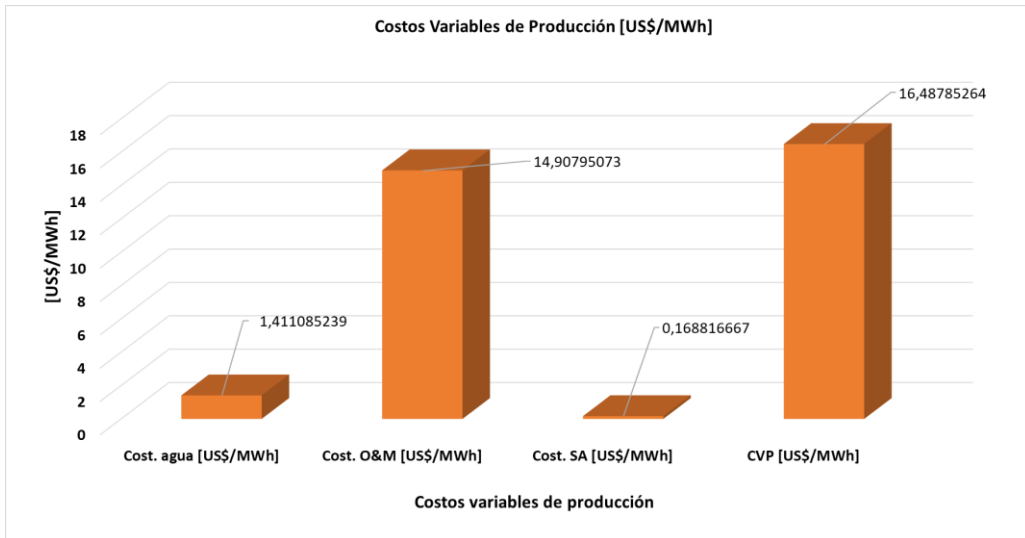


Figura 3.11. CVP para la central hidroeléctrica Alazán.

### 3.4. Análisis de Resultados

Ya que la herramienta informática permite ir agregando a una base de datos los parámetros ingresados y los resultados obtenidos, es posible determinar gráficamente como cambian los costos variables de producción según su potencia instalada, en la Figura 3.12 se puede observar de menor a mayor potencia las centrales hidroeléctricas y su tendencia a tener un menor costo cuando la potencia es mayor, esto permite validar los resultados al cumplir una tendencia similar que el informe de la Federal Energy Regulatory Commission .

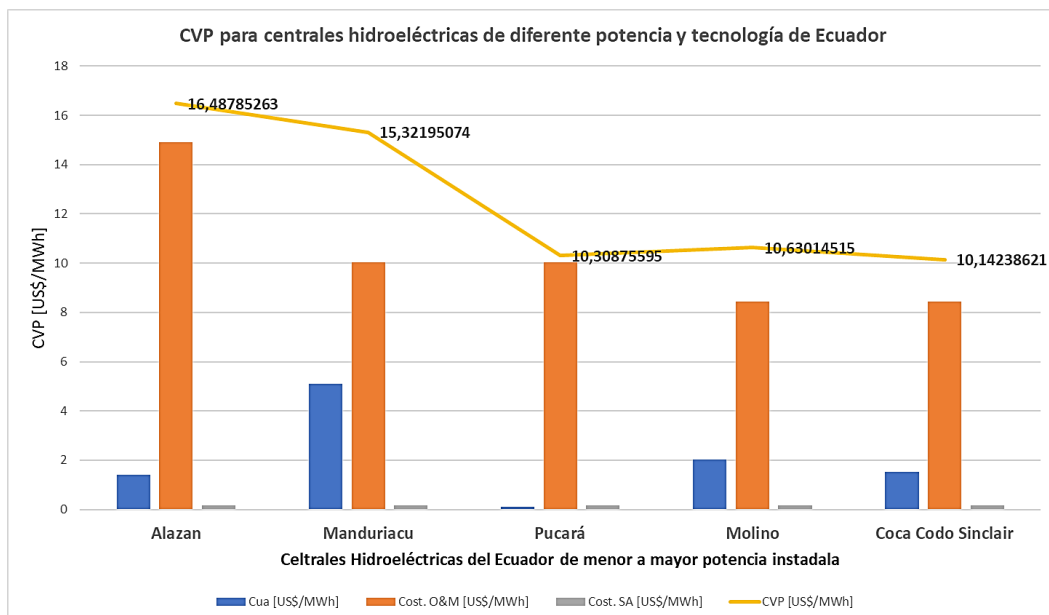


Figura 3.12. CVP para diferentes centrales hidroeléctricas de Ecuador.

A su vez se presenta la Tabla 3.6 la desviación estándar y la varianza la cual expresa la dispersión de los resultados obtenidos para las centrales analizadas, se puede observar que a medida que la potencia aumenta los CVP igual aumenta, pero con una dispersión estándar no muy alta por lo que están dentro del margen de la media, esto se interpreta que el cálculo de los CVP se encuentran dentro de un margen de error aceptable dando a entender que la metodología propuesta cumple con el objetivo de calcular de manera técnica los CVP.

**Tabla 3.6** Desviación estándar y varianza de los resultados obtenidos

<b>Nombre Central</b>	<b>Potencia Instalada [MW]</b>	<b>CVP [US\$/MWh]</b>
Alazán	6	16,486
Manduriacu	65	15,321
Pucará	73	10,308
Molino	1100	10,630
Coca Codo Sinclair	1500	10,142
<b>Desviación Estándar</b>		<b>3,069</b>
<b>Varianza</b>		<b>9,412</b>

Los resultados obtenidos son satisfactorios, permitieron determinar los CVP, dentro de un margen de poca dispersión, la desviación estándar indica que no están muy dispersos los resultados a pesar que la potencia instalada para cada central varía en gran cantidad desde 6 MW hasta los 1500 MW, de igual manera se puede observar que la metodología propuesta únicamente contempla aspectos técnicos lo que permite aplicar a cualquier central hidroeléctrica del Ecuador.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Se desarrolló los factores que componen los costos variables de producción para centrales hidroeléctricas de Ecuador, mediante una investigación técnica de diferentes referencias. Esto permitió establecer y cuantificar los factores que componen los costos variables de producción, así como los parámetros de entrada de tal manera que se construyó una metodología que permita calcular los CVP para centrales hidroeléctricas de Ecuador de diferente tamaño y tecnología.
- Se estableció una base de datos para el cálculo de los costos de operación y mantenimiento en base a un informe presentado por la Federal Energy Regulatory Commission, que contaba con los costos totales de las centrales hidroeléctricas de Estados Unidos de América para un ciclo operativo, de la base de datos obtenida se determinó un rango de valores variables para los costos de O&M; los cuales cambian en función de la potencia instalada y eso se debe a que a mayor potencia instalada la central es de mayor tamaño; sin embargo, se demostró que a mayor tamaño o potencia instalada de la central hidroeléctrica los costos de O&M son menores.
- Se implementó una herramienta informática de fácil uso que permite determinar los CVP con información técnica de cada central hidroeléctrica, los resultados obtenidos consideran únicamente datos técnicos de cada central por lo que la metodología propuesta para dicha herramienta informática cumple con el objetivo de calcular los CVP para cualquier tipo de central hidroeléctrica de Ecuador y almacenar los resultados en una base de datos.
- Al comprar los resultados obtenidos se comprobó que la metodología empleada mantiene los resultados dentro de un margen de poca dispersión lo cual se entiende como un resultado satisfactorio para esta investigación, ya que si se da el caso en el que los resultados de CVP varíen ampliamente a pesar de tener una potencia instalada similar estos resultados serían erróneos.



## **4.2. Recomendaciones**

- Se recomienda establecer parámetros de entrada para la aplicación de la herramienta informática para centrales hidroeléctricas privadas lo cual va a permitir el cálculo de CVP justificado por la metodología propuesta.
- Se recomienda poner en conocimiento la metodología propuesta ante las autoridades de la ARCERNR con el fin de que se emita una regulación técnica para el cálculo de los costos variables de operación para centrales hidroeléctricas de Ecuador

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Velastegui, Modelización Para La Óptima Selección de Unidades De Generación Térmica Considerando La programación del Combustible, Quito: Univerdidad Politécnica Salesiana, 2015, pp. 30-32.
- [2] «FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA. UNT.,» 11 Noviembre 2022. [En línea]. Available: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2017/12/Apunte-de-Costos-de-Producci%C3%B3n-de-EE-clase-051217.pdf>.
- [3] S.A, «Agua y Ambiente,» Revista de saneamiento ambiental en Mexico, 23 Junio 2015. [En línea]. Available: <https://aguayambiente.com/2015/06/23/generaelectrlapaz/>.
- [4] R. Viedma y B. Parra, Máquinas hidráulicas, Cartagena, 2016.
- [5] w. Jiménez y C. Trejo, GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR IMANES DE NEODIMIO, México DF: Instituto Politécnico Nacional , 2015.
- [6] R. Aguilera, Generación de un Catálogo de las Centrales Hidroeléctricas del Ecuador mediante una herramienta SIG., Sangolquí: Universidad De Las Fuerzas Armadas, 2013, pp. 25-27.
- [7] W. Arévalo, ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, RESPECTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES, Cuenca: Universidad de Cuenca, 2015.
- [8] Enciclopedia de Energía, «Central Eléctrica,» 2018. [En línea]. Available: [https://energyeducation.ca/Enciclopedia\\_de\\_Energia/index.php/Central\\_el%C3%A9ctrica](https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Central_el%C3%A9ctrica).
- [9] Instituto Catalán de Energía, «Gencat,» 2014. [En línea]. Available: [https://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/centrals\\_convencionals/](https://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/centrals_convencionals/). [Último acceso: Diciembre 2022].
- [10] M. Moran y H. Shapiro, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, vol. VII, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [11] Enciclopedia de Energía, «Central eléctrica nuclear,» [En línea]. Available: [https://energyeducation.ca/es/Central\\_el%C3%A9ctrica\\_nuclear](https://energyeducation.ca/es/Central_el%C3%A9ctrica_nuclear).
- [12] Factorenergia, «Factorenergia,» 24 01 2023. [En línea]. Available: <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energia-eolica/>.
- [13] R. Luna, DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO A LA RED PARA EL AREA DE ESTACIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SALAMANCA, Chihuahua: UTP, 2014.


- [14] A. Business, «Acciona,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/?\\_adin=02021864894](https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/?_adin=02021864894).
- [15] «Agrega Educacion,» [En línea]. Available: [http://agrega.educacion.es/repositorio/01112014/03/es\\_2014110112\\_9144407/foto-voltaicas.html](http://agrega.educacion.es/repositorio/01112014/03/es_2014110112_9144407/foto-voltaicas.html). [Último acceso: 26 01 2023].
- [16] «BBVA,» 25 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/asi-funciona-una-central-mareomotriz-y-genera-energia/>.
- [17] F. Cornejo, Energía mareomotriz generada a partir del control de inundaciones con presas inflables en Guayaqui, Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2021.
- [18] V. Tech, «UTN.BA Ingeniería Mecánica,» 21 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/pueden-las-turbinas-bajo-el-mar-resolver-el-problema-de-energia-y-calentamiento-global-del-planeta/>.
- [19] ENEL, « Enel Green Power,» [En línea]. Available: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/central-hidroelectrica>.
- [20] L. Valencia y J. Rosenfeld, «Monitoreo de parámetros de calidad de agua en lantanas de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de Tepeji del Río, Hidalgo,» *Maya Revista de Geociencias*, pp. 18-22, 2021.
- [21] H. Chanataxi, «Observatorio de Electricidad,» Observatorio de Electricidad, 26 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://observatorioelc.ister.edu.ec/2021/04/26/centrales-hidroelectricas-del-ecuador/>.
- [22] A. Marchegiani, Turbinas Pelton, Comahue: Universidad Nacional del Comahue, 2004.
- [23] M. Gonzáles, «Máquinas de Fluidos,» 2009. [En línea]. Available: [https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/40262/mod\\_resource/content/1/maquinas\\_fluidos/tema-6-turbinas-pelton.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/40262/mod_resource/content/1/maquinas_fluidos/tema-6-turbinas-pelton.pdf).
- [24] J. Gallego, CARACTERIZACIÓN DE UNA TURBINA DEL TIPO FRANCIS UTILIZADA POR UNA EMPRESA LOCAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA, Medellín: UNIVERSIDAD EAFIT, 2006.
- [25] R. Allauca, "Implementación de Procedimiento de Inspección y Reparación de Rodetes de la Turbina Francis de una Central Hidroeléctrica, Guayaquil: ESPOL, 2015.
- [26] H. Peón, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA KAPLAN MEDIANTE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL, Universidad de Cantabria, 2021.

- [27] P. Pérez, Turbinas Kaplan, Perú: Pontificada Universidad Católica del Perú.
- [28] «Areatecnologica - Turbinas Hidraulicas,» [En línea]. Available: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>.
- [29] J. Carrión, CÁLCULO, Y SELECCIÓN DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA PICOCENTRAL HIDROELECTRICA PARA ACCIONAMIENTO DE UN SISTEMA ALTERNO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA, Loja: Universidad Nacional De Loja, 2004, pp. 29-31.
- [30] A. Quiroga, «Centrales Hidroeléctricas,» 2016, pp. 11-13.
- [31] C. Delgado y M. Pérez, «Establecimiento de los Costos de Generación Hidroeléctrica,» Guayaquil, Escuela Superior Politécnica Del Litoral, 2003, pp. 33-50.
- [32] A. Centeno y W. Ordoñez, «Análisis del costo-volumen-utilidad en la compañía de economía mixta AGROAZUAY,» Universidad de Cuenca, 2018, pp. 42-44.
- [33] A. Agreda, ESTIMACIÓN DEL COSTO DE VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA PLANTA DE ENERGÍA VIRTUAL, BASADO EN LA ELASTICIDAD DE LA DEMANDA APLICANDO POLÍTICA DE PICO CRÍTICO, vol. I, Quito: Universidad Politécnica Salesiana, 2021, pp. 12-14.
- [34] S. Furiati, «PayFit,» 19 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://payfit.com/es/contenido-practico/gastos-fijos/#:~:text=Los%20gastos%20fijos%20son%20aquellos,de%20la%20producci%C3%B3n%20del%20negocio..> [Último acceso: 22 Enero 2023].
- [35] Greeley y Hansen, ETAPA EP, [En línea]. Available: <https://www.etapa.net.ec/Portals/0/Documentos/licitacion%20publica%20planta%20guangarcucho/ANEXO%2013/4.%20Costos%20de%20Operaci%C3%B3n%20y%20Mantenimiento.pdf?ver=2021-08-06-115611-520#:~:text=Los%20costos%20fijos%20lo%20constituyen,acuerdo%20al%20per%C3.> [Último acceso: 25 Enero 2023].
- [36] Y. Reyes, «Clasificación de Costos,» [En línea]. Available: <https://www.pucv.cl/uuaa/site/docs/20181123/20181123195708/apunedocenteclasificaciondecostosyr.pdf>. [Último acceso: 25 Enero 2023].
- [37] ARCERNNR, «Resolución Nro. ARCERNNR - 024/2020,» Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020. [En línea]. Available: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/12/Res-ARCERNNR-024-2020.pdf>.
- [38] IRENA (2022), RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2021, Abu Dhabi, 2021, pp. 149-150.
- [39] A. Karbassi y S. Ziyaei, Investigating the Harmful effects of Fossil Fuel Consumption Subsidies on Power Generation Costs in Iran, vol. V, 2021, pp. 1-14.


- [40] Secretaria Del Agua, «Uso y Aprovechamiento del agua República del Ecuador,» Gobierno Nacional de la República del Ecuador, 2017.
- [41] E, «Everything about solar energy,» 2020. [En línea]. Available: <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=36697>.
- [42] V. Hugo, «Academia,» [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/6608442/CENTRALES\\_HIDR%C3%81ULICAS\\_SERVICIOS\\_AUXILIARES](https://www.academia.edu/6608442/CENTRALES_HIDR%C3%81ULICAS_SERVICIOS_AUXILIARES).
- [43] Electro Industria, «Electro Industria,» Agosto 2012. [En línea]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1888&ni=ventajas-de-las-pequenas-centrales-hidroeléctricas>.
- [44] ARCERNNR 033/2020, «Agencia de Regulación y Control De Energía y Recursos Naturales No Renovables,» 2021. [En línea]. Available: [https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/07/informe\\_actualizacio%CC%81n\\_ana%CC%81lisis\\_costos\\_spee\\_2021\\_aprobada.pdf](https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/07/informe_actualizacio%CC%81n_ana%CC%81lisis_costos_spee_2021_aprobada.pdf).
- [45] Federal Energy Regulatory Commission, «FERC,» 22 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.ferc.gov/general-information-0/electric-industry-forms/form-1-1-f-3-q-electric-historical-vfp-data>.
- [46] O. Gbadebo y S. Colin, Hydropower Capital and O&M Costs: An Exploration of the FERC Form 1 Data, Springfield: OAK RIDGE National Laboratory, 2022.
- [47] National Renewable Energy Laboratory, «NREL Transforming Energy,» 2021. [En línea]. Available: [https://atb.nrel.gov/electricity/2022/hydropower#operation\\_and\\_maintenance\\_\(o&m\)\\_costs](https://atb.nrel.gov/electricity/2022/hydropower#operation_and_maintenance_(o&m)_costs).
- [48] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.

## 6. ANEXOS

### ANEXO I. Composición del menú para datos de entrada para cálculo de los costos variables de producción de centrales hidroeléctricas.



Escuela Politécnica Nacional  
Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Cálculo de los Costos Variables de Producción



Menú

Datos de entrada	
Nombre Central:	Embalse
Tipo de Central:	
Potencia Instalada [MW]:	
Vol [m³]:	
Salto neto [m]:	
Qe[m³/s]:	
Tipo de turbina:	
Rendimiento de la turbina [pu]:	0,9
t [horas]:	
Generación bruta [MWh]:	
Generación neta [MWh]:	
% De energía para Servicios auxiliares	0,5
Costo Meglo de Generación [USD/MWh]	33,6
Número de turbinas:	2

CVP

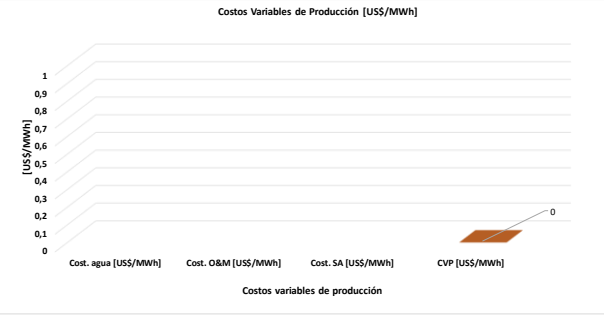
Nombre de la central	Tipo de Central	Cost. agua [US\$/MWh]	Cost. O&M [US\$/MWh]	Cost. SA [US\$/MWh]	CVP [US\$/MWh]
					0

Calcular CVP

Agregar a la base de datos

Ingresar Nuevos parametros

Costos Variables de Producción [US\$/MWh]



Costos variables de producción

## ANEXO II. Composición interna para el cálculo de cada componente de los costos variables de producción de centrales hidroeléctricas.

**Menú**

**CVP**

**Base de Datos**

Costo del agua

$$C_{agua} = \frac{X * Vol}{\gamma * H_n * Q_e * n_z * t} \left[ \frac{US\$}{MWh} \right]$$

CUA =	5,11345624	[USD/MWh]
-------	------------	-----------

Costos de Servicios Auxiliares

$$C_{SA} = \%S.A * CMG + \frac{G_b}{G_n} \left[ \frac{US\$}{MWh} \right]$$

CSA =	0,16884359	[USD/MWh]
-------	------------	-----------

C.S.A. (USD/MWh) =	33,6	S.A. (%) =	0,5
--------------------	------	------------	-----

Costos de Operación & Mantenimiento

	Pot. Inst. (MW)	Co (MWh)	Valor mínimo	Valor máximo
Entre	0-50	14,90795079	11,3338193	16,03362767
Entre	50-100	10,03965091	6,18109672	14,28127588
Mayor a	100	8,44388409	5,78208933	12,35204321

Potencia Instalada

Potencia Instalada	[USD/MWh]
35	14,90795079
50	10,03965091
100	8,44388409

Valor según Pot. Inst	10,03965091	<b>CO&amp;M-</b>	10,03965091
-----------------------	-------------	------------------	-------------

Nombre	Pot. Insta	X	V [R/m <sup>2</sup> ]	Vol [m <sup>3</sup> ]	Hn	Qe[m <sup>3</sup> /s]	nt	t [horas]	Generación Bruta [MW]	Generación Neta [MW]
Manduriacu	65	0,0049	9,81	34479184	210	49,5	0,9	720	47035	46800





**ANEXO IV. Datos de entrada para el cálculo de CVP en la herramienta informática.**

Central	Unidad	Nro.Unidades	Turbina	P.Efectiva [MW]	Caudal [m3/s]	Salto [m]	Volumen [m3]	Energía Neta	Energía Bruta
COCA_CODO_SINCLAIR_H_P	G_HPAS_CCS	8	Pelton	1500	287	620	44081632,65	1080000	1085427,11
Molino_H_A	G_HEMB_Paute_AB	5	Pelton	1100	200	170	17779591,84	792000	795979,88
Hidroagoyan	PUCARA_H_P	2	Pelton	73	123,7	200	1608979,592	52560	52824,12
MANDURIACU_H_P	G_HPAS_MAND	2	Kaplan	65	210	49,5	34479183,67	46800	47035,17
ALAZAN_H_P	G_HPAS_ALAZ	2	Pelton	6	3,44	205	661224,4898	4320	4341,71