



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD  
CLIMÁTICA EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN  
DIARIA**

**Marvin Estuardo Navarro Godínez**  
Asesorado por el Ing. Máynor Godoy Arias

Guatemala, mayo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD  
CLIMÁTICA EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN  
DIARIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARVIN ESTUARDO NAVARRO GODÍNEZ**  
ASESORADO POR EL ING. MÁYNOR GODOY ARIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MAYO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD  
CLIMÁTICA EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN  
DIARIA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de noviembre de 2020.

**Marvin Estuardo Navarro Godínez**

Ref. EEPFI-1453-2020  
Guatemala, 12 de noviembre de 2020

Director  
Armando Alonso Rivera Carrillo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA**, presentado por el estudiante **Marvin Estuardo Navarro Godínez** carné número **201130742**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

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

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*  
**Máynor Godoy Arias**  
Ingeniero Electricista  
Col. 12,717  
Mtro. Máynor Godoy Arias  
Asesor

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador de Área  
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético

Mtro. Edgar Darío Álvarez Coti  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-032-2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA**, presentado por el estudiante universitario Marvin Estuardo Navarro Godínez, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Guatemala, noviembre de 2020

DTG. 199.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON EMBALSE DE REGULACIÓN DIARIA**, presentado por el estudiante universitario: **Marvin Estuardo Navarro Godínez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
DECANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
★

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, mayo de 2021.

AACE/asga

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mis padres**

Nidia Lisbet Godínez y Marvin Evelio Navarro por su amor y apoyo sin condiciones durante mi etapa académica, siendo el soporte y parte fundamental para el alcance de mis metas. Siendo este logro un homenaje al trabajo y esfuerzo que durante años realizaron.

### **Mi hermana**

Mildred Navarro Godínez, por siempre estar pendiente de mí, creer en mi potencial y su cariño en todo momento.

### **Mi familia**

Por el apoyo y consejo dado a mi persona.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Universidad de San Carlos de Guatemala y Facultad de Ingeniería** Por ser la casa de estudios que albergó mi vida universitaria, permitirme desarrollar habilidades y adquirir conocimientos en mi formación como profesional.
- Ing. Juan Carlos Fuentes e Ing. Máynor Godoy Arias** Por sus conocimientos y recomendaciones aportadas en cada una de las etapas de esta investigación.
- Ing. César de León, Ing. Rodrigo Lainfiesta e Ing. Sergio Kestler** Por su apoyo en la revisión del presente documento.
- Mis mejores amigos y compañeros de la Facultad de Ingeniería y del Departamento de Física** Rodrigo Lainfiesta, Sergio Kestler, Víctor Arana, Erick Fuentes, Hernán Velásquez, Néstor Herrera, Iván Mejía, Stefany Herrera, Diana López, Estefany Velásquez, Silvia Ramírez, Diego Salazar y todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron a superar esta etapa universitaria.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
3.1. Contexto general .....	5
3.2. Descripción del problema .....	5
3.3. Formulación del problema .....	6
3.4. Delimitación del problema .....	7
4. JUSTIFICACIÓN .....	9
5. OBJETIVOS .....	11
5.1. General.....	11
5.2. Específicos .....	11
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Energía hidráulica.....	15
7.2. Hidroeléctricas.....	15

7.2.1.	Clasificación de hidroeléctricas .....	16
7.2.1.1.	Por tamaño.....	17
7.2.1.2.	Por salto disponible .....	18
7.2.1.3.	Por operación .....	18
7.2.1.4.	Por propósito .....	19
7.3.	Clima.....	20
7.3.1.	Variabilidad climática.....	20
7.3.2.	Cambio climático .....	20
7.3.3.	Gases de efecto invernadero .....	21
7.3.4.	Efecto invernadero .....	22
7.3.5.	Escenario climático .....	22
7.3.6.	Escenario de emisiones .....	22
7.4.	Serie de tiempo .....	23
7.5.	Modelo hidrológico .....	24
7.6.	Subsector eléctrico guatemalteco .....	24
7.6.1.	Ministerio de Energía y Minas .....	25
7.6.2.	Comisión Nacional de Energía Eléctrica .....	25
7.6.3.	Administrador del Mercado Mayorista .....	26
7.6.4.	Agentes del Mercado Mayorista .....	26
7.6.5.	Matriz energética de Guatemala .....	27
7.6.6.	Costo de oportunidad de la energía .....	29
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	31
9.	METODOLOGÍA .....	33
9.1.	Características del estudio .....	33
9.2.	Unidades de análisis .....	33
9.3.	Variables .....	34
9.4.	Fases del estudio .....	36

9.5.	Resultados esperados .....	37
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	39
11.	CRONOGRAMA.....	41
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	43
13.	REFERENCIAS.....	45



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Árbol de problemas .....	6
2.	Plan de acción.....	13
3.	Escenarios de emisiones de GEI y temperatura .....	23
4.	Clasificación de modelos hidrológicos.....	24
5.	Potencia efectiva instalada en el SNI año 2019 .....	27
6.	Generación por tipo de tecnología .....	28
7.	Cronograma de actividades .....	41

### TABLAS

I.	Definición en varios países de pequeña hidroeléctrica por su capacidad instalada.....	17
II.	Clasificación de las centrales hidráulicas según el AMM .....	19
III.	Proyecciones de cambios de temperatura y aumento del nivel del mar a fines del siglo XXI.....	23
IV.	Potencia efectiva instalada en el SNI año 2019 .....	28
V.	Variables pregunta de investigación 1.....	34
VI.	Variables pregunta de investigación 2.....	34
VII.	Variables pregunta de investigación 3.....	34
VIII.	Variables pregunta de investigación 4.....	35
IX.	Definición teórica y operativa de variables .....	35

X. Recursos necesarios para la investigación .....43

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
US\$	Dólar estadounidense
°C	Grado Celsius
GW	Gigavatio
GWh	Gigavatio-hora
kWh	Kilovatio-hora
MW	Megavatio
≤	Menor o igual que
<	Menor que
m	Metro
m <sup>3</sup> /s	Metro cúbico por segundo
mm	Milímetro
%	Porcentaje
Q	Quetzal
TWh	Teravatio-hora



## GLOSARIO

<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista.
<b>Casa de máquinas</b>	Es la obra civil que resguarda la turbina hidráulica, el generador y otros dispositivos necesarios para generación de energía eléctrica.
<b>CEPAL</b>	Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.
<b>Cuenca</b>	Territorio cuyas aguas afluyen todas a un mismo río, lago o mar.
<b>El Niño</b>	Es un fenómeno o evento de origen climático relacionado con el calentamiento del Pacífico oriental ecuatorial.
<b>Embalse</b>	Acumulación de agua producida por una construcción en el lecho de un río o arroyo que cierra parcial o totalmente su cauce.
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero.
<b>LGE</b>	Ley General de la Electricidad.

<b>Matriz energética</b>	Combinación de fuentes de energía primaria que se utiliza en una zona geográfica.
<b>MEM</b>	Ministerio de Energía y Minas.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional Interconectado.
<b>Turbina</b>	Máquina destinada a transformar en movimiento giratorio de una rueda de paletas la presión de un fluido.

# 1. INTRODUCCIÓN

Una central hidroeléctrica es aquella que aprovecha el recurso hídrico y la diferencia de altura que hay entre el embalse y la casa de máquinas para conducir agua, la cual hace girar un grupo de turbinas y generar energía eléctrica. Por la capacidad, el embalse puede clasificarse como de regulación diaria, mensual o anual. Claramente, este tipo de centrales de generación dependen de la cantidad de lluvia y el caudal del río en la cuenca de aprovechamiento para producir energía eléctrica. En Guatemala, las centrales de generación hidráulicas son tomadas como base en el despacho hidro-térmico y para el año 2019 equivalen al 40.6% de la potencia efectiva instalada en el Sistema Nacional Interconectado, aproximadamente 1 417.84 MW.

El recurso hídrico, al ser un insumo necesario para la producción hidroeléctrica, no es ajeno a las consecuencias de la variabilidad climática en la región que afectan diversas áreas en que se desenvuelve el ser humano, como la agricultura, salud, economía, entre otras.

El presente trabajo de investigación se centra en los efectos de las variaciones del clima en la hidroelectricidad, específicamente en una central hidroeléctrica con un embalse de regulación diaria, que almacena agua en los horarios de baja demanda de energía eléctrica para después utilizarla principalmente en las denominadas horas pico o demanda alta.

Se pretende profundizar con estudios y proyecciones de la generación hidroeléctrica en los próximos años y cómo estas afectarán al mercado eléctrico nacional, en aspectos como la participación en el mercado, comportamiento de

la matriz energética, la generación por fuentes renovables y el costo marginal de la energía.

El presente estudio resalta su importancia en generar conocimiento e información clave para la toma de decisiones respecto a políticas y planes de mitigación para enfrentarse a la problemática de la variabilidad climática en el sector eléctrico.

## 2. ANTECEDENTES

Estudios sobre los impactos de la variabilidad climática en sistemas hidrológicos han sido desarrollados en diferentes zonas del planeta.

Montealegre (2009) estudió la variabilidad climática, en áreas estratégicas de Colombia, concluyendo que “el comportamiento del patrón pluviométrico de Colombia esta [sic] muy influenciado por la variabilidad interanual de los procesos de interacción entre el océano y la atmósfera del océano Pacífico Tropical.” (p 7).

De igual manera en Colombia, Sedano Cruz (2017) caracterizó “la variabilidad de los eventos extremos del río Cauca por efecto de las variaciones climatológicas y antrópicas” (p. 28).

Es relevante lo que indica Carrasco (2002) respecto a que los cambios en el clima afectan el ciclo hidrológico de modo que los aprovechamientos hidroeléctricos “pueden ser afectados por una pérdida parcial del potencial hidroeléctrico bruto y la concentración de la producción en períodos de tiempo más cortos.” (p. 69).

En Latinoamérica, se han realizado diferentes estudios respecto a la hidroelectricidad y su relación con el cambio climático. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2017) presentó dos escenarios pesimistas para dos centrales hidroeléctricas de Panamá y República Dominicana y el impacto de la generación respecto a la disponibilidad del recurso hídrico.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2010) estima que para el año 2050 la temperatura promedio en las naciones centroamericanas aumente en 1.3 °C, impactando en aspectos como la disponibilidad de agua, comida, ecosistemas y salud.

La seguridad del abastecimiento de energía eléctrica es un notable desafío para los países centroamericanos que durante los últimos tiempos han observado, en sus matrices energéticas, el incremento en la dependencia de las energías renovables, las cuales son susceptibles al cambio climático (Levy, Anaya y Carvalho, 2017).

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2012) estimó el efecto del cambio climático en la producción de energía eléctrica de dos hidroeléctricas en Centro América, Cerro Grande en el Salvador y Chixoy en Guatemala, utilizando escenarios a largo alcance para la evaluación de las variaciones de precipitación y temperatura.

Por último, el efecto de fenómenos como El Niño son notorios en hidroeléctricas de Guatemala, conforme a Dobias (2015) al hacer referencia que durante la primera década de los 2000 se registraron caudales menores al promedio histórico en el embalse de la hidroeléctrica Chixoy, repercutiendo en un déficit de la generación de energía eléctrica de la central hidroeléctrica en un 20 % aproximadamente, respecto al promedio histórico.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1. Contexto general**

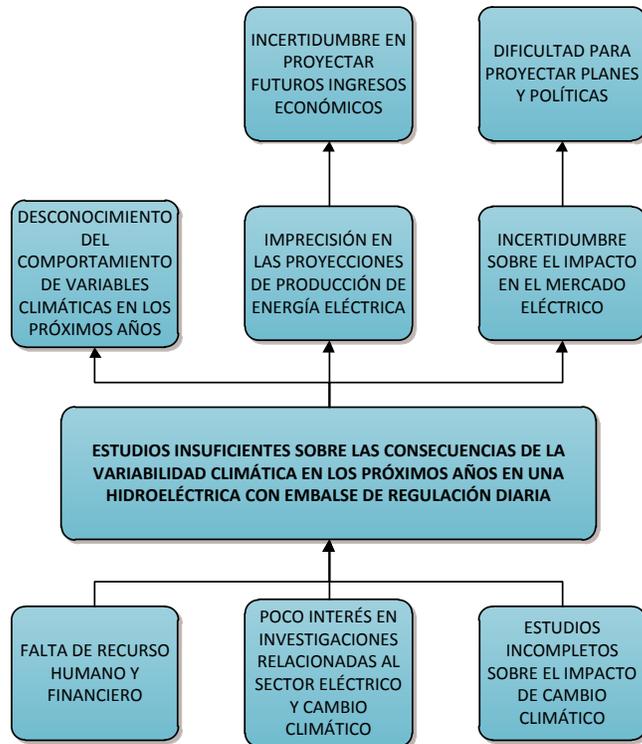
En Guatemala, se ha observado una gran variabilidad de la generación de energía eléctrica por medio de centrales hidráulicas, la cual ha sido más evidente en los últimos años. Esta variabilidad se encuentra ligada a la conducta del clima en la región y ha creado incertidumbre en el comportamiento de variables como precipitación, caudales y generación de energía eléctrica.

Las investigaciones sobre las consecuencias que tiene la variabilidad climática se han centrado en escenarios de largo plazo y en las condiciones hidrológicas, dejando de lado el impacto en el sector eléctrico del país.

#### **3.2. Descripción del problema**

Estudios insuficientes sobre las consecuencias de la variabilidad climática en los próximos años en una hidroeléctrica con embalse de regulación diaria. En este caso, el problema se enfocará en la central Aguacapa, una hidroeléctrica con embalse de regulación diaria con una potencia de 90 MW, conectada al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Formulación del problema

De lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación:

Pregunta central:

¿Cuál es el impacto de la variabilidad climática en la central hidroeléctrica Aguacapa para conocer su comportamiento en los próximos años?

Preguntas auxiliares:

- ¿Qué variables hidrometeorológicas y eléctricas se ven involucradas en la operación de la central hidroeléctrica Aguacapa?
- ¿Cómo se modifica el comportamiento de las variables hidrometeorológicas de la cuenca hidrográfica del río Aguacapa?
- ¿Cuál es la repercusión de la variabilidad climática en la producción de energía eléctrica de la central hidroeléctrica Aguacapa?
- ¿Cómo se ve afectado el mercado eléctrico mayorista por las consecuencias de la variabilidad climática sufridas por la central hidroeléctrica Aguacapa?

#### **3.4. Delimitación del problema**

La delimitación geográfica, se enfocará en el área de influencia de la hidroeléctrica Aguacapa y su cuenca hidrográfica que abarca regiones de los departamentos de Guatemala, Santa Rosa y Escuintla.

La delimitación histórica queda a discreción del investigador, con la prioridad de obtener la mayor cantidad de datos. Sin embargo, se considera que un rango de 20 años de datos históricos es representativo para la investigación.



## 4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se sitúa en la línea de investigación análisis e impactos de la variabilidad climática en los sistemas energéticos de la maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

La variabilidad climática es un gran reto y elemento relevante al momento de planificar el comportamiento del mercado eléctrico, con el presente trabajo, se espera determinar, para los próximos años, variables relevantes para la toma de decisiones al momento de enfrentar las consecuencias económicas que sufre un hidroeléctrica por dicha variabilidad.

La CEPAL, Fondo Nórdico de Desarrollo, Banco Interamericano de Desarrollo y Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales – Guatemala (2018) recomiendan “analizar la variación anual y estimar escenarios que pronostiquen los cambios para dos décadas, distinguiendo entre años secos y húmedos, con el fin de evaluar el cambio climático” (p. 131).

Los estudios realizados sobre cambio o variabilidad climáticos relacionados a la hidroelectricidad están enfocados a un largo plazo, lo que provoca que sus resultados posean una gran incerteza.

El efecto que sufrirá el sector eléctrico del país, por la variabilidad climática, no ha sido definido ni evaluado en ninguno de los estudios existentes. Es evidente que una baja generación de energía eléctrica por centrales hidráulicas repercutirá en diversos parámetros del mercado mayorista.

Como concluye Calderón (2018), la volatilidad del cambio climático precisa que sea necesario revisar y ajustar los escenarios proyectados en cuanto a generación renovable. Por lo anterior, se hace importante tener actualizados dichos escenarios.

Los beneficios que se conciben, por medio del presente trabajo, son los siguientes:

- Generación de información confiable y útil respecto al comportamiento de una central hidroeléctrica en los próximos años.
- Perspectiva del comportamiento del sistema eléctrico guatemalteco, en los próximos años.
- Lineamientos genéricos para considerar por agentes hidráulicos en la planificación del recurso hídrico como medio para generar energía eléctrica.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Evaluar el impacto de la variabilidad climática en la central hidroeléctrica Aguacapa para conocer su comportamiento en los próximos años.

### **5.2. Específicos**

- Detallar las variables hidrometeorológicas y eléctricas que se ven involucradas en la operación de la central hidroeléctrica.
- Analizar el comportamiento de las variables hidrometeorológicas de la cuenca hidrográfica del río Aguacapa.
- Estimar el impacto de la variabilidad climática en la producción de energía eléctrica de la central hidroeléctrica.
- Identificar los posibles efectos sobre el mercado eléctrico mayorista, resultantes de la variabilidad climática en la central hidroeléctrica.



## 6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Con el presente trabajo se propone analizar cómo influye la variabilidad climática en el comportamiento hidrológico y la generación de energía hidroeléctrica para una central con embalse de regulación diaria.

Se estará analizando la situación histórica de la central hidroeléctrica y de las variables que influyen en su embalse como caudales, precipitación, niveles de embalse, temperatura y definir su comportamiento para los próximos 10 años. Se utilizará la información de las estaciones hidrométricas y meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Aguacapa.

Se recopilarán datos históricos de la generación de energía e información de modelos climáticos. Seguidamente, determinar la metodología y las herramientas necesarias para realizar las proyecciones.

El plan de acción se efectuará de la siguiente manera:

Figura 2. Plan de acción



Fuente: elaboración propia.



## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. Energía hidráulica**

Es aquella que se obtiene aprovechando la energía potencial de una masa de agua a una determinada altura y la energía cinética que posee la masa de agua por el movimiento (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos y Castro Gil, 2009).

Se considera una forma de energía renovable al estar basada en el ciclo hidrológico del agua, que es provocado por la energía del sol que llega al planeta, la cual calienta cuerpos de agua, evaporándolos, convirtiéndolos en nubes que al ser condensadas caen en forma de precipitación. Al encontrarse en la superficie, la gravedad hace que el agua descienda de elevaciones más altas creando oportunidades para aprovechar la energía del agua (International Finance Corporation, 2015).

La energía hidráulica posee dos ventajas principales respecto a los combustibles de origen fósil y nuclear: una de ellas es que el agua (que es el combustible) no se consume ni empeora la calidad, únicamente es explotada; y otra de las ventajas es que no tiene problemas de producción de desechos. (Schallenberg Rodríguez, 2008, p. 32)

### **7.2. Hidroeléctricas**

Una hidroeléctrica transforma la energía potencial de una masa de agua que fluye en un río con cierta caída para hacer girar una turbina, que a su vez

provee la energía cinética para mover el rotor de un generador y producir electricidad (International Renewable Energy Agency, 2012).

“La instalación de centrales hidroeléctricas depende de la posibilidad de construir embalses o presas en los cauces de los ríos, para retener el agua, y transformar la energía hidráulica en energía eléctrica” (Schallenberg Rodríguez, 2008, p. 32).

En 2008, la producción hidroeléctrica alrededor del mundo fue de 3 288 TWh, correspondiente al 17.3 % de la producción global de electricidad. La capacidad instalada de generación hidroeléctrica alcanzo 985 GW en 2012 (International Finance Corporation, 2015).

El potencial de energías renovables sin desarrollar en Guatemala es superior a 13 500 MW, de ese total, 4 750 MW corresponde a energía hidráulica (Levy *et al.*, 2017).

### **7.2.1. Clasificación de hidroeléctricas**

Las plantas hidroeléctricas pueden ser clasificadas de acuerdo con los siguientes parámetros:

- Tamaño o capacidad instalada
- Salto disponible
- Régimen de operación
- Propósito

### 7.2.1.1. Por tamaño

Comúnmente las centrales hidroeléctricas se clasifican por su capacidad instalada, en MW. Por ejemplo, de acuerdo con la International Finance Corporation (2015), las centrales con capacidad inferior a 0.1 MW son denominadas micro centrales, pequeñas centrales se encuentran entre 0.1 MW y 10 MW, medianas centrales de 10 MW hasta 100 MW y grandes centrales aquellas con capacidad instalada superior a los 100 MW.

Los criterios entre países pueden variar respecto a este tipo de clasificación de acuerdo con sus necesidades y condiciones de mercado eléctrico, por esta razón no existe un consenso general. A continuación, se listan algunos ejemplos:

Tabla I. **Definición en varios países de pequeña hidroeléctrica por su capacidad instalada**

<b>País</b>	<b>Pequeña hidroeléctrica definida por su capacidad instalada (MW)</b>
Brasil	≤30
Canadá	<50
China	≤50
Directiva del Parlamento Europeo	≤20
India	≤25
Noruega	≤10
Suecia	≤1.5
Estados Unidos de América	5-100

Fuente: Edenhofer, Madrugá y Sokona (2012). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

### **7.2.1.2. Por salto disponible**

Las centrales hidroeléctricas pueden ser clasificadas en las siguientes categorías:

- Elevados saltos: Arriba de los 100 m.
- Medianos saltos: Entre 30 y 100 m.
- Bajos saltos: Inferior a los 30 m.

### **7.2.1.3. Por operación**

Las plantas hidroeléctricas pueden ser clasificadas de acuerdo con su operación en: centrales de filo de agua que operan principalmente del caudal disponible del río, su generación depende principalmente de la precipitación y escorrentía, las cuales tienen variaciones diarias, mensuales o estacionales sustanciales. Hidroeléctricas de almacenamiento, las cuales poseen un embalse donde almacenan agua para su consumo posterior. El embalse reduce la dependencia de la variabilidad del caudal de entrada. Por último, hidroeléctricas por almacenamiento por bombeo, en tales sistemas, el agua es bombeada desde un embalse inferior a un embalse superior, usualmente durante las horas de baja demanda, el flujo se invierte para generar electricidad a plena carga durante el periodo de demanda máxima diaria (Edenhofer, Madruga y Sokona, 2012).

El Administrador del Mercado Mayorista (2000), en la Norma de Coordinación Comercial No. 1, presenta una clasificación de las plantas hidroeléctricas, conforme con “la capacidad del embalse para guardar agua suficiente para generar a plena carga y poder transferirla entre subperiodos comprendidos en el periodo de regulación” (p. 29). Apegándose a esta definición, se pueden clasificar las centrales hidráulicas de la siguiente manera:

Tabla II. **Clasificación de las centrales hidráulicas según el AMM**

<b>Tipo</b>	<b>Periodo de transferencia de energía</b>	<b>Volumen útil equivalente a días de generación a máxima potencia</b>	<b>Otras consideraciones</b>
<b>Capacidad anual</b>	3 meses o más.	25 días	Ausencia de restricciones aguas abajo.
<b>Capacidad mensual</b>	Entre las distintas semanas de un mes.	5 días	No cumplir los requisitos de una central de capacidad anual.
<b>Capacidad semanal</b>	Entre distintos días de la semana.	2 días	No cumplir los requisitos de una central de capacidad mensual.
<b>Capacidad diaria</b>	Entre distintas horas de un día.	-	No cumplir los requisitos de una central de capacidad semanal. Presentar informe donde se demuestre que se cuenta con un embalse.
<b>De filo de agua</b>	-	-	Aquellas centrales que no cumplan con ninguna de las clasificaciones anteriores.

Fuente: Administrador del Mercado Mayorista (2000). *Norma de Coordinación Comercial No. 1.*

Consultado el 10 de octubre de 2020. Recuperado de

[https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb\\_dl=210NCC-1%20actualizado%2010-2020.pdf](https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=210NCC-1%20actualizado%2010-2020.pdf)

#### **7.2.1.4. Por propósito**

Las centrales hidroeléctricas con configuraciones de múltiples propósitos proveen al agua de otros usos para la subsistencia y el desarrollo humano (International Finance Corporation, 2015). Las funciones adicionales de una central hidroeléctrica se pueden incluir las siguientes:

- Protección de inundaciones
- Mitigación de la sequía
- Irrigación
- Suministro de agua.

- Navegación, turismo o recreación

### **7.3. Clima**

“El clima se define como el conjunto de estados de tiempo atmosférico que se producen en una determinada región y que otorgan a ésta una particular idiosincrasia” (Rodríguez Jiménez, Benito Capa y Portela Lozano, 2004, p. 61).

Por otro lado, el clima puede definirse de una forma particular como: “Una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años” (Solomon, 2007, p. 142).

#### **7.3.1. Variabilidad climática**

Se conoce como variabilidad climática a la oscilación o fluctuación de variables climatológicas alrededor de sus valores promedio de un periodo de por lo menos 30 años. La evaluación de la variabilidad climática se obtiene mediante la identificación de anomalías, que son las diferencias que existen entre los valores promedios y los valores reales de las variables meteorológicas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Universidad Nacional de Colombia, 2018).

#### **7.3.2. Cambio climático**

De acuerdo con Naciones Unidas (2000), el cambio climático se entiende por: “Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana

que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (p. 3).

Otra definición de cambio climático podría ser: “Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos” (Solomon, 2007, p. 140).

### **7.3.3. Gases de efecto invernadero**

Dentro de las definiciones en el Plan de Energía 2017-2032, del Ministerio de Energía y Minas (2016), un gas de efecto invernadero se establece como: “Todo gas que contribuye al efecto invernadero, lo intensifica y lo vuelve más peligroso, entre otras cosas, aumentando considerablemente la temperatura del planeta, siendo una cuestión fundamental en lo que al calentamiento global refiere” (p. 14).

Otra forma en que puede ser expresado un gas de efecto invernadero es:

Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropogénico, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. (Solomon, 2007, p. 145)

#### **7.3.4. Efecto invernadero**

Los gases de efecto invernadero absorben eficazmente la radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera a causa de los propios gases, y por las nubes. La radiación atmosférica se emite en todas direcciones, incluida hacia la superficie de la Tierra. Por ello, los gases de efecto invernadero atrapan calor en el sistema superficie-troposfera. Este efecto se denomina efecto invernadero. (Solomon, 2007, p. 143)

#### **7.3.5. Escenario climático**

Representación plausible y en ocasiones simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas internamente coherente definido explícitamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, y que puede introducirse como datos entrantes en los modelos de impacto. (Solomon, 2007, p. 144).

#### **7.3.6. Escenario de emisiones**

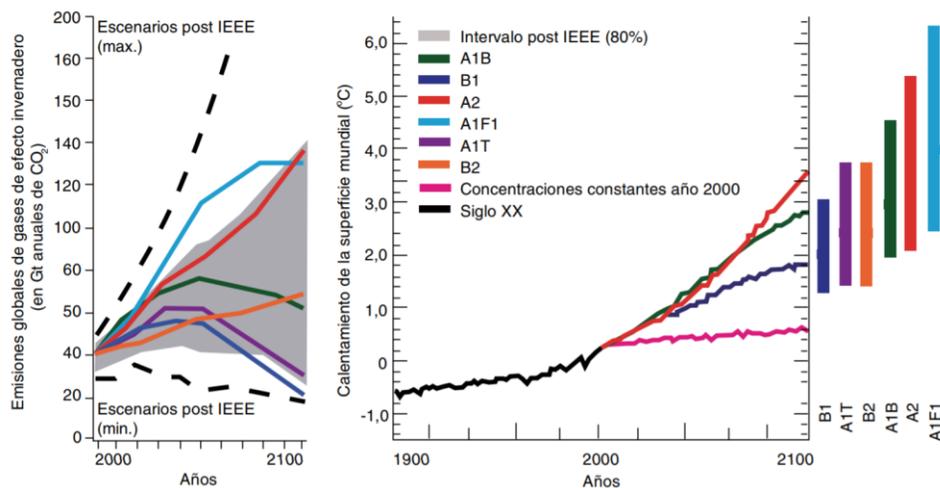
Representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (por ejemplo, gases de efecto invernadero, aerosoles), basada en un conjunto coherente de supuestos sobre las fuerzas que las determinan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico, el desarrollo, la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellos. (Solomon, 2007, p. 144)

Tabla III. **Proyecciones de cambios de temperatura y aumento del nivel del mar a fines del siglo XXI**

Caso	Cambios de temperatura en el período 2090-2099 respecto de 1980-1999 <sup>a</sup> (en grados centígrados)		Aumento del nivel del mar en el período 2090-2099 respecto de 1980-1999 (en metros)
	Estimación óptima	Intervalo probable	Intervalo basado en modelos, sin incluir los futuros cambios dinámicos rápidos de los flujos de hielo
Concentraciones constantes del año 2000	0,6	0,3-0,9	No disponible
Escenario B1	1,8	1,1-2,9	0,18-0,38
Escenario A1T	2,4	1,4-3,8	0,20-0,45
Escenario B2	2,4	1,4-3,8	0,20-0,43
Escenario A1B	2,8	1,7-4,4	0,21-0,48
Escenario A2	3,4	2,0-5,4	0,23-0,51
Escenario A1F1	4,0	2,4-6,4	0,26-0,59

Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Consultado el 15 de octubre de 2020. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf).

Figura 3. **Escenarios de emisiones de GEI y temperatura**



Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Consultado el 15 de octubre de 2020. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf).

#### 7.4. Serie de tiempo

“Utilizamos el término serie de tiempo para referirnos a cualquier grupo de información estadística que se acumula a intervalos regulares” (Levin y Rubin,

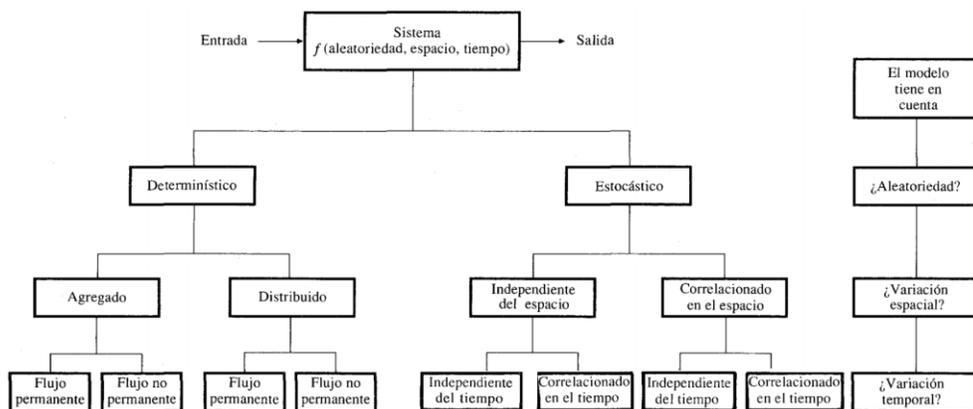
2004, p. 675). Una serie de tiempo posee componentes como la tendencia, periodicidad, estacionalidad y ruido.

### 7.5. Modelo hidrológico

“Es una aproximación al sistema real; sus entrada y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas” (Chow, Maidment y Mays, 1994, pág. 8).

Si se desprecian algunas fuentes de variación en un modelo hidrológico, esta puede clasificarse en un modelo determinístico que no considera la aleatoriedad y en un modelo estocástico que sus salidas son al menos parcialmente aleatorias (Chow *et al.*, 1994).

Figura 4. Clasificación de modelos hidrológicos



Fuente: Chow (1994). *Hidrología aplicada*.

### 7.6. Subsector eléctrico guatemalteco

El subsector eléctrico, juntamente con el de hidrocarburos, conforma el sector energético en Guatemala, bajo la rectoría del Ministerio de Energía y Minas (Ministerio de Energía y Minas, 2017).

“A través del subsector eléctrico, se cumple con el suministro de energía eléctrica en condiciones óptimas de seguridad, calidad y precio” (Ministerio de Energía y Minas, 2017, p. 2).

El Ministerio de Energía y Minas como el ente rector, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) como el ente fiscalizador y el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) como el ente operador, conforman el marco institucional del subsector eléctrico del país.

#### **7.6.1. Ministerio de Energía y Minas**

“Órgano del Estado responsable de aplicar la Ley General de Electricidad y su Reglamento para dar cumplimiento a sus obligaciones. [...] Es el encargado de exponer y organizar las políticas, planes de estado y programas indicativos relativos al subsector eléctrico” (Ministerio de Energía y Minas, 2020, p. 13).

#### **7.6.2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica**

Es un órgano técnico del Ministerio de Energía y Minas, el cual fue creado de acuerdo con la Ley General de Electricidad con las siguientes funciones:

Cumplir y hacer cumplir la LGE y sus reglamentos, en materia de su competencia, e imponer las sanciones a los infractores, velar por el cumplimiento de las obligaciones de los adjudicatarios y concesionarios, proteger los derechos de los usuarios y prevenir conductas atentatorias contra la libre empresa, así como prácticas abusivas o discriminatorias. (Ministerio de Energía y Minas, 2019, p. 27)

### **7.6.3. Administrador del Mercado Mayorista**

“Es una entidad privada sin fines de lucro, que coordina las transacciones entre los participantes del Mercado Mayorista y la operación del Sistema Nacional Interconectado” (Ministerio de Energía y Minas, 2020, p. 13).

De acuerdo con su reglamento, el Administrador del Mercado Mayorista (1998) tiene como objetivo “asegurar el correcto funcionamiento del Sistema Nacional Interconectado y de las interconexiones” (p. 14).

Dentro de las funciones importantes que realiza el AMM están: “La coordinación de la operación de centrales generadoras, interconexiones internacionales y líneas de transporte, y establecer los precios de corto plazo para las transferencias de potencia y energía entre sus agentes” (Ministerio de Energía y Minas, 2020, p. 13).

### **7.6.4. Agentes del Mercado Mayorista**

Acorde al Reglamento de la Ley General de Electricidad (1997), son Agentes del Mercado Mayorista:

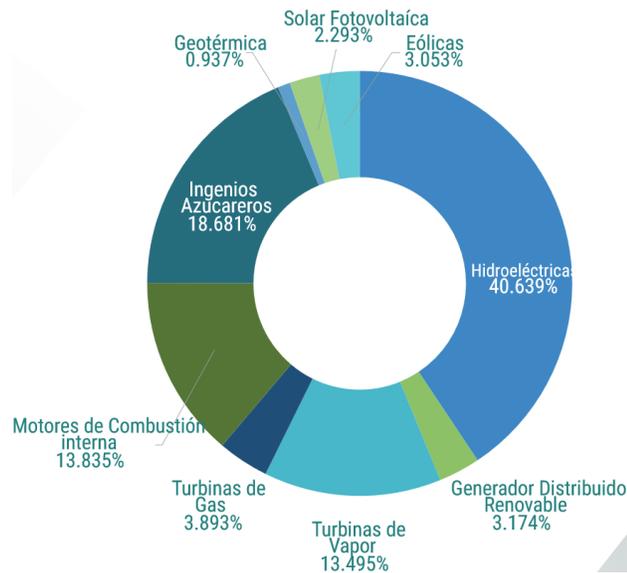
Los generadores, comercializadores, distribuidores, importadores, exportadores y transportistas, que cumpla con los siguientes límites: Generadores: tener una Potencia Máxima mayor de cinco megavatios (5 MW); Comercializadores: comprar o vender bloques de energía asociados a una Oferta Firme Eficiente o Demanda Firme de por lo menos dos megavatios (2 MW). [...] Distribuidores: tener un mínimo de quince mil (15,000) usuarios; Transportistas: tener capacidad de transporte mínima de

diez megavatios (10 MW). (Acuerdo Gubernativo No. 256-97, 1997, Artículo 39)

### 7.6.5. Matriz energética de Guatemala

La capacidad instalada en el Sistema Nacional Interconectado se encuentra liderada por las centrales hidroeléctricas, seguidas de los ingenios cogeneradores que representan una importante proporción del parque generador. Tecnologías como la solar fotovoltaica y eólica están emergiendo, al ya representar aproximadamente el 5 % de la capacidad total.

Figura 5. Potencia efectiva instalada en el SNI año 2019



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista (2020). *Informe Estadístico 2019*. Consultado el 18 de noviembre de 2020. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2019/INFEST20190101\\_01.pdf](https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2019/INFEST20190101_01.pdf).

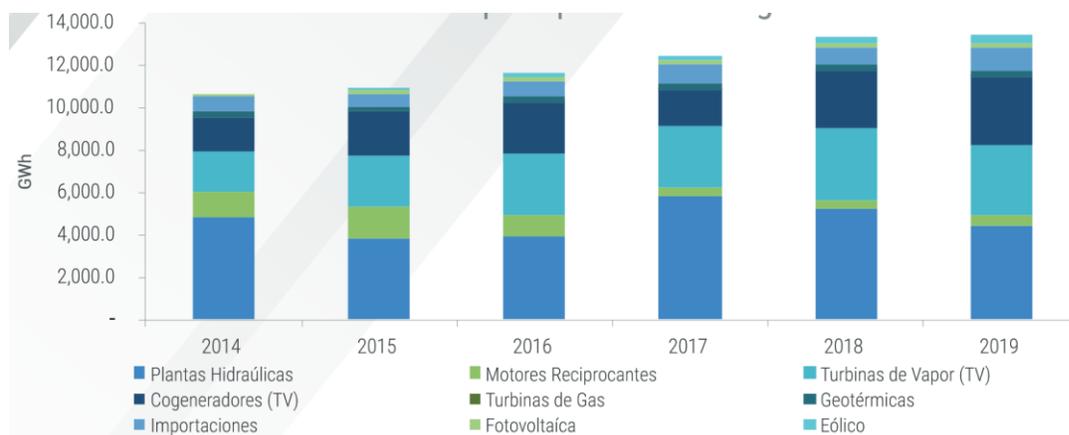
Tabla IV. **Potencia efectiva instalada en el SNI año 2019**

Plantas Generadoras	MW
Hidroeléctricas	1,417.84
Generador Distribuido Renovable	110.73
Turbinas de Vapor	470.84
Turbinas de Gas	135.81
Motores de Combustión interna	482.70
Ingenios Azucareros	651.77
Geotérmica	32.70
Solar Fotovoltaica	80.00
Eólicas	106.50
<b>Total</b>	<b>3,488.88</b>

Fuente: Administrador del Mercado Mayorista (2020). *Informe Estadístico 2019*. Consultado el 18 de noviembre de 2020. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2019/INFEST20190101\\_01.pdf](https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2019/INFEST20190101_01.pdf).

En el siguiente gráfico, se puede observar la evolución que ha tenido la matriz energética. Es notoria la mengua de la participación de los motores recíprocos al mismo tiempo que los ingenios cogeneradores aumentan su cuota de producción de energía eléctrica. En el caso de las plantas hidráulicas, se aprecia variabilidad en los diferentes años.

Figura 6. **Generación por tipo de tecnología**



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista (2020). *Informe Estadístico 2019*. Consultado el 18 de noviembre de 2020. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2019/INFEST20190101\\_01.pdf](https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2019/INFEST20190101_01.pdf).

#### **7.6.6. Costo de oportunidad de la energía**

Es uno de los parámetros más importantes para conocer la evolución y comportamiento del mercado eléctrico. De acuerdo con el Administrador del Mercado Mayorista (2000), en la Norma de Coordinación Comercial No. 4, especifica que:

Es el valor del Costo Marginal de Corto Plazo de la Energía en cada hora, definido como el costo en que incurre el Sistema Eléctrico para suministrar un kilovatio-hora (kWh) adicional de energía a un determinado nivel de demanda de potencia y considerando el parque de generación y transmisión efectivamente disponible. (p. 1)



## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes a nivel mundial

1.2. Antecedentes en Latinoamérica y el Caribe

### 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Energía hidráulica

2.2. Hidroeléctricas

2.2.1. Clasificación de hidroeléctricas

2.2.1.1. Por tamaño

2.2.1.2. Por salto disponible

2.2.1.3. Por operación

2.2.1.4. Por propósito

2.3. Clima

2.3.1. Variabilidad climática

2.3.2. Cambio Climático

- 2.3.3. Gases de efecto invernadero
- 2.3.4. Efecto invernadero
- 2.3.5. Escenario climático
- 2.3.6. Escenario de emisiones
- 2.4. Serie de tiempo
- 2.5. Modelo hidrológico
- 2.6. Subsector eléctrico guatemalteco
  - 2.6.1. Ministerio de Energía y Minas
  - 2.6.2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica
  - 2.6.3. Administrador del Mercado Mayorista
  - 2.6.4. Agentes del Mercado Mayorista
  - 2.6.5. Matriz energética de Guatemala
  - 2.6.6. Costo de oportunidad de la energía

### 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

## **9. METODOLOGÍA**

### **9.1. Características del estudio**

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo ya que utilizará la recolección de datos para generar estadísticas, establecer patrones de comportamiento y proyecciones a futuro de las variables.

El alcance del estudio es descriptivo, ya que no se limita a la recolección de datos, sino a su análisis, la evaluación de variables, identificar las interacciones e incidencias que existen entre ellas, los cambios que se producen en el transcurso del tiempo, tendencias y predecir el comportamiento que pueden asumir en el futuro.

El diseño adoptado para el “Análisis del impacto de la variabilidad climática en una central hidroeléctrica con embalse de regulación diaria” será no experimental, las variables independientes del estudio no serán modificadas de forma intencional, la información se analizará en su estado original. Además, será un estudio longitudinal de tendencia, pues se analizará la predisposición de variables como caudales, precipitación, temperatura, producción de energía eléctrica, entre otras.

### **9.2. Unidades de análisis**

La población en estudio serán las variables hidrometeorológicas medidas en la cuenca del río Aguacapa, las cuales son precipitación, temperatura ambiente, caudal y serán estudiadas en su totalidad.

### 9.3. Variables

¿Qué variables hidrometeorológicas y eléctricas se ven involucradas en la operación de la central hidroeléctrica Aguacapa?

Tabla V. **Variables pregunta de investigación 1**

<b>Variable</b> \ <b>Criterio</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uso</b>	<b>Nivel de medición</b>
Tipo de parámetro	Categórica politómica	Observable	Nominal

Fuente: elaboración propia.

¿Cómo se modifica el comportamiento de las variables hidrometeorológicas de la cuenca hidrográfica del río Aguacapa?

Tabla VI. **Variables pregunta de investigación 2**

<b>Variable</b> \ <b>Criterio</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uso</b>	<b>Nivel de medición</b>
Precipitación	Numérica continua	Observable	Razón
Temperatura	Numérica continua	Observable	Razón
Caudal	Numérica continua	Observable	Razón

Fuente: elaboración propia.

¿Cuál es la repercusión de la variabilidad climática en la producción de energía eléctrica de la central hidroeléctrica Aguacapa?

Tabla VII. **Variables pregunta de investigación 3**

<b>Variable</b> \ <b>Criterio</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uso</b>	<b>Nivel de medición</b>
Tipo de modelación	Categórica politómica	Manipulable	Nominal
Energía eléctrica generada	Numérica continua	Observable	Razón
Ingresos económicos	Numérica continua	Observable	Razón

Fuente: elaboración propia.

¿Cómo se ve afectado el mercado eléctrico mayorista por las consecuencias de la variabilidad climática sufridas por la central hidroeléctrica Aguacapa?

Tabla VIII. **Variables pregunta de investigación 4**

<b>Variable</b>	<b>Criterio</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Uso</b>	<b>Nivel de medición</b>
Precio de oportunidad de la energía		Numérica continua	Observable	Razón
Participación en el mercado eléctrico		Numérica continua	Observable	Razón

Fuente: elaboración propia.

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla IX. **Definición teórica y operativa de variables**

<b>Variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operativa</b>
Precipitación	Caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre	Se medirá en milímetros de lluvia [mm].
Temperatura	Magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente.	En grados Celsius [°C].
Caudal	Cantidad de agua que lleva una corriente o que fluye en un río.	En metros cúbicos por segundo [m <sup>3</sup> /s].
Energía eléctrica	Es la energía que se origina de la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos determinados, cuando se los pone en contacto mediante un transmisor eléctrico.	En gigavatios-hora [GWh].
Ingresos económicos	En la economía, todo lo que se genera a partir de la realización de una actividad	En dólares [US\$].

Fuente: elaboración propia.

#### **9.4. Fases del estudio**

El desarrollo de la investigación, alineado con el cumplimiento de los objetivos se detalla a continuación:

En la primera fase, denominada revisión de literatura o documental, se hará la revisión de información teórica y antecedentes. Además, se hará una exploración de estudios o investigaciones análogas.

En la segunda fase del estudio, se realizará la gestión y recolección de información histórica de variables como precipitación, caudal, temperatura, registradas en estaciones meteorológicas dentro de la cuenca del río Aguacapa, la producción histórica de energía eléctrica por la hidroeléctrica Aguacapa y parámetros relevantes del mercado eléctrico mayorista del país.

De acuerdo con la información conseguida, se realizará la fase de análisis de datos. Se determinará el comportamiento de las variables meteorológicas, asimismo realizar proyecciones para los próximos años para la cuenca hidrológica de la hidroeléctrica Aguacapa. Identificar la relación entre las variables meteorológicas y la generación de energía eléctrica por la central hidroeléctrica. Determinar el grado de impacto de la variabilidad climática en el sector eléctrico, en específico, el impacto para la central hidroeléctrica Aguacapa.

En la última fase de la investigación, se ejecutará la interpretación de la información y redactar los resultados finales de la investigación, generar conclusiones y recomendaciones.

## **9.5. Resultados esperados**

Con base en las preguntas de investigación, objetivos y las fases del estudio, se espera obtener los siguientes resultados:

- Especificar los parámetros implicados en un aprovechamiento hidroeléctrico con embalse de regulación diaria.
- Tendencia histórica y relación entre los parámetros climáticos y eléctricos en la cuenca y central hidroeléctrica Aguacapa.
- Proyecciones de la serie de tiempo de caudales para los próximos 10 años en la cuenca de la hidroeléctrica Aguacapa.
- Proyecciones para los próximos 10 años de las series de tiempo de la producción de energía eléctrica e ingresos económicos para la central hidroeléctrica Aguacapa.
- Proyecciones para los próximos 10 años de los parámetros relevantes del mercado eléctrico mayoristas.



## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para alcanzar los objetivos del presente trabajo se realizará la recolección de datos cuantitativos (caudal, lluvia y temperatura) disponibles de las estaciones hidrométricas y meteorológicas en el área de influencia de la central hidroeléctrica Aguacapa, los cuales serán agrupados por mes durante los distintos años, con el objetivo de poder describir el comportamiento en los recientes años.

Cada variable será tratada como una serie de tiempo. Para la variable caudal se utilizarán modelos autorregresivos, que consideran los parámetros de media, desviación estándar y coeficiente de autocorrelación, y series de Fourier, el cual dispone de un componente autorregresivo y un componente estocástico.

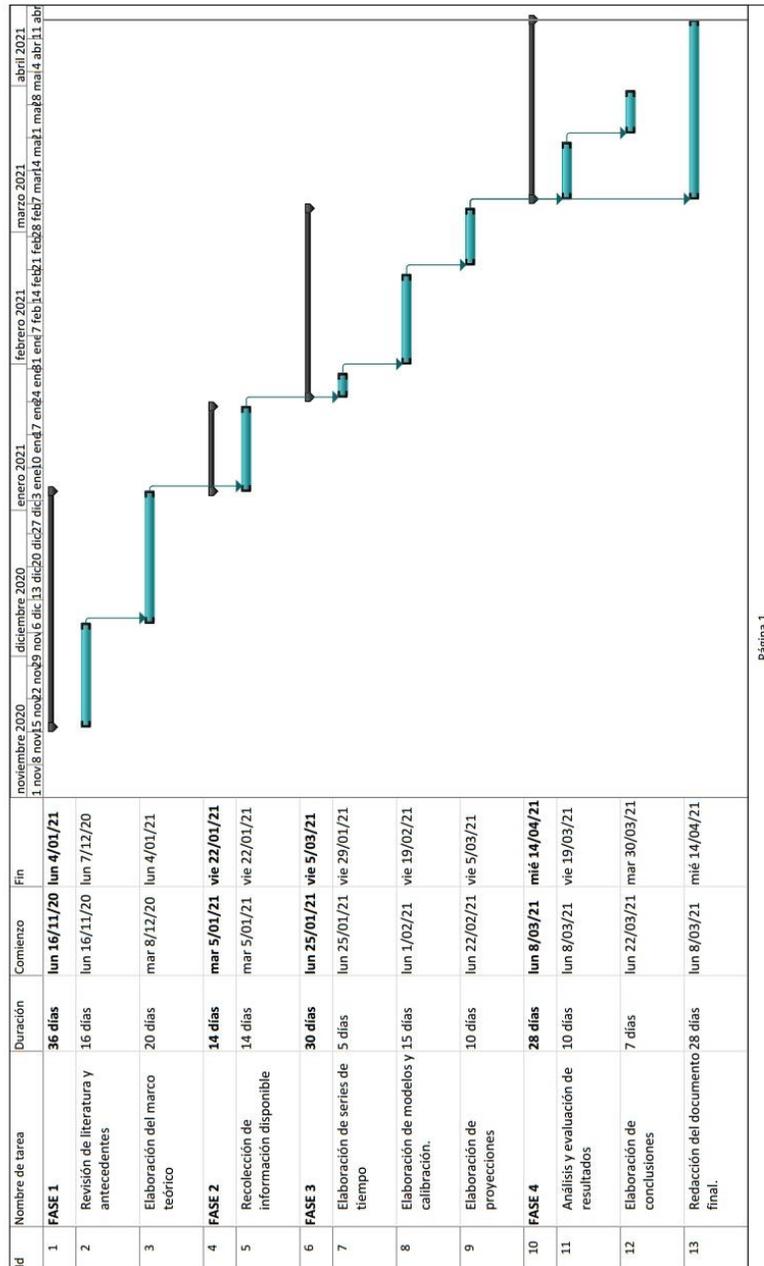
Se generarán proyecciones de caudales medios mensuales para una serie de tiempo de 10 años que será la variable de entrada para proyectar la generación de energía eléctrica en GWh de la central hidroeléctrica.

Los resultados de los datos tendrán un alcance descriptivo, al representar los impactos probables de la variabilidad climática en la central hidroeléctrica con embalse de regulación diaria.



# 11. CRONOGRAMA

Figura 7. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

A continuación, se describen los recursos necesarios para desarrollar la presente investigación, cuya fuente de financiamiento es propia.

Tabla X. **Recursos necesarios para la investigación**

Descripción	Tipo de recurso	Cantidad	Costo unitario	Costo total	Porcentaje
Horas de servicios profesionales del asesor.	Humano	25	Q 140.00	Q 3,500.00	11%
Horas de costo de oportunidad del investigador.	Humano	300	Q 70.00	Q21,000.00	64%
Compra de datos hidrométricos y meteorológicos.	Información	1	Q4,000.00	Q 4,000.00	12%
Adquisición de base de datos del mercado eléctrico.	Información	-	Q -	Q -	0%
Uso de software.	Herramienta	1	Q1,000.00	Q 1,000.00	3%
Meses de uso de energía eléctrica, internet.	Herramienta	6	Q 250.00	Q 1,500.00	5%
Depreciación de computadora.	Equipo	1	Q1,000.00	Q 1,000.00	3%
Insumos de oficina, impresiones.	Materiales	-	Q 600.00	Q 600.00	2%
<b>SUBTOTAL</b>				<b>Q32,600.00</b>	100%
Imprevistos		5%		Q 1,630.00	
<b>TOTAL</b>				<b>Q34,230.00</b>	

Fuente: elaboración propia.

La información sobre el mercado eléctrico de Guatemala que será utilizada en esta investigación es de carácter público y puede obtenerse en el portal web del Administrador del Mercado Mayorista.



### 13. REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo No. 256-97. Reglamento de la Ley General de Electricidad. Diario de Centro América. Guatemala. 2 de abril de 1997.
2. Administrador del Mercado Mayorista. (1998). *Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista*. Recuperado de <https://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/LEY%20GENERAL%20DE%20ELECTRICIDAD%20Y%20REGLAMENTOS.pdf>
3. Administrador del Mercado Mayorista. (2000). *Norma de Coordinación Comercial No. 1*. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb\\_dl=210NCC-1%20actualizado%2010-2020.pdf](https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=210NCC-1%20actualizado%2010-2020.pdf)
4. Administrador del Mercado Mayorista. (2000). *Norma de Coordinación Comercial No. 4*. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb\\_dl=212NCC-4%20actualizado%2012-2015.pdf](https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=212NCC-4%20actualizado%2012-2015.pdf)
5. Administrador del Mercado Mayorista. (2020). *Informe Estadístico 2019*. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2019/INFEST20190101\\_01.pdf](https://www.amm.org.gt/pdfs2/informes/2019/INFEST20190101_01.pdf)

6. Calderón Abullarade, F. J. (2018). *Energía y potencia para Guatemala: Los estadios del Subsector Eléctrico 1883-2017*. Guatemala: Ministerio de Energía y Minas, Gobierno de Guatemala.
7. Carrasco, P. F. (2002). *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos : Aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, España. Recuperado de <http://oa.upm.es/140>.
8. Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A. y Castro Gil, M.-A. (2009). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
9. Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
10. Dobias, J. (2015). *El fenómeno de El Niño y su impacto en la generación hidroeléctrica de Chixoy*. Recuperado de <http://www.cnee.gob.gt/pdf/informacion/EINinoImpactoChixoy082015.pdf>
11. Edenhofer, O., Madruga, R. P. y Sokona, Y. (2012). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.

12. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza: Autor.
13. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Universidad Nacional de Colombia (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*. Bogotá, Colombia: Autor.
14. International Finance Corporation. (2015). *Hydroelectric Power: A Guide for Developers and Investors*. Washington, Estados Unidos: Autor.
15. International Renewable Energy Agency. (2012). *Renewable Energy Technologies: Costs Analysis Series - Hydropower*. Abu Dhabi: Autor.
16. Levin, R. I. y Rubin, D. S. (2004). *Estadística para administración y economía* (Séptima ed.). Ciudad de México, México: PEARSON EDUCACIÓN.
17. Levy, A., Anaya, F. y Carvalho, A. V. (2017). *Sol, viento, fuego y agua: El futuro de las energías renovables no convencionales en Centroamérica*. Centroamérica: Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de <https://publications.iadb.org/handle/11319/8681>
18. Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Plan Nacional de Energía 2017-2032*. Guatemala: Autor.

19. Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Subsector Eléctrico en Guatemala*. Guatemala: Autor.
20. Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Informe Estadístico 2018*. Guatemala: Autor.
21. Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2020-2050*. Guatemala: Autor.
22. Montealegre Bocanegra, J. E. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceanicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Bogotá, Colombia: Autor.
23. Naciones Unidas. (2000). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Nueva York, Estados Unidos: Naciones Unidas. Recuperado de <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>
24. NU. CEPAL. (2010). *The Economics of Climate Change in Central America: Summary 2010*. Ciudad de México, México: Autor.
25. NU. CEPAL. (2012). *La economía del cambio climático en Centroamérica. Dos casos de impactos potenciales en la generación de hidroeléctricidad*. Ciudad de México, México: Autor.
26. NU. CEPAL, Fondo Nórdico de Desarrollo, Banco Interamericano de Desarrollo, Secretaría Nacional de Energía de Panamá, y Ministerio de Energía y Minas de la República Dominicana. (2017). *Impactos potenciales del cambio climático en el ámbito hidroeléctrico en*

*Panamá y la República Dominicana*. Ciudad de México, México: NU. CEPAL.

27. NU. CEPAL, Fondo Nórdico de Desarrollo, Banco Interamericano de Desarrollo y Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales - Guatemala. (2018). *La economía del cambio climático en Guatemala: Documento técnico 2018*. Ciudad de México, México: NU. CEPAL.
28. Rodríguez Jiménez, R. M., Benito Capa, Á., y Portela Lozano, A. (2004). Meteorología y Climatología. *Meteorología y Climatología. Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004*, 3-90. Recuperado de <https://www.fecyt.es/es/publicacion/unidad-didactica-meteorologia-y-climatologia>
29. Schallenberg Rodríguez, J. C. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Santa Cruz de Tenerife, España: Instituto Tecnológico de Canarias.
30. Sedano Cruz, R. K. (2017). *Influencia de la variabilidad climática y factores antrópicos en los extremos hidrológicos en el Valle Alto del río Cauca, Colombia* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, España. doi: 10.4995/Thesis/10251/90579
31. Solomon, S. (2007). *Cambio climático 2007: Base de las Ciencias Físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Resumen para Responsables de Políticas, Resumen Técnico y*

*Preguntas más Frecuentes.* Nueva York, Estados Unidos:  
Cambridge University Press.