



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD
CLIMÁTICA EN EL DESPACHO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA PERÍODOS DE
ÉPOCA SECA EN GUATEMALA DURANTE LOS AÑOS 2019 - 2022**

Rodrigo José Samayoa Cordón

Asesorado por el Mtro. Ing. José Andrés Escobar Iriarte

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD
CLIMÁTICA EN EL DESPACHO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA PERÍODOS DE
ÉPOCA SECA EN GUATEMALA DURANTE LOS AÑOS 2019 - 2022**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RODRIGO JOSÉ SAMAYOA CORDÓN

ASESORADO POR EL MTRO. ING. JOSÉ ANDRÉS ESCOBAR IRIARTE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, ENERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Inga. María Magdalena Puente Romero
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 EL DESPACHO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA PERÍODOS DE ÉPOCA SECA EN GUATEMALA DURANTE LOS AÑOS 2019 - 2022

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 7 de noviembre de 2022.



Rodrigo José Samayoa Cordon



EEPFI-PP-1626-2022

Guatemala, 7 de noviembre de 2022

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

Estimado Ing. Rivera

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

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL DESPACHO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA PERÍODOS DE ÉPOCA SECA EN GUATEMALA DURANTE LOS AÑOS 2019 2022**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Energías renovables e incidencia en la matriz energética de Guatemala. - Análisis e impactos de la variabilidad climática en los sistemas energéticos**, presentado por el estudiante **Rodrigo José Samayoa Cerdón** carné número **200815454**, 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 Gestion De Mercados Electricos 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"

Mtro. José Andrés Escobar Iriarte
Asesor(a)

José Andrés Escobar I.
Ingeniero Electricista
Col. 13177

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



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





EEP-EIME-1392-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL DESPACHO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA PERÍODOS DE ÉPOCA SECA EN GUATEMALA DURANTE LOS AÑOS 2019 2022**, presentado por el estudiante universitario **Rodrigo José Samayoa Cordón**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, followed by a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

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

Guatemala, noviembre de 2022

LNG.DECANATO.OI.081.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL DESPACHO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA PERÍODOS DE ÉPOCA SECA EN GUATEMALA DURANTE LOS AÑOS 2019 - 2022**, presentado por: **Rodrigo José Samayoa Cordón**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme permitido realizar una más de mis metas.
Mis padres	Ana Lucrecia Cordón y Francisco José Samayoa por haberme dado todo su amor, cariño y la oportunidad de formarme profesionalmente.
Mi esposa	Sabrina Alejandra Álvarez, por su apoyo y amor incondicional sin el cual no hubiera podido culminar esta meta.
Mis abuelos	Mynor Cordón, Juana González, Rodolfo Samayoa, Marta Arenales, (q. d. e. p) por sus enseñanzas.
Mis hermanos	Adrián, Daniela y Javier Samayoa, por sus consejos, apoyo y compañía en mi vida.
Familia y amigos	Rubén, Priscila, Romina, Facundo, Camila Álvarez, Andrés Arbizu, Elviramaría Castellanos, Gabriel Castroconde, Adriana D´Incau, Andrés López, Jorge Marroquín, Alejandro Milían, Edwin Pineda, Carlos Pérez, Luis Ramírez, Pamela Sikahall, Jocelyn Trujillo y Ricardo Vásquez, por todo su apoyo y valiosa amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el <i>alma mater</i> que me permitió formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme experiencias de vida y conocimiento enriquecedor para mi formación como ser humano.
Administrador del Mercado Mayorista	Por ser parte de mi formación profesional dentro del subsector eléctrico de Guatemala.
Mis amigos	Por haberme apoyado y acompañado durante la carrera.
Mi asesor	Mtro. Ing. José Andrés Escobar Iriarte por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
Familia y amigos en general	Por su apoyo y amistad incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Contexto general	7
3.2. Descripción del problema	8
3.3. Formulación del problema	9
3.4. Delimitación del problema	10
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1. General.....	15
5.2. Específicos	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	17
7. MARCO TEÓRICO.....	19
7.1. Cambio climático	19

7.1.1.	Definición.....	19
7.1.2.	Mediciones climáticas	20
7.1.2.1.	Temperatura.....	21
7.1.2.2.	Precipitación.....	21
7.2.	Despacho económico.....	22
7.2.1.	Definición.....	22
7.2.2.	Precio spot	22
7.2.3.	Intercambios de electricidad.....	23
7.3.	Despacho de generación	23
7.3.1.	Despacho hidrotérmico	24
7.3.2.	Tecnologías de generación en Guatemala.....	24
7.3.2.1.	Generación hidráulica	26
7.3.2.2.	Generación eólica	26
7.3.2.3.	Generación geotérmica	27
7.3.2.4.	Generación solar	27
7.3.2.5.	Generación térmica	28
8.	MARCO CONCEPTUAL	29
8.1.	Sistema Nacional Interconectado.....	29
8.2.	Vulnerabilidad ambiental	29
9.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	31
10.	METODOLOGÍA	35
10.1.	Características del estudio	35
10.1.1.	Diseño	35
10.1.2.	Enfoque.....	35
10.1.3.	Alcance.....	36
10.1.4.	Unidad de análisis	36

10.2.	Variables.....	37
10.3.	Fases del desarrollo de la investigación	38
10.3.1.	Fase 1: revisión bibliográfica y establecimiento del horizonte de tiempo	38
10.3.2.	Fase 2: recopilación de datos históricos	39
10.3.3.	Fase 3: descripción y preparación de escenarios de simulación	39
10.3.4.	Fase 4: análisis estadístico para las alteraciones de precios	40
10.3.5.	Fase 5: estadística descriptiva para la relación entre vulnerabilidades en el sector eléctrico	40
10.3.6.	Fase 6: interpretación de resultados.....	41
10.4.	Resultados esperados	42
11.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	45
12.	CRONOGRAMA.....	47
13.	FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	49
14.	REFERENCIAS.....	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Árbol de problemas	9
2.	Matriz de generación eléctrica hasta el 2021	25
3.	Cronograma de actividades.....	47

TABLAS

I.	Definición teórica y operativa de variables	37
II.	Clasificación de las variables	38
III.	Matriz de coherencia extendida.....	42
IV.	Continuación matriz de coherencia extendida.....	43
V.	Recursos financieros.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\$	Dólar estadounidense
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
°K	Grados Kelvin
h	Horas
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
m^3/s	Metro cúbico por segundo
m / s	Metro por segundo
mm	Milímetros
%	Porcentaje
P	Potencia

GLOSARIO

ACE	Error de Control de Área.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
CDC	Centro de Despacho de Carga.
EOR	Ente Operador Regional.
ERCOT	<i>Electric Reliability Council of Texas.</i>
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission.</i>
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
MM	Mercado Mayorista.
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration.</i>
OS/OM	Operador de Sistema / Operador de Mercado.
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de Datos.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.

Spot

Costo del MWh en Guatemala.

Vatio

Unidad de medida de potencia.

RESUMEN

Para poder comprender los efectos que la variabilidad climática puede presentar en los despachos de generación dentro del Sistema Nacional Interconectado es importante analizar los efectos dentro de un período establecido del año. Las tendencias a los cambios climáticos que se han presentado en los últimos años hacen de interés realizar estudios relacionados con este tema para identificar los impactos que pueden tener en el desarrollo del mercado eléctrico de Guatemala.

El presente diseño de investigación contiene los detalles necesarios para el desarrollo del trabajo de graduación para la maestría de Gestión de Mercados Eléctricos Regulados. Se presentan los antecedentes que se tienen de investigaciones anteriores que se han desarrollado respecto a los efectos que la variabilidad climática ha tenido en sistemas eléctricos de otras regiones. También se describen los fundamentos teóricos que respaldan el desarrollo de la investigación. De igual forma se incluye la propuesta de estructura metodológica con la cual se ejecutará la investigación.

Con esta investigación se pretende analizar los impactos que la variabilidad climática ha presentado para los despachos de generación del sistema eléctrico de Guatemala específicamente para los períodos de poca lluvia conocidos como época seca. Se espera que los resultados encontrados en el trabajo final sean de utilidad para el subsector eléctrico de Guatemala.

1. INTRODUCCIÓN

Las variaciones en el clima se han estado expresando cada vez más notorias en los últimos años. Existen muchos estudios en los que se consideran los posibles efectos que estas variaciones pueden presentar en los sistemas. El presente trabajo de investigación pretende abordar un diseño para el análisis de los posibles impactos que se pudieron para los despachos de generación debido a estos cambios climatológicos.

Guatemala se ha identificado como uno de los países propensos para ser afectados por cambios climáticos bruscos, a los cuales se le puede atribuir una vulnerabilidad a su sistema nacional de electricidad. Con este trabajo de investigación se pretende analizar como algunos elementos del mercado eléctrico del país se pudieron ver afectados por las variaciones climáticas en los períodos de tiempo en los que la generación hidráulica no se encuentra completamente disponible, conocidos estos como época seca.

Al completar el desarrollo de la investigación se pretende encontrar si existe algún tipo de relación entre las variaciones climáticas sobre los despachos de generación, los precios de oportunidad para el mercado eléctrico y los intercambios de energía realizados en los últimos tres años. Si se llegara a encontrar alguna, también es de interés presentar las consideraciones que se pueden preparar para los años futuros.

La investigación consta de las siguientes secciones: primero se desarrollan los antecedentes de otras investigaciones relacionadas con temas de variaciones climáticas y sus impactos en sistemas eléctricos. Luego se expone el planteamiento del problema y la justificación que le dan los motivos para desarrollarla. Seguido de estas, se presentan los objetivos y las necesidades a cubrir. Luego se tiene la sección de marco teórico, para definir los conceptos para las variables con las que se desarrollará la investigación. Por último, se presenta la metodología a utilizar para la ejecución del trabajo, finalizando con un cronograma propuesto y su factibilidad.

2. ANTECEDENTES

Existen trabajos de investigación en los que se describen los efectos que el cambio y la variabilidad climática tienen para tecnologías específicas de generación. Se mencionan aportes importantes en impactos que se han observado para la generación hidráulica, eólica y solar así también como en la demanda de energía eléctrica. También se han trabajado en investigaciones que evalúan los efectos de la variabilidad climática tiene en otros ámbitos ajenos a la energía eléctrica, de donde se pueden resaltar las metodologías utilizadas para analizar los cambios en el clima.

Solaun y Cerdá (2019) discuten varias metodologías que se están utilizando en investigaciones haciendo énfasis en cuatro enfoques: análisis de riesgo, tipo de tecnología, área geográfica y análisis económicos. En su trabajo hablan sobre los estudios más relevantes de los impactos que la variabilidad climática tiene sobre las tecnologías de generación renovable, haciendo énfasis en la generación hidráulica, eólica y solar. Sus análisis tienen una revisión global de los posibles impactos, y concluyen que: “Desde un punto de vista geográfico, Europa es por mucho el área más estudiada”. (pág. 13).

Continuando con el tipo de generación hidráulica, Qin, et al (2020) realizan un trabajo específico para el impacto que la variabilidad climática puede tener en el Reservoirio de las Tres Gargantas (“*Three Gorges Reservoir*”) localizado aguas arriba del río Yangtze en China. Presentan metodologías utilizadas para crear modelos hidrológicos que simulan flujos de los caudales de los ríos y entradas al reservorio al igual que la simulación de generación hidráulica con base de un balance de masa utilizando los datos del modelo. En sus resultados se discute como el cambio climático puede alterar la distribución de los caudales de los ríos, afectando la eficiencia operacional de las hidroeléctricas.

Para el estudio de los efectos en generación eólica y solar Craig, et al (2019) evaluaron los impactos que la variabilidad climática puede tener en estas tecnologías, y los efectos consecuentes en la operación de sistemas de potencia. Para la investigación se limitaron al sistema de potencia del ERCOT, y verificaron la generación solar con referencias en cambios climáticos. Como parte de su discusión, hacen mención de que: “Esta investigación puede ser expandida en varias maneras. De primero, mientras nos enfocamos en el impacto del cambio climático en el potencial de generación eólico y solar, el cambio climático puede afectar otros componentes del sistema de potencia, de forma notable la demanda de electricidad”. (pág. 10).

En otras investigaciones se han realizado estudios específicos de los efectos que la variabilidad climática tiene en la demanda eléctrica, como lo exponen Ralston, et al (2019). En su trabajo se realizaron distintos modelos utilizando datos de demanda de la FERC, datos meteorológicos de la universidad de Idaho; para llegar a simular un patrón de despacho económico que minimiza el costo total de generación. Con los modelos que crearon, pudieron realizar predicciones para el comportamiento de la demanda en los próximos años.

Al final concluyeron que: La variabilidad climática puede llegar a afectar los modelos de las curvas horarias para la demanda. También indican que: “Estos efectos pueden tener implicaciones para el despacho de plantas de generación, y afectar los costos del suministro de potencia”. (pág. 14).

Finalmente se pueden mencionar investigaciones en las que se realizan compilaciones de estudios de impactos de la variabilidad climática para diversas tecnologías de generación. En el artículo de Cronin, et al (2018) se discute sobre los puntos en que las investigaciones concuerdan y no lo hacen, para la dirección y magnitud de los impactos, al igual que las áreas de investigación que deberían ser priorizadas. Se presenta una revisión de los impactos que se tienen por diversos tipos de tecnología de generación. También se analizan las principales fuentes de discordia en los resultados de otras investigaciones, que se resumen en: las proyecciones climáticas utilizadas para las entradas de los modelos y las suposiciones utilizadas para los mismos. En la investigación se llega a la conclusión que los próximos estudios de impactos se deberían de realizar para sistemas de energía de países en vías de desarrollo, debido a la escasez de trabajos sobre el tema.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Contexto general

“Los fenómenos extremos, como las sequías, los ciclones y El Niño-Oscilación del Sur, se presentan de forma recurrente tanto en Centroamérica como en el Caribe, y su intensidad aumenta con el cambio climático.” (Bárcena et al, 2020, p.116). La variabilidad climática es un tema que se ha estado presentando en las últimas décadas. Tomando en cuenta que Guatemala se encuentra en una región catalogada como vulnerable a estos cambios, es fundamental considerar los posibles efectos que se podrían presenciar en sus sistemas.

Los cambios en las condiciones climáticas que se han evidenciado en los últimos años pueden llegar a tener repercusiones para el sistema nacional interconectado de electricidad (SNI). Alteraciones climatológicas extremas, no solo pueden llegar a afectar los suministros de combustibles que se utilizan en algunas plantas de generación, sino que también podrían influir en la forma en que se desarrolla el mercado eléctrico de la región.

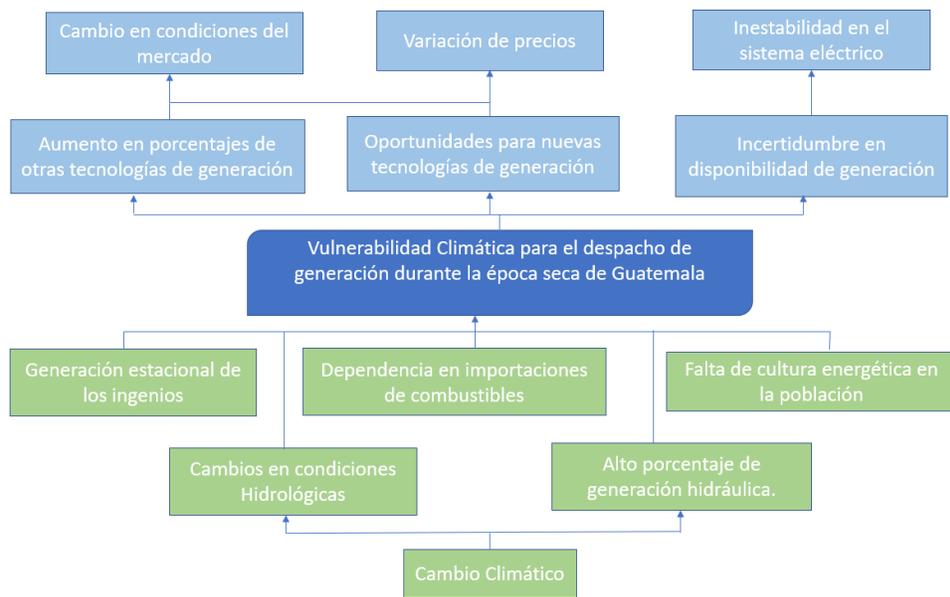
3.2. Descripción del problema

La variabilidad climática está incrementando la probabilidad de la frecuencia de eventos extremos y Guatemala, está catalogada como uno de los países más vulnerables al cambio climático (CEPAL ,2012). La matriz energética para el subsector eléctrico de Guatemala está compuesta en un mayor porcentaje por energía hidroeléctrica. Para los períodos de época seca este tipo de generación se ve reducido, aumentando la dependencia que se tiene con otros tipos de tecnologías.

Las tendencias en los cambios están jugando un papel importante al delimitar los períodos que se catalogan como secos. Al incrementar el lapso de estos períodos, y disminuir la disponibilidad para algunas tecnologías de generación se puede incrementar la vulnerabilidad del SNI; alterando los precios del mercado, modificando la matriz energética del subsector eléctrico, y cambiando los modelos de despacho de generación.

Con lo expuesto anteriormente se realizó un esquema de causas y consecuencias para identificar una interrogante principal:

Figura 1. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

3.3. **Formulación del problema**

Para realizar la formulación del problema se planteó una pregunta central la cual se apoya de tres preguntas auxiliares. Las preguntas formuladas fueron las siguientes:

- **Pregunta central**

Con estas premisas se origina la interrogante principal ¿Cómo está afectando la variabilidad climática a los despachos de generación durante la época seca en Guatemala?

- **Preguntas auxiliares**

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

1. ¿Qué tecnologías de generación han variado en su despacho durante la época seca entre el 2019 y el 2022?
2. ¿Cómo se afectarían los precios del mercado eléctrico, al presentarse cambios bruscos en el despacho de generación de Guatemala?
3. ¿Cuáles son los principales riesgos que la variabilidad climática puede traer al sistema nacional interconectado de Guatemala?

3.4. Delimitación del problema

Para la realización del estudio, se plantearon las siguientes delimitaciones:

- Delimitación contextual

El impacto de la variabilidad climática se contextualizó dentro del despacho de generación de Guatemala involucrando las siguientes variables de estudio: las condiciones climáticas del país, la cantidad de energía eléctrica despachada por tecnología y el precio spot.

- Delimitación geográfica

Los datos del estudio se limitaron principalmente al despacho de generación de Guatemala, y los efectos que se pudieron llegar a presentar con los países vecinos: interconexión con México y el Sistema Eléctrico Regional (SER).

- Delimitación histórica

El estudio se realizó con datos del período del noviembre 2019, hasta abril de 2022. Esto para estudiar 3 períodos de época seca en Guatemala para los cuales se presentan menores rangos de generación hidráulica.

4. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación se encuentra en las líneas de investigación de análisis y tendencias en la matriz energética nacional, regional, global y de análisis e impactos de la variabilidad climática en los sistemas energéticos las cuales son parte del programa de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

La variabilidad climática es un tema que se ha estado presentando y estudiando en los últimos años. Estos cambios están afectando la interacción del ser humano con su entorno y los efectos pueden llegar a alcanzar a los sistemas de electricidad los cuales se han vuelto un aspecto importante para el desarrollo de la sociedad.

Con la realización de esta investigación se obtendrá un estudio práctico de la relación entre las variaciones climáticas y los despachos de generación eléctrica durante la época seca y con esto poder comprender las tendencias de generación que se pueden presentar en los próximos años. El estudio pretende apoyar al subsector eléctrico de Guatemala, brindando un análisis de efectos y vulnerabilidades que se podrían llegar a tener por estos fenómenos.

Al analizar cuáles son los impactos que se podrían presentar debido a estos sucesos, se llegarán a evaluar los cambios en las condiciones del mercado eléctrico de Guatemala: posibles variaciones en la utilización de algunos tipos de tecnologías de generación durante períodos de época seca y las variaciones en los precios del mercado. Con esto poder plantear formas en las que el SNI se puede robustecer en preparación a los futuros escenarios que podrían llegar a presentarse, si se logra identificar una relación entre los cambios climáticos y los despachos de generación.

5. OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos propuestos para la presente investigación.

5.1. General

Determinar si la variabilidad climática es o no es una causa de los cambios en los despachos de generación durante la época seca.

5.2. Específicos

- Analizar las tendencias y variaciones en los porcentajes de generación despachados evaluando distintos escenarios.
- Identificar posibles alteraciones de precios en el mercado eléctrico para confirmar o refutar que las variaciones climáticas tienen un efecto directo sobre las mismas.
- Examinar las vulnerabilidades existentes del sistema nacional interconectado de Guatemala y sus relaciones con la variabilidad climática.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Con la presente investigación se pretende realizar un análisis de los posibles impactos que las variaciones climáticas pueden estar causando para los despachos de generación en el sector eléctrico guatemalteco. Estos también pueden ser causa de variaciones en los precios de mercado. Con los resultados que se obtendrán se espera poder encontrar la relación entre los fenómenos climáticos y los despachos de generación, para poder apoyar con la prevención de posibles escenarios desfavorables que la variabilidad climática pueda presentar en el futuro para el mercado eléctrico de Guatemala.

La maestría de gestión de mercados eléctricos regulados cuenta con una línea de investigación para el análisis y los impactos de la variabilidad climática en los sistemas de energía. Es importante contar con investigaciones que logren relacionar estas variaciones con los mercados eléctricos regulados, y así tener herramientas para comprender sus implicaciones. La originalidad del trabajo se presenta al delimitar los datos del estudio a los últimos tres períodos de época seca del país y realizar el enfoque en los despachos de generación.

El estudio estará separado en 6 fases de las cuales se comienza con: la recopilación bibliográfica; seguido por la obtención de datos históricos de los últimos 3 períodos de época seca; luego se tendrá la creación de modelos y escenarios simulados por medio del software PSS®E y el lenguaje de programación Python. Para las últimas fases se tendrá el análisis estadístico y la interpretación de los resultados obtenidos.

7. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los fundamentos teóricos que sustentan las variables que se utilizarán para la investigación.

7.1. Cambio climático

Según el trabajo de Jesse et al, (2019) el clima del planeta tierra ha sido influenciado por diversos gases producidos por las actividades del ser humano de los cuales se puede mencionar: dióxido de carbono, metano, y el óxido nitroso. Mencionan que estos cambios en las concentraciones de gases se han relacionado a los cambios en comportamiento climatológico del planeta. Agregan que los escenarios climáticos predicen consecuencias graves que se pueden llegar a presentar, debido a estos cambios, los cuales afectarían la forma en que la humanidad interactúa con los ecosistemas.

7.1.1. Definición

Para entender lo que implican las variaciones climáticas a lo largo del tiempo, se puede utilizar la siguiente definición:

El cambio climático se manifiesta fundamentalmente en el aumento de la temperatura media mundial, la modificación de los patrones de precipitación, el alza continua del nivel del mar, la reducción de la criósfera y la acentuación de los patrones de fenómenos climáticos extremos. (Bárcena et al, 2020.p. 21)

Dentro del Plan Nacional de Cambio Climático (PNCC) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) del gobierno de El Salvador, se presenta una descripción de los escenarios climáticos que se pueden presentar a nivel global. Estos escenarios los define como “una descripción plausible y generalmente simplificada sobre cómo puede evolucionar en el futuro el clima”. (p.27). En las proyecciones presentadas para los escenarios se mencionan intensificaciones en los períodos de calores extremos, en los eventos de severos de humedad y calor y la variabilidad del ciclo del agua.

7.1.2. Mediciones climáticas

Para tener un marco de comparación de los cambios que se han manifestado en el clima, es necesario contar con mediciones de variables climáticas en distintos años y así poder analizar las tendencias que se han tenido. El MARN en su Plan Nacional de Cambio Climático (2022), menciona trayectorias o caminos representativos y concentración que han sido evaluadas por el IPCC y a los que se les denomina RCP por sus siglas en inglés. También indica que “Las variables consideradas fueron precipitación, temperatura, humedad relativa, presión de superficie, velocidad y dirección de viento” (p. 32).

Algunas de estas variables consideradas para poder comparar variaciones en el comportamiento climatológico de un área, serán los principales componentes de los datos históricos a recolectar para el desarrollo de la investigación.

7.1.2.1. Temperatura

Dentro de las mediciones climáticas que se recopilarán para desarrollar la investigación, se encuentra la temperatura. Esta se puede definir según Sánchez, (2018) como “la propiedad de los sistemas que determina si están en equilibrio térmico, el concepto deriva de medir el grado de caliente o frío relativo” (p.19).

Para el sistema métrico se utiliza la unidad de medida de grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), pero también se pueden encontrar otras dos unidades de medida en grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) y grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$). Las mediciones de temperatura para Guatemala se realizan generalmente con los grados Celsius, por lo que se trabajará con estas unidades.

7.1.2.2. Precipitación

Otra de las mediciones climatológicas que se considerará para el estudio, será el de la precipitación. Para esta se puede utilizar la siguiente definición como “cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre” (Sánchez, 2018, p.20). Dentro de su investigación Sánchez luego de presentar la definición también indica que existen varios tipos de precipitaciones en los que se puede mencionar las ciclónicas, de convención y las orográficas. Las unidades de medida que se utilizan para registrar estos datos son de milímetros de agua.

Los datos de precipitación serán utilizados para determinar cambios en las cantidades de lluvias que se registraron para los períodos de época seca que se analizarán en la investigación. Con estos se tendrá también una referencia para la disponibilidad de algunas plantas de generación en el país.

7.2. Despacho económico

Como parte de las variables a utilizar en el estudio se tomarán en cuenta algunas características del mercado eléctrico de Guatemala. Estas estarán conformadas principalmente por el despacho económico que se genera para la liquidez en las transacciones de electricidad.

7.2.1. Definición

Para la definición del despacho económico de electricidad, Lutín, (2021) presenta una definición encontrada en otras investigaciones. Se presenta un concepto que indica que el despacho económico “determina la salida de potencia activa de cada planta generadora, necesaria para alimentar la carga del sistema, minimizando el costo operativo total, respetando criterios de calidad del servicio.” (p.17).

7.2.2. Precio spot

Uno de los componentes fundamentales de los despachos económicos que se realizan en el país es el del precio spot o precio de oportunidad de la energía. Para este concepto se puede analizar el propuesto en la Norma de Coordinación Comercial número 4 del AMM:

El Precio de Oportunidad de la Energía 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. El Costo Marginal de Corto Plazo corresponde al máximo costo variable de las unidades generadoras, en el Nodo de Referencia, que

fueron convocadas por el Despacho Económico y resultaron operando en función de su costo variable de acuerdo al resultado del despacho diario, respetando los requerimientos de Servicios Complementarios. (Administrador del Mercado Mayorista, 2015, p. 1-2).

Este precio será utilizado como una de las variables de estudio para la evaluación del impacto en los años delimitados para la investigación.

7.2.3. Intercambios de electricidad

Durante el período de realización de la investigación, Guatemala todavía pertenece al Mercado Eléctrico Regional. También se encuentra interconectado eléctricamente con México. Para estas dos regiones, se realizan intercambios de energía eléctrica, que según Lutín (2021) “las transacciones internacionales de electricidad obedecen a convenios internacionales y se armonizan con la regulación para el funcionamiento hacia el mercado interno” (Saavedra, 2016, p. 14), lo cual abarca las transacciones internacionales de importación y exportación de electricidad.” (p.15).

7.3. Despacho de generación

Los despachos de generación en Guatemala son efectuados por el Centro de Despacho de Carga (CDC), del Administrador del Mercado Mayorista (AMM). Con este se realiza la convocatoria ordenada de las centrales generadoras según su orden de mérito, y los requerimientos que se van presentando para la operación en tiempo real del Sistema Nacional Interconectado (SNI).

7.3.1. Despacho hidrotérmico

Una parte fundamental de los despachos de generación que se realizan en Guatemala, son los despachos hidrotérmicos. Al estar comprendida principalmente por generación hídrica y térmica, la matriz de tecnologías de generación del país se puede considerar parte de los estudios de un despacho hidrotérmico. En ese sentido se presenta la siguiente definición:

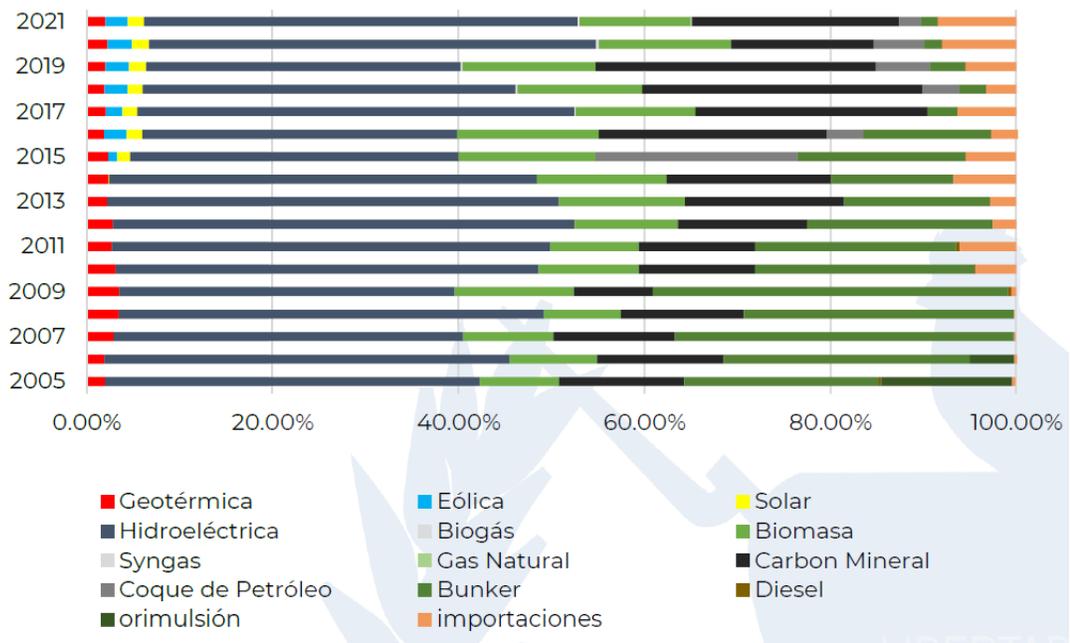
El despacho hidrotérmico es un plan que define los niveles y períodos de generación del parque termoeléctrico e hidráulico para satisfacer la demanda de energía, cumpliendo las restricciones operativas del sistema y las exigencias de reserva de energía. El objetivo del despacho es minimizar el costo operativo del sistema. (Ramírez, 2019, p.11).

7.3.2. Tecnologías de generación en Guatemala

La matriz energética de generación de Guatemala está compuesta por diversas tecnologías las cuales pueden llegar a ser afectadas según las condiciones climáticas que se presentan en el territorio nacional. Dependiendo de la época del año en que se realice un análisis, se puede notar que algunas tecnologías son más abundantes en su despacho de generación.

Esto llega a la formación de una matriz de generación que se ha estado diversificando con el transcurso del tiempo y las mejoras que se van introduciendo para el desarrollo de nuevas tecnologías. Los datos de los porcentajes de generación que se han presentado en los últimos años se pueden observar en la siguiente imagen:

Figura 2. Matriz de generación eléctrica hasta el 2021



Fuente: MEM (2022). *Plan de expansión indicativo del sistema de generación 2022 – 2052*.

Para comprender como se pueden afectar cada una de las tecnologías principales que han compuesto la matriz de generación en los últimos años, y que serán parte de los datos a utilizar, se presenta en las siguientes secciones una breve descripción de cada una de las principales. En conjunto los porcentajes conformados en los últimos años para estas tecnologías formarán parte de la variable de despacho de generación.

7.3.2.1. Generación hidráulica

La generación hidráulica, como se puede observar en los datos de (MEM, 2022) es la que contiene una mayor capacidad instalada de generación conectada al SNI.

Consiste en generar energía eléctrica al aprovechar el agua en movimiento de los ríos o para formar embalses que permitan descargar el agua de acuerdo a programas específicos. El principio es aprovechar la diferencia de altura en los cauces o del embalse con la casa de máquinas, de tal manera que el movimiento del agua permita hacer girar las turbinas que a su vez hacen girar los generadores de electricidad. (Martínez, 2016, p. 19).

7.3.2.2. Generación eólica

Esta tecnología de generación utiliza la energía eólica como fuente primaria. Según el INCYT (2018) “La energía eólica es producto del movimiento del viento, el cual se obtiene por el calentamiento de las masas de aire, ya que al calentarse pesan menos y ascienden, mientras que las masas de aire frío descienden.” (p.116).

Las instalaciones de generación eólica se han ido incrementando a lo largo de los últimos años. Según datos del MEM ahora se cuenta con una capacidad instalada de 107.4 MW cubierta por los proyectos de centrales generadoras de: San Antonio El Sitio, Viento Blanco y Las Cumbres.

7.3.2.3. Generación geotérmica

Para este tipo de tecnología se utiliza el calor producido en el interior de la tierra, como forma primaria de energía. Una ventaja de esta tecnología es que se mantiene disponible a lo largo del año, y no depende de los cambios climatológicos que se pudieran presentar en el país. Según su origen se puede mencionar que:

Generalmente se explota en zonas volcánicas, pero no se restringe solamente a ellas; a medida que se profundiza en el interior del globo terráqueo la temperatura aumenta, por lo tanto, para que un pozo de extracción de vapor pueda ser aprovechado para generar energía eléctrica sus costos de explotación deberán ser relativamente bajos. (Martínez, 2016, p. 20).

7.3.2.4. Generación solar

Según (INCYT, 2018) este tipo de generación se puede dividir en tres según el tipo de sistema que se utilice: Sistemas solares térmicos, Sistemas solares por concentración y Sistemas solares fotovoltaicos. Estos sistemas utilizan la energía solar como su fuente primaria, y además añaden que “A pesar de la ubicuidad de la energía solar en el planeta, su variabilidad y baja densidad energética presenta dificultades técnicas para su explotación” (p.106).

Guatemala tiene dos proyectos de centrales solares generadoras de gran impacto, que conforman una capacidad instalada de 80 MW: Horus I y Horus II. Este tipo de tecnología todavía se puede seguir promoviendo dentro del territorio nacional, pero se debe de considerar las intermitencias que se podrían generar para el sistema.

7.3.2.5. Generación térmica

Las tecnologías de generación que tienen como fuente primaria de energía a los combustibles fósiles y que utilizan el calor para la transformación de la misma se les clasifica como térmica.

La generación de energía eléctrica que utiliza combustibles fósiles se produce usando plantas térmicas. Por lo general, una planta térmica tiene cuatro componentes: 1) una caldera, 2) una turbina de vapor para transformar el calor en energía mecánica, 3) un generador de electricidad, y 4) un condensador para enfriar el vapor y reciclar el agua. En estos sistemas, el principal componente es el calor proveniente de la combustión del combustible fósil. (INCYT, 2018, p. 83).

Uno de los combustibles más utilizados para la generación por este tipo de tecnología es la biomasa proveniente de los ingenios azucareros. Entre otros destacados también se puede mencionar el carbón mineral y el gas natural.

8. MARCO CONCEPTUAL

8.1. Sistema Nacional Interconectado

El INCYT (2018) presenta el siguiente concepto “El Sistema Nacional Interconectado (SNI) es el encargado de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica que se produce en el país.” (p.58) También se puede agregar a la definición del SNI, citando a Martínez (2016) “Es el conjunto de líneas de transmisión y subestaciones eléctricas conectadas entre sí, que permiten la transferencia de energía eléctrica entre los diversos sistemas de generación eléctrica del país”. (p.10).

8.2. Vulnerabilidad ambiental

Se muestra un concepto de vulnerabilidad ambiental en donde se trabajó la construcción de un índice ante los choques climáticos en donde se presenta que:

La vulnerabilidad ambiental se refiere a la posibilidad de que fenómenos naturales, como tormentas, inundaciones, sequías o terremotos afecten negativamente a los hogares, tanto de manera física como socioeconómica, generando daños que incluyen pérdidas de propiedad, empleo, y fuentes de ingreso o daños a la integridad física de las personas. (Orrego, 2018, p. 27).

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio climático

2.1.1. Definición

2.1.2. Mediciones climáticas

2.1.2.1. Temperatura

2.1.2.2. Precipitación

2.2. Despacho económico

2.2.1. Definición

2.2.2. Precio spot

2.2.3. Intercambios de electricidad

2.3. Despacho de generación

2.3.1. Despacho hidrotérmico

2.3.2. Tecnologías de generación en Guatemala

- 2.3.2.1. Generación hidráulica
- 2.3.2.2. Generación eólica
- 2.3.2.3. Generación geotérmica
- 2.3.2.4. Generación solar
- 2.3.2.5. Generación térmica

3. MARCO CONCEPTUAL

- 3.1. Sistema Nacional Interconectado
- 3.2. Vulnerabilidad climática

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 4.1. Características del estudio
 - 4.1.1. Diseño
 - 4.1.2. Enfoque
 - 4.1.3. Alcance
 - 4.1.4. Unidad de análisis
- 4.2. Variables
- 4.3. Fases del desarrollo de la investigación
 - 4.3.1. Fase 1: revisión bibliográfica y establecimiento de horizonte de tiempo
 - 4.3.2. Fase 2: recopilación de datos históricos
 - 4.3.3. Fase 3: descripción y preparación de escenarios de simulación
 - 4.3.4. Fase 4: análisis estadístico para las alteraciones de precios
 - 4.3.5. Fase 5: estadística descriptiva para la relación entre vulnerabilidades del sector eléctrico
 - 4.3.6. Fase 6: interpretación de resultados
- 4.4. Resultados esperados

4.5. Técnicas de análisis de información

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6. DISCUSION DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

10. METODOLOGÍA

10.1. Características del estudio

En la siguiente sección se describen las características del estudio a realizar.

10.1.1. Diseño

El diseño del trabajo de investigación será no experimental, al no tener manipulación tanto de los datos climáticos como de despachos de generación en los años. Asimismo, por el rango de tiempo y el nivel de análisis de la información, la investigación tendrá un corte transversal-relacional al tener una recolección de datos considerando el período de época seca comprendido entre los años 2019 y 2022.

10.1.2. Enfoque

El enfoque de la investigación será de tipo mixto dado que, se trabajará con variables cuantitativas continuas, a efecto de analizar posibles impactos que la variabilidad climática presenta sobre los despachos de generación, los precios en el mercado de electricidad del país y en los intercambios de energía.

También se tendrán variables cualitativas, para indicar las posibles vulnerabilidades que la variabilidad climática pueda estar generando en el Sistema Nacional Interconectado (SNI).

10.1.3. Alcance

El estudio tendrá un alcance de tipo relacional. Como primer paso se desea identificar la concordancia entre las variables para identificar el tipo de relación entre las variaciones climáticas y los despachos de generación durante el período de análisis.

10.1.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis que se considerará en el estudio es el SNI de Guatemala, que incluye a los distintos tipos de tecnologías de generación que forman parte del programa de despacho. También se incluirán las transacciones internacionales que se tienen por medio de las interconexiones. Se obtendrán los datos climatológicos de las principales regiones de Guatemala para los períodos de época seca del año 2019 al 2022. Estos períodos se considerarán desde el mes de noviembre al mes de abril del siguiente año.

10.2. Variables

A continuación, se presentan las variables que se utilizarán en el estudio:

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

Variable	Definición teórica	Definición operativa	Indicadores
Cambio climático	Fenómeno que se manifiesta fundamentalmente en el aumento de la temperatura media mundial, la modificación de los patrones de precipitación, el alza continua del nivel del mar, la reducción de la criósfera y la acentuación de los patrones de fenómenos climáticos extremos. (Bárcena et al, 2020).	Se obtendrán los datos históricos de temperatura, humedad relativa, precipitación, y velocidad de viento de las bases de datos del INSIVUMEH, METEOBLUE y del <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (NOAA).	-Cambios en rangos máximo y mínimo de temperaturas. -Registros de precipitaciones para los períodos de análisis. -Cambios en velocidad y dirección del viento.
Despacho de Generación	Es un plan que define los niveles y períodos de generación del parque termoeléctrico e hidráulico para satisfacer la demanda de energía, cumpliendo las restricciones operativas del sistema y las exigencias de reserva de energía. (Ramírez, 2019).	Se recolectarán datos históricos publicados por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) para las cargas horarias de unidades generadoras, potencia generada por tipo de tecnología.	-Cuantificación de la potencia generada por tecnología. -Análisis de las variaciones en los tipos de generación.
Despacho Económico	Determina la salida de potencia activa de cada planta generadora, necesaria para alimentar la carga del sistema, minimizando el costo operativo total, respetando criterios de calidad del servicio. (Lutín, 2021).	La variable se desarrollará por medio de los datos del precio spot y los intercambios de electricidad que se pueden encontrar en las publicaciones del AMM y EOR.	-Variaciones en el precio de oportunidad. -Cuantificación de los intercambios.

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Clasificación de las variables**

Variable	Propiedad	Uso	Escala de medición
Temperatura [°C]	Numérica continua	Independiente	Razón
Humedad Relativa [%]	Numérica continua	Independiente	Razón
Precipitación [mm]	Numérica continua	Independiente	Razón
Velocidad de viento[m/s]	Numérica continua	Independiente	Razón
Generación por tecnología [MW]	Numérica continua	Dependiente	Razón
Precio de oportunidad de la energía [US\$/MWh]	Numérica continua	Dependiente	Razón
Intercambios de energía [MWh/día]	Numérica continua	Dependiente	Razón

Fuente: elaboración propia.

10.3. Fases del desarrollo de la investigación

El trabajo de investigación se realizará en las siguientes fases.

10.3.1. Fase 1: revisión bibliográfica y establecimiento del horizonte de tiempo

Para esta primera fase se realizará la revisión bibliográfica respecto a estudios, investigaciones y documentos relacionados a las variaciones climáticas que se han presentado en los últimos años. Estos documentos se utilizarán como una base para la investigación de las posibles causalidades que los cambios climáticos puedan estar presentando para los despachos de generación del SNI de Guatemala. También se limitarán los horizontes de tiempo que abarcarán la recopilación de datos históricos.

10.3.2. Fase 2: recopilación de datos históricos

En esta fase se procederá con la recopilación de los datos históricos de datos climáticos de temperatura, humedad relativa, precipitaciones y velocidades de viento para los rangos de meses entre noviembre y abril de los años 2019 al 2022. También se procederá con la organización y recolección de la información de los precios de oportunidad de la energía, los intercambios de energía eléctrica con México y el Sistema Eléctrico Regional (SER) y la distribución de los despachos de generación para el mismo rango de tiempo.

10.3.3. Fase 3: descripción y preparación de escenarios de simulación

Para determinar cómo han variado las tecnologías de generación en su despacho, con base a la información recolectada para los períodos de época seca anteriores, se realizarán tres escenarios de simulación. Cada escenario se realizará con la ayuda del programa PSS®E y con los datos recolectados en la fase anterior. Cada uno será acorde a un período de época seca para cada año.

Con los escenarios de cada año simulados se procederá a realizar comparaciones con los datos climatológicos y así identificar las variaciones que se han estado teniendo respecto a las tecnologías de generación despachadas.

10.3.4. Fase 4: análisis estadístico para las alteraciones de precios

Para desarrollar esta fase, se identificarán los cambios que se tuvieron para los precios del mercado eléctrico de Guatemala con respecto a las variaciones climatológicas identificadas en las primeras fases. Con la ayuda del lenguaje de programación Python, se desarrollará un programa en el cual se analizarán los comportamientos y las tendencias de los datos recolectados para el precio de oportunidad de la energía y los intercambios de electricidad con respecto a la información climatológica de los años estudiados.

10.3.5. Fase 5: estadística descriptiva para la relación entre vulnerabilidades en el sector eléctrico

Esta fase consistirá en el análisis de las posibles vulnerabilidades que se pueden estar presentando para el sector eléctrico debido a las variaciones climáticas registradas en los últimos años. Se basará en los datos recolectados de la segunda fase, y se identificará con la ayuda de estadística descriptiva las características de las variables utilizando porcentajes, la moda, la media y el promedio. A partir de esta caracterización se buscará encontrar los puntos de riesgo que se pueden tener para el SNI y su correlación con las variaciones en el clima.

10.3.6. Fase 6: interpretación de resultados

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo de las fases anteriores, se presentará un resumen de los hallazgos. Si en los resultados se presentan relaciones entre la variabilidad climática y los despachos de generación, se presentarán también propuestas para prevenir los impactos negativos que se pudieran presentar en los próximos años.

10.4. Resultados esperados

Para la presentación de este punto se utiliza la matriz de coherencia extendida, en donde se hace la relación de las preguntas de investigación, los objetivos, las fases y sus respectivos resultados esperados.

Tabla III. **Matriz de coherencia extendida**

Preguntas de investigación	Objetivos	Fases	Resultados esperados
¿Cómo está afectando la variabilidad climática a los despachos de generación en época seca en Guatemala?	Determinar si la variabilidad climática es o no es una causa de los cambios en los despachos de generación durante la época seca.	-Recopilación bibliográfica. -Recopilación de datos históricos	Encontrar las relaciones que las variaciones climáticas tienen para los despachos de generación del SNI de Guatemala durante los períodos de época seca.
¿Qué tecnologías de generación han variado en su despacho durante la época seca de los últimos 3 años?	Analizar las tendencias y variaciones en los porcentajes de generación despachados evaluando distintos escenarios.	-Descripción y preparación de simulaciones de escenarios pasados.	El determinar la relación entre el cambio climático y las variaciones en despachos de generación de los distintos tipos de tecnología que componen la matriz de generación.
¿Cómo se afectarían los precios del mercado eléctrico, al presentarse cambios bruscos en el despacho de generación de Guatemala?	Identificar posibles alteraciones de precios en el mercado eléctrico para confirmar o refutar que las variaciones climáticas tienen un efecto directo sobre las mismas.	-Análisis estadístico por medio de modelos que determinen las alteraciones que se han tenido en los precios del mercado eléctrico.	Haber determinado si ha existido una correlación entre las variaciones climáticas y las alteraciones en los precios de oportunidad de la energía e intercambios de electricidad.

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Continuación matriz de coherencia extendida**

Preguntas de investigación	Objetivos	Fases	Resultados esperados
¿Cuáles son los principales riesgos que la variabilidad climática puede traer al sistema nacional interconectado de Guatemala?	Examinar las vulnerabilidades existentes del sistema nacional interconectado de Guatemala y sus relaciones con la variabilidad climática.	-Estadística descriptiva para encontrar la relación a las vulnerabilidades en el sector eléctrico debido a las variaciones climáticas.	Lograr identificar las principales vulnerabilidades que se pueden presentar debido a las variaciones climáticas en el SNI , y sus posibles repercusiones.

Fuente: elaboración propia.

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para poder desarrollar las fases del trabajo de investigación antes descritas, será necesario utilizar distintas técnicas de análisis de información que se exponen en la presente sección.

Primero se ejecutarán las primeras dos fases de la investigación, las cuales abarcan el proceso de recolección de datos de las bases de datos de sitios públicos de climatología y de las publicaciones del Administrador del Mercado Mayorista (AMM) y el Ente Operador Regional (EOR); y la revisión de fuentes bibliográficas. La periodicidad para el estudio se establecerá en los últimos tres períodos de época seca que abarcan los siguientes meses: de noviembre 2019 a abril 2020, de noviembre 2020 a abril 2021 y de noviembre 2021 a abril 2022.

Se hará uso de la estadística descriptiva para la información recopilada en las primeras dos fases. Se utilizarán las herramientas de medidas de tendencia central y de variabilidad que incluyen media, moda, desviación estándar, varianza y promedio para poder identificar las características de los datos.

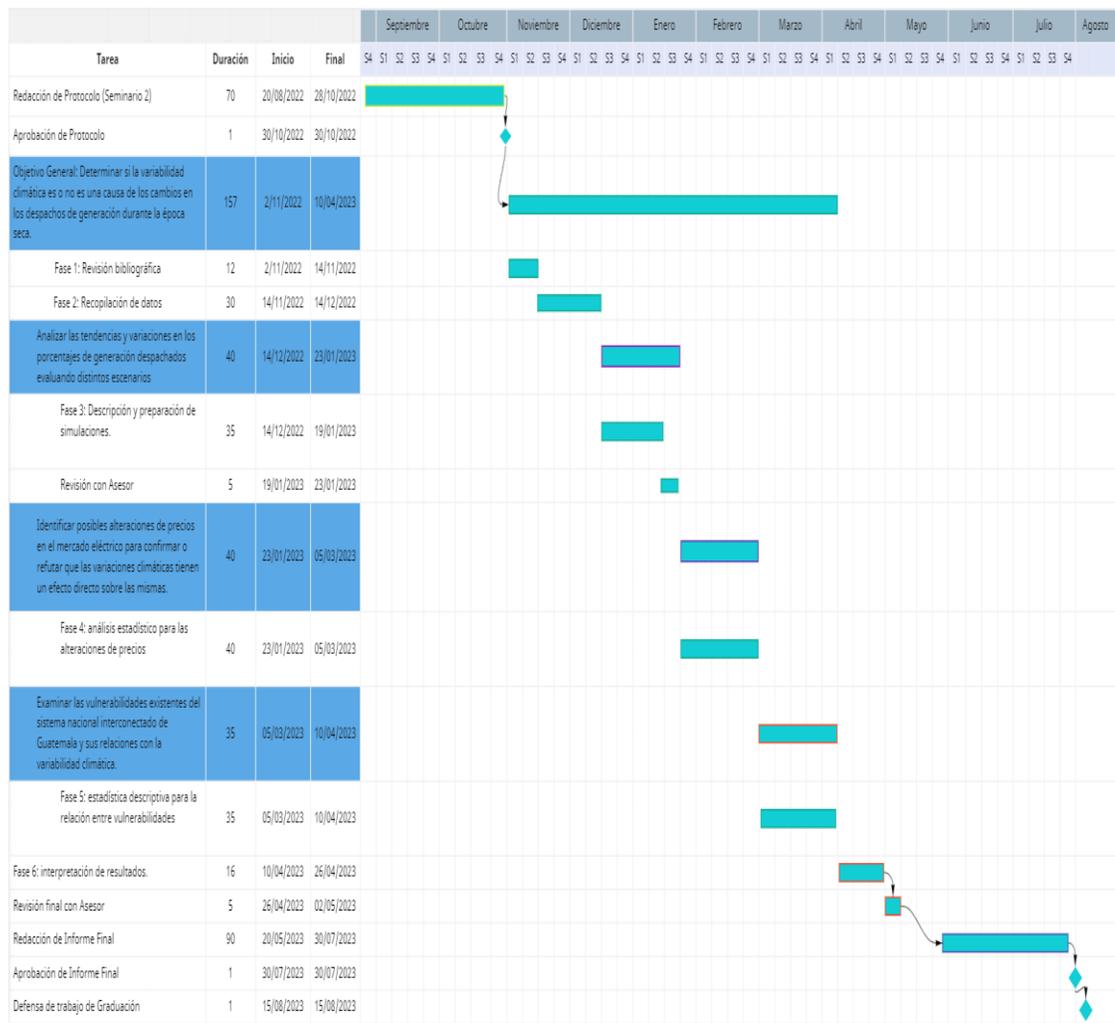
Como se estarán trabajando variables cuantitativas continuas, y para poder presentar los resultados de forma visual, se utilizarán gráficas de tipo histograma y de polígonos de frecuencia. También se requerirá la utilización de gráficas de barra y de pie, al momento de requerir una presentación más simple de los datos procesados. Con esto se pretende poder representar los comportamientos de los datos recolectados, según cada fase de desarrollo.

Para encontrar la relación entre los datos climatológicos recolectados, y los datos históricos de despachos de generación y precios del mercado eléctrico se utilizará el coeficiente de correlación según las últimas fases descritas en la metodología de la investigación.

12. CRONOGRAMA

Se presenta el cronograma de actividades para la investigación:

Figura 3. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

13. FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

Los recursos necesarios para poder llevar a cabo la investigación se describen en la presente sección:

Recurso humano: este está conformado por el estudiante investigador y el asesor de la tesis.

Recurso tecnológico: se cuenta con equipo de cómputo con características adecuadas para poder ejecutar los programas necesarios y realizar la redacción del informe. También se tiene acceso a servicios básicos de electricidad e internet.

Recurso informático: para este recurso cabe mencionar que el investigador tiene acceso por parte de su trabajo al software de simulación PSS®E. También se cuenta con los programas básicos de Microsoft Office para la realización del informe y otra documentación electrónica. El software de programación Python es de libre acceso y se puede instalar en el equipo del investigador para su uso.

Acceso a la información: se utilizarán datos con acceso público disponible para ser utilizado en la investigación.

Recurso financiero: la investigación será financiada con recursos propios del investigador. La descripción de los costos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla V. **Recursos financieros**

Descripción	Costo
Honorarios y alimentación del investigador	Q.2,500
Honorarios para el asesor	Q.500.00
Matricula estudiantil	Q.1031.00
Cursos restantes de la maestría	Q.6,600.00
Equipo de cómputo, impresora	Q.10,000.00
Servicios de electricidad e internet	Q2,500.00
Materiales para impresión	Q100.00
Gastos imprevistos	Q1200.00
Total	Q24,431.00

Fuente: elaboración propia.

Al contar con todos los recursos necesarios para poder realizar la investigación, se puede decir que la misma es factible.

14. REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (2015). *Norma de Coordinación Comercial No.4. Resolución 157-02*. Guatemala. Recuperado de https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=212NCC-4%20actualizado%2012-2015.pdf.
2. Bárcena, A., Samaniego, J., Peres, W., Alatorre, J.E., (2020). *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe. ¿Seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?* CEPAL. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/45677>.
3. Craig, M. T., Carreño, I. L., Rossol, M., Hodge, B. M., & Brancucci, C. (2019). Effects on power system operations of potential changes in wind and solar generation potential under climate change. *Environmental Research Letters*, 14(3), 034014. Recuperado de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaf93b/meta>.
4. Cronin, J., Anandarajah, G., & Dessens, O. (2018). Climate change impacts on the energy system: a review of trends and gaps. *Climatic change*, 151(2), 79-93. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-018-2265-4>.

5. Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología de la Universidad Rafael Landívar. (2018). *Perfil energético de Guatemala: bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*. Guatemala. Recuperado de <http://www.infoiarna.org.gt/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-Energetico-de-Guatemala.pdf>.
6. Jesse, B.J, T., Heinrichs, H. U., Kuckshinrichs, W.(2019). Adapting the theory of resilience to energy systems: a review and outlook. *Energy, Sustainability and Society*, 9(1), 1-19. Recuperado de <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0210-7>.
7. Lutín, V. (2021). *Estudio de seguridad energética del parque generador de electricidad de Guatemala ante escenarios de pérdida de generación de las centrales San José y Jaguar Energy* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
8. Martínez, B.E. (2016). *Suministro de energía eléctrica con paneles solares individuales a la aldea Searranx, Livingston, Izabal*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
9. Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Plan de expansión indicativo del sistema de generación 2022 – 2052*. Guatemala. Recuperado de <https://mem.gob.gt/blog/ministerio-de-energia-y-minas-presenta-plan-indicativo-del-sistema-de-generacion-2022-2052/>.
10. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022). *Plan nacional de Cambio Climático, 2022-2026*. El Salvador, Centroamérica. Recuperado de <https://cidoc.marn.gob.sv/documentos/consulta-publica-del-plan-nacional-de-cambio-climatico/>.

11. Orrego J.C., Barinas, S., Breton, M., Pérez, A.M, Martín, P., Salama, J.M, Román, P., (2018) *Índice de vulnerabilidad ante choques climáticos*. ONU, PNUD, República Dominicana. Recuperado de <https://www.undp.org/es/latin-america/publications/indice-de-vulnerabilidad-ante-choques-climaticos>.
12. Qin, P., Xu, H., Liu, M., Du, L., Xiao, C., Liu, L., & Tarroja, B. (2020). Climate change impacts on Three Gorges Reservoir impoundment and hydropower generation. *Journal of Hydrology*, 580, 123922. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419306420>.
13. Ramírez, M.V. (2019). *Mantenimiento óptimo multiobjetivo de la generación, coordinado con despacho hidrotérmico, considerando toma de decisiones multicriterio*. (Tesis de doctorado). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
14. Ralston Fonseca, F., Jaramillo, P., Bergés, M., & Severnini, E. (2019). Seasonal effects of climate change on intra-day electricity demand patterns. *Climatic Change*, 154(3), 435-451. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-019-02413-w>.
15. Sánchez, B (2018). *Estudio de los efectos de la variabilidad climática en el corredor florícola del sur del Estado de México*. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, México.

16. Solaun, K., & Cerdá, E. (2019). Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 116, 109415. Recuperado de <https://dadun.unav.edu/handle/10171/59566>.