



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial
Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados

**IMPACTO DEL AUMENTO DE TEMPERATURA MEDIA DEL AMBIENTE EN EL PROMEDIO
DE GENERACIÓN REAL DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA**

Lic. Jorge Ixcamparij Nolasco

Asesorado por el Mtro. Ing. Edwin Mariano Cornejo Cotí

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPACTO DEL AUMENTO DE TEMPERATURA MEDIA DEL AMBIENTE EN EL PROMEDIO
DE GENERACIÓN REAL DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

Lic. JORGE IXCAMPARIJ NOLASCO

ASESORADO POR EL MTRO. ING. EDWIN MARIANO CORNEJO COTÍ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN GESTIÓN DE MERCADOS ELÉCTRICOS REGULADOS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Ing. 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. Kewin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez.

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRACTICO

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Benedicto Estuardo Martínez Guerra
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

IMPACTO DEL AUMENTO DE TEMPERATURA MEDIA DEL AMBIENTE EN EL PROMEDIO DE GENERACIÓN REAL DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 30 de junio de 2020.

Lic. Jorge Ixcamparij Nolasco



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 731.2021

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 Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **IMPACTO DEL AUMENTO DE TEMPERATURA MEDIA DEL AMBIENTE EN EL PROMEDIO DE GENERACIÓN REAL DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA**, presentado por la **Licenciado Jorge Ixcamparij Nolasco**, estudiante del programa de **Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, septiembre de 2021

AACE/cc



Guatemala, noviembre de 2021

LNG.EEP.OI.143.2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

**“IMPACTO DEL AUMENTO DE TEMPERATURA MEDIA DEL AMBIENTE
EN EL PROMEDIO DE GENERACIÓN REAL DE UNA PLANTA
GEOTÉRMICA”**

presentado por **Jorge Ixcamparij Nolasco** quien se identifica con carné **9531041** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Gestión de mercados eléctricos regulados** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**



Guatemala, 23 de noviembre 2020.

M.Sc. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

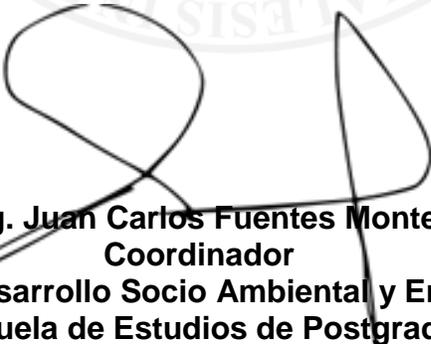
M.Sc. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** del trabajo de graduación titulado: **“Impacto del Aumento de Temperatura Media del Ambiente en el Promedio de Generación Real de una Planta Geotérmica”** del estudiante: **Jorge Ixcamparij Nolasco** quien se identifica con número de carné **009531041** del programa de **Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,


M.Sc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Área de Desarrollo Socio Ambiental y Energético
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC



Guatemala, 30 octubre 2020.

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

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación del estudiante Jorge Ixcamparij Nolasco, Carné número 009531941, cuyo título es "**IMPACTO DEL AUMENTO DE TEMPERATURA MEDIA DEL AMBIENTE EN EL PROMEDIO DE GENERACIÓN REAL DE UNA PLANTA GEOTÉRMICA**", para optar al grado académico de Maestro en Artes Mercados Eléctricos Regulados, he procedido a la revisión del mismo.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



Ing. Edwin Mariano Cornejo Cotí.
Mtro. En Tecnología y Sostenibilidad Energética
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su misericordia, gran amor y ser mi amigo fiel, por haberme permitido culminar esta etapa maravillosa de mi vida.
Mis padres	Por su amor, mi agradecimiento hasta la eternidad, serán siempre mi inspiración.
Mi esposa	Por su apoyo y comprensión en el transcurso de mi formación Universitaria, entre otras cosas.
Mis hijos	Beatriz, Nikte' y Cristian Ixcamparij, por ser tres preciosos seres que inspiran mi vida.
Mi familia en general	Por sus muestras de apoyo y su inmenso cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por formarme como profesional al servicio de las personas y permitirme alcanzar mis metas.
Escuela de estudios de posgrado	Por brindarme los conocimientos requeridos para desarrollarme como Maestro en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados. Con aprecio al: Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque; Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí; Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera y Mtro. Ing. Pablo de León.
Mi asesor	Mtro. Ing. Edwin Mariano Cornejo Cotí, por asesorarme y apoyar la realización y culminación de esta investigación.
Mis catedráticos	Por compartir sus conocimientos y experiencias en la enseñanza de esta profesión. Con singular aprecio al Mtro. Ing. Luis Arturo Cerna Rich; Dr. Renato Giovanni Ponciano Sandoval; Mtro. Ing. German A. Juárez Vidaurre y Mtro. Ing. Benedicto Esturdo Martínez Guerra.
Mis compañeros	Por su amistad, confianza y apoyo durante nuestra formación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1. Estudios previos	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. La energía geotérmica.....	5
2.1.1. Energías convencionales.....	7
2.1.2. Energías renovables.....	8
2.1.3. Usos de la energía geotérmica.....	8
2.2. Impactos ambientales de los proyectos geotérmicos	9
2.2.1. Cambio climático	10
2.2.2. Cambio climático global.....	10
2.3. Meteorología en Guatemala	11
2.3.1. Gases de efecto invernadero y sus consecuencias	12
2.3.2. Ciclo global del carbono	13
2.4. La eficiencia energética como factor clave del desarrollo.....	13
2.4.1. Sostenibilidad ambiental y energía geotérmica	14

2.4.2.	Desarrollo sostenible	14
2.4.3.	Antecedentes de desarrollo sostenible.....	15
2.4.4.	Desarrollo sostenible de la matriz energética.....	15
2.5.	Generación eléctrica en Guatemala de energía geotérmica y el rendimiento de máquinas térmicas	16
2.5.1.	Calentamiento global y deficiencia en el rendimiento de máquinas térmicas.....	17
2.6.	Termodinámica y energía.....	18
2.6.1.	Máquinas térmicas	19
2.6.2.	Rendimiento y análisis de las máquinas térmicas De generación geotérmica	19
2.6.3.	Condensadores enfriados con aire.....	19
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACION	21
3.1.	Características del estudio	21
3.1.1.	Enfoque del estudio.....	21
3.1.2.	Alcance de la investigación	21
3.1.3.	Diseño del estudio.....	22
3.2.	Unidad de análisis	23
3.3.	Variables	23
3.4.	Fases del estudio	24
3.4.1.	Revisión de literatura.....	24
3.4.2.	Recolección de datos	25
3.4.3.	Análisis de la información.....	27
3.4.4.	Modelación de datos	28
3.5.	Técnicas de análisis de la información.....	28
3.5.1.	Correlaciones bivariadas	28
3.5.2.	Diagramas de dispersión.....	30
3.5.3.	El coeficiente de correlación de PEARSON	30

3.5.4.	El coeficiente de determinación	31
3.5.5.	La regresión lineal	31
3.5.6.	Regresión logarítmica.....	33
3.5.7.	Índice de variación estacional.....	33
3.5.8.	Medidas de tendencia central	33
3.5.9.	Media.....	34
3.5.10.	Mediana.....	34
3.5.11.	Moda.....	34
3.5.12.	Varianza	35
3.5.13.	Desviación estándar	35
3.5.14.	Rango	35
3.5.15.	Medidas de distribución	36
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	37
4.1.	Impacto del aumento de temperatura ambiente en el rendimiento de los equipos de generación eléctrica de una central geotérmica y su repercusión en la generación neta.....	37
4.2.	Describir la variación estacional anual de la temperatura Ambiente registrada en el período analizado y su incidencia En los meses más calurosos en la generación eléctrica de la planta.....	48
4.3.	Factores que inciden en un mejor rendimiento de los condensadores enfriados por aire, para mejorar el intercambio de calor y la generación eléctrica de la Central Geotérmica	51
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55
5.1.	Existencia de una correlación directa al evaluar la temperatura ambiente y la generación de energía	

	eléctrica neta de la central geotérmica.....	55
5.2.	Incidencia de la temperatura ambiente en la generación eléctrica de la central geotérmica.....	59
5.3.	Incidencia de otros factores ambientales en el rendimiento de los condensadores enfriados por aire	62
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES	69
	REFERENCIAS.....	71
	ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Histograma temperatura ambiente	38
2. Histograma de energía GWh.....	39
3. Diagrama de dispersión, consolidado 2008 - 2018.....	41
4. Diagrama de dispersión, modelo regresión logarítmica consolidado 2008 2018.....	42
5. Diagrama de dispersión, año 2008.....	43
6. Diagrama de dispersión, año 2009.....	43
7. Diagrama de dispersión, año 2012.....	44
8. Diagrama de dispersión, año 2014.....	44
9. Diagrama de dispersión, año 2017.....	45
10. Diagrama de dispersión, año 2018.....	45
11. Diagrama de dispersión, año 2010.....	46
12. Diagrama de dispersión, año 2011.....	46
13. Diagrama de dispersión, año 2013.....	47
14. Diagrama de dispersión, año 2015.....	47
15. Diagrama de dispersión, año 2016.....	48
16. Índice estacional, temperatura ambiente.....	49
17. Índice estacional, energía GWh	50
18. Histograma velocidad del viento.....	51
19. Índice estacional velocidad del viento	52
20. Diagrama de dispersión de datos, velocidad del viento.....	52
21. Histograma humedad relativa.....	53
22. Índice estacional humedad relativa	54

23. Diagrama de dispersión de datos, humedad relativa	54
---	----

TABLAS

I. Datos estadísticos temperatura ambiente.....	37
II. Datos estadísticos energía GWh	38
III. Datos correlación	40
IV. Resumen de resultados, moledo de regresión logarítmica	41
V. Organización de los meses del año, para modelar el IVE	48
VI. Datos factor estacional temperatura ambiente	49
VII. Datos factor estacional energía GWh	50
VIII. Datos del factor estacional velocidad del viento	51
IX. Datos factor estacional, humedad relativa	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CO₂	Dióxido de Carbono
GW	Gigavatio
° C	Grados Celsius
MW	Megavatio
CO	Monóxido de Carbono
NO_x	Óxido de Nitrógeno
kg	Kilogramo
kJ	Kilojulio
kW	kilovatio
kWh	Kilovatio hora
W	Trabajo

GLOSARIO

ACC	Condensadores secos refrigerados por aire.
Campo geotérmico	Es el sitio donde se ubican los pozos geotérmicos que desde la superficie conectan con el reservorio y es a través de éstos que se extrae el vapor que mediante una red de tuberías denominado sistema de acarreo, se conduce hacia la central generadora, donde la energía calorífica del vapor se convierte en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica.
Correlación	Es una medida estadística que expresa hasta qué punto dos variables están relacionados linealmente.
Eficiencia	Capacidad para realizar o cumplir adecuadamente una función.
Energía geotérmica	Es una energía renovable que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o conducción y convección, donde se suscitan procesos de interacción de agua subterránea y rocas, dando origen a los sistemas geotérmicos.
Energías renovables	Son todas las energías que se obtienen de fuentes naturales inagotables, como el viento, sol, mares,

geotermia y otros y tienen un mínimo impacto sobre nuestro entorno natural.

Impacto ambiental Es la relación o modificación que causa una acción humana sobre el medioambiente, a razón que todas las acciones del hombre repercuten de alguna forma sobre el medio ambiente.

INSIVUMEH Instituto nacional de Sismología, vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Intercambiador de calor Dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos.

IPCC Grupo de Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.

Organic Rankine Cycle Es un modelo de predicción del desempeño de un sistema de turbinas de vapor que utiliza un fluido orgánico de alta masa molecular con un cambio de fase líquido a vapor o punto de ebullición que tiene lugar a temperaturas más bajas que el cambio de fase de agua a vapor.

OS/OM Operador del Sistema y Operador del Mercado Eléctrico.

Rendimiento	El rendimiento de una máquina térmica es la relación entre la energía que se desea obtener y la energía consumida en su funcionamiento.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
Turbina de vapor	Una turbina de vapor es una turbomáquina motora, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo.
Variación estacional	Son series observadas con periodicidad inferior a un año, pueden ser mensuales, trimestrales, cuatrimestrales, semestrales u otros. Muestran conjuntamente la evolución articular a mediano y largo plazo y las variaciones estacionales.

RESUMEN

Esta investigación pretendió identificar la existencia de un impacto directo del aumento de temperatura ambiente en la generación neta de una planta geotérmica. La central utiliza condensadores enfriados con aire para hacer eficiente la saturación de un fluido motriz que hace girar los generadores. El marco conceptual determinó que la eficiencia de los condensadores se reduce con temperaturas altas y mejora con temperaturas bajas y en el transcurso de la noche.

Se hizo una correlación directa y un análisis de la variación estacional utilizando las variables temperatura ambiente y energía en GWh. Se validaron los datos utilizando estadística descriptiva. Para modelar todo el periodo se utilizó diagrama de dispersión y el de regresión logarítmica, para la modelación anual se utilizó diagrama de dispersión y para la variación estacional se utilizó el Índice de variación estacional. La presente investigación se limitó a observar el fenómeno, los datos utilizados para la modelación fueron los promedios mensuales del periodo comprendido del 2008 al 2018.

Los resultados obtenidos demuestran la existencia de una correlación negativa de fuerza débil entre las variables analizadas, sin embargo, no se ajustan adecuadamente. El primer trimestre de la época seca es el periodo cuando la planta generó más energía eléctrica y en él se registran los promedios más bajos de temperatura ambiente, por último, el aumento de temperatura ambiente analizado en un periodo de diez años es muy poco perceptible.

Palabras clave: Correlación, Energía en GWH, Regresión logarítmica, Eficiencia y Variación estacional.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contexto general

La generación eléctrica por medio de fuentes geotérmicas es una tecnología no desarrollada en nuestro medio, se efectúa por el aprovechamiento de los recursos de agua caliente (*Brine*) y vapor (*steam*) que se encuentran en depósitos subterráneos llamados reservorios. Por el tipo de fase predominante se pueden indicar: líquido dominante o vapor dominante.

El recurso geotérmico se clasifica comúnmente en baja entalpía: recursos con temperatura inferior a 90 °C, media entalpía: recursos cuya temperatura está comprendida entre 90 y 150 °C, ideales para ser utilizadas en pequeñas y medianas centrales de generación eléctrica, alta entalpía: recursos con temperaturas superiores a 150 °C que se usan en grandes centrales eléctricas (Morales, 2014, p. 551 - 616).

“El ciclo Rankine es el ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor y el ideal para ser utilizado en las centrales eléctricas de vapor (...) sus componentes básicos son: la bomba, la caldera, la turbina y el condensador” (Cengel, 2012, p. 559 - 614).

Descripción del problema

El siguiente estudio gestiona analizar cuáles son las tendencias al alza, en relación con el promedio de los últimos años y cómo trasciende, directamente este fenómeno de cambio climático a la generación eléctrica. Sustancialmente,

cómo afecta la temperatura ambiente a la eficiencia de los condensadores enfriados por aire.

Formulación del problema

Las unidades de generación eléctrica por ORC (*Rank Organic Rankine Cycle*), emplean un condensador enfriado por aire para disipar el calor para el ciclo binario. La operación eficiente del condensador requiere equilibrar adecuadamente la cantidad de trabajo que produce la turbina con la cantidad de calor que se rechaza del ciclo en el condensador. No obstante, las altas temperaturas del ambiente que se registran en las épocas estacionarias de mayor presencia de calor y las constantes diversificaciones de temperatura en el área, hacen que los condensadores disipen menor cantidad de calor del ciclo orgánico que maneja la planta lo que se ve reflejado en una menor generación eléctrica.

Delimitación del problema

- Geográfica /espacial. Central de generación Geotérmica, ubicada en la región de la boca costa, en el occidente de Guatemala.
- Temporal. Esta investigación se centra en analizar el comportamiento de las fluctuaciones de la temperatura ambiente y la generación neta de la planta durante un período comprendido entre el año 2008 y 2018. El período de análisis también se dio por la razón que la elaboración del marco teórico de la presente investigación se inició a desarrollar en el mes de mayo del año 2019.

OBJETIVOS

General

Determinar el impacto del aumento de temperatura ambiente en la eficiencia del proceso de generación eléctrica en una planta geotérmica.

Específicos

- Determinar si existe una correlación directa respecto al aumento de temperatura ambiente y la generación de energía eléctrica neta de la Central.
- Describir la variación estacional anual de la temperatura ambiente registrada en la Central en el periodo analizado y su incidencia en la generación eléctrica en los meses más calurosos.
- Identificar los factores que inciden en un mejor rendimiento de los condensadores enfriados por aire, para mejorar el intercambio de calor y la generación eléctrica de la Central.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La siguiente investigación es de tipo cuantitativa, porque se utilizó la medición de variables para el control de la temperatura y energía en GWh. Además, se evaluaron otras variables que inciden directamente en la eficiencia de la generación neta de la central, estas variables son: la velocidad del viento y el porcentaje de humedad relativa.

El diseño de investigación fue de carácter no experimental, debido a que no se tuvo control sobre las variables analizadas, el tipo de estudio fue descriptivo, dado que se describieron los hechos como se observaron, por medio de una correlación existente entre la temperatura ambiente y la generación de energía eléctrica que fue despachada al sistema interconectado nacional durante el periodo comprendido entre los años 2008 y 2018.

La investigación se centró en determinar el impacto del aumento de temperatura ambiente y los efectos en la eficiencia de los condensadores enfriados por aire y su incidencia en la generación neta de una central geotérmica.

El diseño de la investigación se basó en un diseño no experimental, de índole retrospectivo. Se clasificó como *ex post facto* porque las causas que motivaron la investigación ya habían ocurrido y producido efectos observables que hasta hoy no se había recopilado información ni analizado con detalle.

Unidad de análisis. Planta geotérmica ubicada en la región de la boca costa del occidente de Guatemala.

La primera fase, denominada revisión documental, desarrolló la investigación. Con anterioridad se realizó una revisión documental del tema, para determinar la existencia de estudios anteriores respecto a la misma, esto también constituyó el cuerpo del marco teórico de este trabajo.

La segunda fase se denominó recolección de datos. Los datos de las variables climáticas se obtuvieron de la estación meteorológica Labor Ovalle propiedad del Instituto nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología de Guatemala, INSIVUMEH. Los datos de Energía en GWh entregados al Sistema Nacional Interconectado SIN. Se obtuvieron de los informes del posdespacho de carga del Administrador del Mercado Mayorista AMM.

Fase tres. Preparación de los datos para el análisis. Antes de la modelación de la información, la variable energía en GWh debió ser ajustada por medio de la técnica de media recortada al 14 %.

La fase cuatro constituyó la modelación de datos. Se requirió un software especializado de modelación estadística, para validar los datos se utilizó estadística descriptiva.

Las técnicas utilizadas para analizar la información fueron las herramientas estadísticas de Coeficiente de correlación de Pearson, Regresión logarítmica e Índice de variación estacional.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que afecta a todos los habitantes de la tierra. Los científicos han descubierto que el clima en la tierra sufre cambios constantemente. En algunos casos, estos cambios, han sido extremos y han ocurrido de manera natural, sin embargo, en las últimas décadas, el ser humano ha sobre explotado los recursos que el ecosistema brinda, para satisfacer la creciente demanda de materia prima y alimentos para la población mundial.

La energía eléctrica utilizada para la movilidad, transporte, industria y hogares de la creciente economía mundial, han requerido grandes cantidades de energía provenientes principalmente de carbón, derivados del petróleo, gas y otros. Estos recursos energéticos que no se renuevan tienden a ser altamente contaminantes por los gases que se expelen a la atmósfera luego de ser quemados, entre ellos el dióxido de carbono CO_2 , monóxido de carbono CO , óxido de nitrógeno NO_x .

En la actualidad, se hacen grandes esfuerzos a nivel mundial para evitar que el medio ambiente continúe deteriorándose, lo que ha permitido la investigación y desarrollo de generación eléctrica por medio de fuentes amigables al ambiente. Una alternativa de estas tecnologías es la geotermia, que ha sido muy poco implementada en las matrices energéticas en Latinoamérica. La energía generada por estas centrales es utilizada como energía base por los Operadores del Sistema y Operadores del Mercado OS/OM, ya que ayuda a estabilizar los sistemas nacionales de interconexión y por su bajo costo variable.

Las centrales geotérmicas, con diseño *Rank Organic Rankine Cycle*, son vulnerables al cambio climático debido a la necesidad de disipar el calor del ciclo binario. En la central analizada, el calor del fluido motriz del ciclo binario es disipado por condensadores enfriados por aire.

Los condensadores que utilizan torres de enfriamiento por agua son más eficientes, sin embargo, en algunos lugares donde se ubican las centrales geotérmicas el agua es escasa y se opta por los condensadores enfriados por aire. La eficiencia energética de los condensadores enfriados por aire es altamente susceptible a las variaciones climáticas de temperatura ambiente y otros.

Esta investigación pretende identificar cómo afecta la temperatura ambiente y otras variables climáticas a la eficiencia de los condensadores enfriados por aire y cuál es su repercusión a la generación neta de la central. Para ello, se realizó un análisis correlacional bivariado y se observan los fenómenos ocurrientes de los índices estacionales de las variables analizadas.

En el primer capítulo se llevó a cabo una revisión documental para determinar estudios anteriores respecto al tema y constituye el marco referencial del presente trabajo.

En el segundo capítulo se hace una revisión documental profunda del tema, en revistas especializadas, libros y otros medios para identificar y recopilar información que dan sustento al marco teórico de la investigación.

En el capítulo tres, se describen las características del estudio y su diseño, así como la unidad de análisis, las fases del estudio y las técnicas estadísticas utilizadas para el análisis de la información.

En el capítulo cuatro se presenta de forma gráfica y por medio de cuadros los resultados obtenidos en la modelación de los datos.

En el quinto capítulo se realiza la discusión de resultados de la presente investigación, los resultados se sustentan en base a los datos obtenidos en el capítulo cuatro.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Estudios previos

La revista *Energy Conversion and Management*, menciona en el volumen 192, correspondiente al mes de julio de 2019, un estudio de análisis termodinámico y termo económico de una planta de energía geotérmica refrigerada por aire de tipo binario. Subraya los siguientes aspectos relacionados con la temperatura del aire para enfriar los condensadores. En los lugares donde se emplea la geotérmica, la temperatura es una variable que se toma en cuenta para que la eficiencia de los procesos, en base a las derivaciones del ciclo binario se use aire, ya que no hay suficientes fuentes de agua cercanas para helar el condensador.

La deducción del análisis en el estudio sugiere que la salida de energía total de la planta analizada podría incrementarse si se reduce la temperatura del aire de diseño ambiente. Texto en inglés [traducción] (Kahramana, Olcay y Sorgüven, 2019, p.308 – 320).

El Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, United States, en el trabajo de investigación: Desafíos para predecir la caída de presión del lado de vapor y la transferencia de calor en condensadores de plantas de energía enfriados por aire, publicó; que los condensadores convencionales de centrales eléctricas funcionan con agua de refrigeración, son insostenibles, por las altas tasas de consumo de agua necesarias para su funcionamiento ($2 - 28 \text{ m}^3 \text{ MWh}^{-1}$). Los condensadores secos refrigerados por aire (ACC) pueden permitir reducir

consumo de agua en centrales eléctricas. Texto en inglés [traducción] (Mahvi, Rattner, Lin y Garimella, 2018, p.396 - 406).

En otra investigación en mejorar el rendimiento usando condensadores de agua, mejora su capacidad de generar energía, ya que el agua es un elemento que provoca una reacción más rápida para que se enfríe en condensador, dado que el aire tiene una capacidad térmica mucho menor que el agua. Por lo tanto, es necesario proveer sustancialmente más aire para proporcionar la misma capacidad térmica para eliminación de calor del condensador, que es conducido de un gran requisito de potencia del ventilador. Texto en inglés [traducción] (Bustamante, Rattener y Garimella, 2019, p.362 - 371).

En las indagaciones evaluadas, se expone que muchos países optan por usar el sistema de enfriado por aire, porque no cuentan con suficiente agua durante los últimos años. Debido a la utilización directa de los vientos como medio de enfriamiento del vapor de escape de turbina, las condiciones ambientales, como la temperatura ambiente, velocidades y direcciones del viento, juegan un papel importante en las prestaciones térmicas de condensadores enfriados por aire. Algunos estudios han demostrado que los condensadores enfriados por aire tienen un rendimiento menor debido a las variaciones de velocidad y orientación del viento desfavoreciendo su eficiencia. Texto en inglés [traducción] (Yang, Du y Yang, 2011, p. 3109 - 3119).

Un estudio más, realizado en China, determinó que la distribución desigual de la temperatura interna y el campo de flujo de aire, se consideran los defectos esenciales del condensador refrigerado por aire de en una central eléctrica. Concurren muchos factores para embrollar la actividad segura y cambiaria de ACC, incluido el campo de flujo y presión, la temperatura ambiente de entrada de los ventiladores.

Debido al desperfecto del rendimiento de los ACC, este estudio demostró que la distribución del flujo de aire es desigual en ausencia de viento. Además, demostró que el rendimiento de los ACC, se vuelve menos efectivo en condiciones de viento y cuando la temperatura ambiente es alta. Texto en inglés [traducción] (Cheng, Li y Li, 2019, p. 100 - 354).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. La energía geotérmica

Desde la antigüedad, el aprovechamiento de fuentes de vapor y agua caliente se han utilizado para satisfacer distintas necesidades de la humanidad. Según registros, los romanos utilizaban el agua caliente proveniente de terrenos geológicamente activos para actividades de aseo personal. Sin embargo, el siglo XX cuando se entabló valerse del recurso de la geotermia para la generación de energía. Texto en inglés [traducción] (Chamorro *et al*, 2012, p 10 -18).

Los equipos mejorados permiten generar electricidad por medio de recursos geotérmicos. En muchas partes del mundo, la electricidad producida por centrales geotérmicas es utilizada por los OS/OM como carga base, también es fundamental para estabilizar la red y reducir los costos de generación, a diferencia de otras fuentes renovables. La energía eléctrica producida por centrales geotérmicas no es intermitente, su potencial es inagotable, comparable con el sol. En la actualidad, únicamente se aprovecha una mínima porción de todo el potencial geotérmico existente alrededor del mundo.

La energía geotérmica a mediana y mayor escala permitirá la reducción considerable de las emisiones de CO₂, ahorros de energía primaria y dará lugar a la creación y mantenimiento de una fuerza de trabajo de diversas disciplinas y en muchos niveles de habilidades. Texto en inglés [traducción] (GeoThermal, 2019).

Los campos geotérmicos son utilizados en procesos industriales y domésticos para proveer calor continuo y para generar energía, su emisión de CO₂ es mínimo, por tal razón se le designa energía limpia. (Enel Green Power, 2016, p. 31 - 43). Estados Unidos capitanea con capacidad instalada de energía geotérmica; con 3639 MW, Indonesia con 1948 MW, Filipinas con 1868 MW, Turquía con 1347 MW, Nueva Zelanda con 1005 MW, México con 951 MW, Italia con 944 MW, Islandia con 755, Kenia con 676 MW, Japón 542 MW y Otros países con 925 MW (ThinkGeoEnergy, 2019).

Los recursos geotérmicos consisten en energía térmica almacenada en las profundidades dentro de la tierra. Los sistemas geotérmicos se producen en una serie de entornos geológicos donde las temperaturas y profundidades de los depósitos varían en consecuencia, sistemas hidrotermales de alta temperatura 180 °C, están asociados con actividad volcánica reciente y cerca de los límites tectónicos de la placa, o en anomalías de los puntos calientes de la corteza. Los sistemas de 100-180 °C y menores a 100 °C, también se encuentran en los asentamientos continuos, formados por una producción de calor normal a través de la descomposición de isótopos radiactivos, que incluyen acuíferos cargados por la circulación de agua caliente a lo largo de zonas de fallas penetrantes. Texto en inglés [traducción] (IPCC, 2010, p. 4- 5).

Los sistemas geotérmicos se pueden clasificar como líquidos y vapores, acuíferos tanto hidrotérmicos como de baja temperatura o conductores que incluyen roca caliente y magma en un amplio rango de temperaturas. Los acuíferos de baja temperatura contienen fluidos que circulan profundamente en medios porosos o zonas de fractura, pero carecen de una fuente de calor localizada. Se subdividen en sistemas a presión hidrostática y sistemas a presión mucho más alta que la hidrostática (geo-presionado). Las tecnologías de utilización del recurso geotérmico se pueden agrupar por tipos; para generación

de energía eléctrica o para uso directo del calor. Las bombas de calor geotérmicas son un subconjunto de uso directo y los sistemas geotérmicos mejorados o diseñados, donde las vías de fluidos se diseñan al fracturar la roca, son un subconjunto bajo ambos tipos de utilización. (IPCC, 2010, p. 6).

2.1.1. Energías convencionales

Los combustibles fósiles, como el petróleo, gas natural y carbón, son compuestos orgánicos concentrados que se encuentran en la corteza terrestre, formados a partir de los restos de plantas y animales que vivieron hace millones de años en forma de biomasa concentrada. Sin energía, las personas se verán privadas de calefacción, refrigeración, luz en sus hogares y lugares de trabajo, no tendrían acceso a la televisión, internet y otros servicios relevantes para su vida y actividades profesionales. Con el desarrollo de la sociedad moderna, se espera que el uso de estos dispositivos y servicios crezca, así como la dependencia de ellos. Esta situación no solo es característica de los países desarrollados sino también de los países en desarrollo.

En estos países se incrementa la dependencia del uso de electricidad. El crecimiento de la economía mundial significa que se requerirá más energía, particularmente, energía en forma de electricidad para garantizar el funcionamiento de las diferentes industrias, hospitales, cines, teatros, escuelas, universidades, centros de servicios, entre otros. Texto en inglés [traducción] (Pedraza, 2019, p. 1 - 87).

El petróleo crudo es producto de la transformación del material orgánico viejo, sometido a compresión y calentamiento durante mucho tiempo, una vez extraído el petróleo crudo se refina en instalaciones especializadas construidas para ese propósito específico. De esta manera crea múltiples tipos de productos

ampliamente utilizados por los seres humanos en sus actividades. Texto en inglés [traducción] (Pedraza, 2019, p. 89 - 154).

2.1.2. Energías renovables

En la actualidad, existen muchas posibles tecnologías renovables y limpias que pueden satisfacer la demanda anual de energía en el mundo, entre ellas se encuentran: los generadores foto voltaicos, eólicas, hidroeléctricas y geotérmicas, estas tecnologías están disponibles comercialmente en todo el mundo, algunas más aprovechadas que otras. sin embargo, existen otras tecnologías renovables menos utilizadas, que están siendo instaladas en pequeñas cantidades en algunos países, como la energía de las mareas y las olas, de manera similar, la mayoría de las tecnologías eléctricas que pueden reemplazar las tecnologías de combustibles fósiles, ya son comercializadas a gran escala en la actualidad. Texto en inglés [traducción] (Jacabson *et al*, 2017, p. 108 - 121).

2.1.3. Usos de la energía geotérmica

La energía geotérmica toma su lugar junto a otras tecnologías con una muy importante distinción. La energía geotérmica, funciona independientemente de la hora del día, las condiciones climáticas, entre otras. Siempre está presente, excepto en los periodos de mantenimiento programado, que son planeados y no son muy frecuentes. También se puede decir que la energía geotérmica es un recurso limpio de energía renovable, que puede contribuir a la solución de la actual crisis mundial del cambio climático, es una industria de más de un siglo de antigüedad para salvaguardar ambientes sociales ya establecidos. Texto en inglés [traducción] (DiPippo, 2016, p. 203 - 215).

La energía geotérmica, utiliza la energía térmica accesible desde el interior de la Tierra, el calor se extrae de los depósitos geotérmicos utilizando pozos y otros medios. Los depósitos que son naturales suficientemente calientes y permeables, se denominan depósitos hidrotermales, mientras que los depósitos que están suficientemente calientes pero que se mejoran con la estimulación hidráulica, se denomina sistemas geotérmicos mejorados.

Una vez recuperados en la superficie, se pueden usar fluidos de varias temperaturas para generar electricidad o se pueden usar directamente para aplicaciones que requieren energía térmica. Incluyendo calefacción urbana proveniente del uso de calor a baja temperatura de pozos poco profundo. Es importante mencionar que las aplicaciones térmicas de la energía geotérmica son tecnologías maduras y generalmente estas plantas suelen ofrecer un rendimiento constante. Texto en inglés [traducción] (IPCC, 2011, p. 20 - 21).

2.2. Impactos ambientales de los proyectos geotérmicos

Los impactos específicos de un proyecto Geotérmico dependerán de la naturaleza del proyecto. Sin embargo, como cualquier proyecto de infraestructura, la energía geotérmica tiene preocupaciones ambientales, sociales y culturales, la buena noticia es que estos impactos son a menudo localizables y manejables. Debido a estas características existe una mayor probabilidad que estos efectos sean reversibles. Los impactos más comunes de los proyectos geotérmicos se dan en el aire, Tierra y el agua. Texto en inglés [traducción] (Naciones Unidas, 1992).

2.2.1. Cambio climático

Según un informe de las Naciones Unidas, durante el 2019, se tenía una media de alrededor 8000 millones de personas con un aumento de forma de gradiente del diez por ciento”. Texto en inglés [traducción] (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2019, p. 1 - 2).

El cambio climático consigue agravar los procesos de degradación del planeta, porque las épocas de invierno son más fuertes, en el caso de la sequía se incrementa el calor, lapsos secos, incrementa la cota del océano, en las costas se pierde terreno. Texto en inglés [traducción] (IPCC, 2019, p. 8 - 9) .

Según un informe especial del IPCC sobre el cambio climático, se ha visto comprometido el acceso a alimentos, en base al calentamiento global, ya que las lluvias no son frecuentes en los lugares acostumbrados, han variado constantemente, afecta las plantaciones de frutas y hortalizas, al igual que el crecimiento de especies animales y se pueden generar plagas que afecten el sector agrícola. Texto en inglés [traducción] (IPCC, 2019, p. 7).

2.2.2. Cambio climático global

El desasosiego por el cambio climático y síncope del ecosistema, de la misma manera se justipreció como riesgo global en una pesquisa del Foro Económico Mundial donde el “riesgo global se puntualiza como un evento que, si acontece, puede engendrar un impacto negativo” (World Economic Forum, 2019).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas, proclama a la geotermia como fuente renovable opcional, que puede proporcionar energía de base segura, a largo plazo y de esta manera reducir los

gases de efecto invernadero (GEI) para minimizar los conflictos climáticos. (IPCC, 2011).

Según Organización Meteorológica Mundial el periodo comprendido entre los años 2015 al 2019, ha sido registrado como los cinco años más cálidos hasta el día de hoy... la temperatura global para este periodo se estima en $1,1 \pm 0,1$ °C por encima del nivel preindustrial, que comprende el periodo 1850-1900, que es usado como periodo base, para estimaciones prolongadas, por tal razón, es considerado como el más cálido de cualquier período hasta la actualidad. Este periodo es 0.20 ± 0.08 °C más cálido que el promedio de 2011-2015. Los indicadores del estado del clima señalan que la temperatura media mundial en el periodo 2006 al 2015 fue de 0.86 °C más alta que en la era preindustrial... como una forma de comparación en el periodo comprendido del 2009 al 2018, el incremento fue de 0.93 ± 0.07 °C y para el período 2014 al 2018 fue de 1.04 ± 0.09 °C. Los dos periodos mencionados han tenido un evento climático extremo como lo es El Niño registrado en 2015 al 2016. Texto en inglés [traducción] (Organización Meteorológica Mundial, 2019, p.5).

2.3. Meteorología en Guatemala

Según el Instituto Nacional De Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala, en nuestro país no se marcan las cuatro estaciones climáticas que se dan en el hemisferio Norte, aquí se marcan dos épocas que son la época lluviosa de mayo a octubre y la seca comprendida de noviembre a abril.

La época lluviosa, se produce cuando se establece el régimen de los vientos Alisios del Nordeste y la zona de convergencia intertropical se aproxima a nuestra latitud. En julio y parte de agosto, se produce un periodo seco llamado

canícula, esto se da, por la inversión de los vientos Alisios y porque se fortalece el anticiclón del golfo de México, nuevamente se intensifica la lluvia de septiembre a octubre... la época seca da inicio con el incremento de la migración de masas de aire frío provenientes de la zona polar, causando un descenso de la temperatura e incremento de la velocidad del viento del norte, sin embargo los meses de febrero, marzo y abril la temperatura presenta olas de calor, las condiciones antes mencionadas son de carácter general para el país, sin embargo cada región debido a su topografía regional presenta condiciones singulares. Las regiones en Guatemala son las siguientes: Región Caribe, Regiones de los Valles de oriente, Región de Occidente, Región Boca Costa, Región pacífico, Región Altiplano Central, Región Franja Transversal del Norte y Región Norte (INSIVUMEH, 2018).

2.3.1. Gases de efecto invernadero y sus consecuencias

Investigadores en todo el mundo están preocupados por reducir las emisiones correspondientes a la generación de electricidad los recursos limitados de combustible fósil como el carbón, el gas natural y el diésel, se utilizan en la mayoría de las estaciones generadoras de energía en el mundo, y su uso aumenta el potencial de calentamiento global, intensificando el nivel del mar y destruyendo numerosos ecosistemas asociados a ello. A pesar de estos inconvenientes, la capacidad total de energía basada en combustibles fósiles está aumentando constantemente. Alrededor del mundo se instalan numerosas plantas de este tipo, lo que hace que aumente el riesgo y la amenaza al deterioro del medio ambiente. Texto en inglés [traducción] (Rahman y Amin, 2018, p. 6 - 22).

Mientras, los investigadores luchan por minimizar la emisión utilizando técnicas de mitigación adecuadas, incluidas las fuentes de energía renovables.

Un estudio matemático, realizado en Bangladesh, país donde el gobierno impulsa la utilización de plantas de carbón, dio como resultado que las centrales eléctricas de carbón, diésel y gas natural emiten 0.90 kg, 0.76 kg y 0.566 kg de CO₂ por kWh respectivamente, el estudio se realizó, tomando en cuenta las plantas que usan combustibles fósiles y utilizan el software HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Recourses). Texto en inglés [traducción] (Karmaker, Rahman, Hossain y Admed, 2019, p. 3 - 11).

2.3.2. Ciclo global del carbono

Los ecosistemas terrestres respiran en dióxido de carbono (CO₂) por medio de fotosíntesis y liberación de carbono a la atmósfera a través de respiración y, por lo tanto, juegan un papel importante en el ciclo global de carbono y el clima de la Tierra. Texto en inglés [traducción] (Xiao *et al*, 2019, p. 111 - 383).

El cambio climático global ha sido mejor documentado desde el siglo pasado y ha acelerado el interés en cuantificar el papel crítico de los océanos, sabanas, bosques lluviosos, otros y sus ecosistemas en su ciclo global del carbono y nutrientes. Texto en inglés [traducción] (Paul *et al*, 2018, p. 96 - 105).

2.4. La eficiencia energética como factor clave del desarrollo

La conservación del agua y la energía, el transporte verde y la tecnología de bajas emisiones son los aspectos clave para catalizar el cambio hacia un crecimiento económico resistente al clima especialmente para sostener el desarrollo de bajas emisiones de carbono en el mundo. Texto en inglés [traducción] (Lee, Hashim, Ho, Fan y Klemes, 2017, p. 1-13).

2.4.1. Sostenibilidad ambiental y energía geotérmica

El cambio climático tiene influencias adversas en diversos sectores tales como la energía, la agricultura, la urbanización y otros. Las nuevas fronteras de la ciencia y la investigación se han formado en diferentes niveles para mitigar los efectos desfavorables debido al cambio climático, los rápidos cambios que tiene lugar en el sector de la energía pueden considerarse la principal frontera en la lucha contra el cambio climático, lo que significaría una matriz energética mundial menos contaminante.

La integración a gran escala de tecnologías de energía renovable está avanzando con el objetivo de facilitar el cambio a sistemas de energía distribuidas y la integración de tecnologías renovables, las condiciones climáticas extremas, como las olas de frío y calor son consideradas como consecuencias del cambio climático, estos escenarios extremos aumentan las necesidades de calefacción o refrigeración en muchas regiones del mundo lo que requiere una alta demanda de energía. Texto en inglés [traducción] (Perera, Nik y Scartezini, 2019, p. 358 - 363).

Con la ampliación del empleo de energía global, las energías renovables es una salida. En el mundo preexiste potencial para que la geotermia tenga un avance en su aprovechamiento, para un desarrollo de tecnología. Texto en inglés [traducción] (Shortall, Davidsdottir y Axelsson, 2015, p. 372 - 407).

2.4.2. Desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible es menos difícil de precisar si lo planteamos de la siguiente forma al decir que es cualquier desarrollo que mueve de un estado menos sostenible a un estado más sostenible, pero incluso esto tiene una gran

cantidad de dimensiones. Tres de los más importantes pueden resumirse como: la prosperidad social, personal y sostenibilidad del planeta. Texto en inglés [traducción] (Ashby y Michael, 2016, p. 27 - 38).

2.4.3. Antecedentes de desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible tiene que ver con la relación del ser humano con todo lo externo. Pero hay mucho más que eso, la relación con el sistema económico global, del cual se obtienen materias primas, productos de fabricación, comercio y la relación con la sociedad.

La visión occidental del desarrollo se basa en el crecimiento económico sobre urbanización e innovación técnica, utilizando mercados globales para obtener recursos y distribuir bienes y servicios, aprovechando la energía y recursos del medio ambiente natural para proporcionar los beneficios mencionados. Los defensores reconocen que los recursos naturales son finitos en extensión, pero señalan que el avance técnico tiende a desagaviar el sistema.

Las historias económicas de las naciones desarrolladas sugieren una progresión natural de sociedad agraria temprana a través de la industrialización a una post industrialización. En esta economía la riqueza aumenta más rápido que la población, por lo tanto, permite un mayor crecimiento económico, y con ello, una sociedad en evolución. Texto en inglés [traducción] (Ashby, 2016, p. 1 - 2).

2.4.4. Desarrollo sostenible de la matriz energética

La evaluación de sostenibilidad se define como una herramienta que puede ayudar a tomadores de decisiones a definir qué acciones se debería o no tratar

de hacer, para que la sociedad sea más sostenible ambientalmente. Existen varios estudios en la literatura relacionados con la sostenibilidad de las tecnologías de generación de electricidad, donde se proponen escenarios futuros para que exista una diversificación y se combinen grandes cantidades de energías renovables, como eólica y solar, geotérmica, con el fin de mantenerse lo más alejado posible el uso de combustibles fósiles para esa tarea. Dado que el consenso internacional claramente favorece una mejor obtención de la energía y una mayor diversificación en la forma que un país alimenta su red eléctrica. Texto en inglés [traducción] (Yilan y Kadirgan, 2020, p. 519 - 529).

2.5. Generación eléctrica en Guatemala de energía geotérmica y el rendimiento de máquinas térmicas

Los recursos geotérmicos en Guatemala son abundantes y proporcionan una fuente sostenible de energía a bajo costo.

El potencial geotérmico estimado de Guatemala es de 1000 MW de energía eléctrica. En el país hay zonas de geotermia que son utilizadas en la generación de energía eléctrica. En 2012, MEM publicó el Plan Indicativo de Expansión de Generación para Guatemala, un modelo de despacho para pronosticar cambios en la combinación energética del país de nuevos proyectos disponibles, para el manejo de fuentes de energía en la matriz eléctrica nacional. Los proyectos de geotermia son elaborados con capital de trabajo privado, dado que su valor es muy alto para que el estado lo desarrolle. Texto en inglés [traducción] (Asturias, 2012, p. 1 - 2).

2.5.1. Calentamiento global y deficiencia en el rendimiento de máquinas térmicas

En la actualidad, los problemas ambientales son muy intensos y los recursos energéticos convencionales disminuyen rápidamente. Los problemas de gestión de residuos, la contaminación del aire y del agua especialmente para uso humano, los desastres naturales, el ambiente se degrada a ritmos acelerados y conducen a un impacto en los ecosistemas y el entorno de vida del ser humano. Texto en inglés [traducción] (Pipatsawet y Podisuk, 2013, p. 220 - 224).

Las tasas del CO₂ en la atmosfera son alarmantes y afectan directamente al calentamiento global. Los resultados de investigaciones revelan que para el período 1960–2008, la sensibilidad de la temperatura a las emisiones de CO₂ en el norte de América fue alta con un coeficiente de elasticidad de 0.317; América del Sur fue la más baja con una elasticidad de 0.005. El alza de CO₂, el aumento de la temperatura en Oceanía es el más grande durante el periodo comprendido entre 1990–2008, alcanzando 51.5 % respectivamente. Las tasas de contribución en Asia y África fueron 43.7 % y 34.2 %, respectivamente. Texto en inglés [traducción] (Chena, 2014, p. 171 - 175).

El aumento de temperatura ambiente incide directamente en el rendimiento de las máquinas térmicas, en el caso de las plantas geotérmicas que utilizan condensadores de enfriamiento por aire se ven afectadas disminuyendo considerablemente la energía neta producida.

Cualquier aumento de temperatura del elemento que enfríe directamente el condensador sea esto aire o agua, tendrá un efecto directo con la eficiencia de la máquina térmica. “El condensador de vapor refrigerado por agua de dos pasos, se usa comúnmente en centrales eléctricas de carbón y su rendimiento térmico

afecta significativamente la generación y la eficiencia de la unidad”. Texto en inglés [traducción] (Pattanayaka, Padhi y Kodamasingh, 2019, p.1 - 8).

El rendimiento que puede lograr un sistema de tipo ORC, depende de variables de temperatura, la selección del fluido de trabajo, la elección de la máquina de expansión, la tecnología de condensadores para el enfriamiento del vapor condensado y de la bomba de alimentación. Texto en inglés [traducción] (Ibarra, Rovira y Padilla, 2019, p.688 - 701).

2.6. Termodinámica y energía

Se basa en la energía, en transformar el calor en energía, además es un área de la física que conlleva el estudio del calor y temperatura, para producir energía y trabajo (Cengel, 2012, p. 2).

La termodinámica relata la conducta del cuerpo. Resultados básicos de la termodinámica se basan en la existencia de estados idealizados de equilibrio termodinámico.

El calor y el trabajo se basan en la relación del sistema y entorno, reduce la temperatura, la energía interna sufre de transferencia de calor cambia su estado...Cualquier otra transferencia de energía es transferencia de energía de trabajo e involucra fuerzas que actúan a distancia, la transferencia puede realizarse mediante la rotación de un eje, el movimiento oscilatorio de un pistón o una corriente eléctrica cruzando el límite que surge de un voltaje...esta transferencia puede expresarse por unidad de masa como $w = W / m$, donde m es la masa del sistema, Como siempre, el trabajo realizado por el sistema por unidad de tiempo es Potencia = \dot{W} , en unidades de kW o kJ / s. Texto en inglés [traducción] (McGoodwin, 2016, p. 7).

2.6.1. Máquinas térmicas

Equipo que origina trabajo a partir del calor, como la máquina de vapor. No todos los motores son motores térmicos, pero los motores térmicos proporcionan cerca del 90 % de la potencia motriz generada en todo el mundo (Martínez, 2019, p. 2).

2.6.2. Rendimiento y análisis de las máquinas térmicas de generación geotérmica

La energía geotérmica, como una fuente de calor típica de baja temperatura, ha sido explotada durante décadas para generar electricidad. El sistema de ciclo orgánico de Rankine (ORC) tiene una alta eficiencia de conversión de energía debido al buen desempeño de los fluidos orgánicos de baja temperatura de recurso geotérmica. La baja y media temperatura geotérmica (220 °C) está más disponible y se puede aprovechar de mejor manera.

El ciclo orgánico de Rankine se emplea como una tecnología eficiente para utilizar este calor de baja y media temperatura para generar electricidad. Hay varias ventajas en el uso de ORC con fuente de calor geotérmica, incluida una alta eficiencia que el ciclo de vapor, sistemas más pequeños y baja inversión. Texto en inglés [traducción] (Sun *et al*, 2017, p. 591 -598).

2.6.3. Condensadores enfriados con aire

Un método para reducir el consumo de agua en las torres de refrigeración para la condensación de vapor es utilizar tecnologías refrigeradas en seco con aire como medio de rechazo de calor. Estos sistemas refrigerados por aire son beneficiosos cuando el agua no está disponible o no es económica, pero por lo

general resulta en menores eficiencias en las centrales eléctricas... un estudio predijo que el rendimiento del condensador refrigerado por aire durante el verano suele funcionar peor. Texto en inglés [traducción] (Lin, Mahvi y Kunke, 2020).

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

3.1. Características del estudio

Este trabajo de investigación se caracteriza por ser de tipo no experimental, los eventos analizados ya ocurrieron y son analizados a posteriori, el investigador no interviene en las muestras, se limitó a observar los fenómenos como ocurrieron dado que la investigación es descriptiva y causal.

3.1.1. Enfoque del estudio

El enfoque de la investigación es cuantitativo, porque se utilizó la medición de variables para el control de la temperatura ambiente y de Energía en GWh para poder desarrollar la modelación de datos.

El tipo de estudio es descriptivo, dado que describen los hechos como son observados.

3.1.2. Alcance de la investigación

El alcance metodológico de la investigación es descriptivo. No pretende aportar conclusiones definitivas sobre el impacto del aumento de la temperatura en la generación eléctrica de la Central Geotérmica, las series de datos utilizados para la modelación de las variables de la investigación no provienen de una serie de acciones y reacciones controladas como es el caso de la investigación experimental.

La investigación propuesta en este trabajo no manipula deliberadamente las variables que busca interpretar, sino que se concentra en observarlas.

3.1.3. Diseño del estudio

El diseño de la investigación en curso se basó en un diseño no experimental, de índole retrospectivo porque el proceso es causar, ya ocurrió y el estudio trató de identificar los posibles impactos que ha ocasionado las variaciones de temperatura ambiente a la generación neta de la central eléctrica en mención.

El diseño también es Longitudinal debido que existió el interés de analizar cambios a través del tiempo en la variable temperatura ambiente la cual se analizó y los efectos en la generación eléctrica de la Central.

La investigación longitudinal, brinda los beneficios de contar con marcos de tiempo extendidos, este tipo de investigación permite que la muestra permanezca con los mismos valores a lo largo del tiempo, y permite hacer recomendaciones en los casos que se requiere intervención. Como hace notar Luis Ávila Baray (2006), en su libro *Introducción a la Metodología de la Investigación* define a este tipo de estudio como: “Investigación de índole sistemática en la que el investigador no tiene control sobre las variables independientes porque ya ocurrieron los hechos o porque son intrínsecamente manipulables” (Baray, 2006, p. 75).

La investigación se clasifica como *ex post facto*, es decir, la investigación que se realiza después de que han ocurrido los hechos. Debido a que las causas que motivaron esta investigación ocurrieron con antelación y produjeron efectos observables cuya información no se había recopilado ni analizados con detalle.

A la variable de temperatura ambiente se le denomina variable independiente y a la variable de energía eléctrica neta generada por la Central la denominamos variable dependiente. Dado lo anterior, se asevera que las variables independiente y dependiente que se analizarán en este estudio son representativas y naturales, y constituyen parte de la recopilación de datos de temperatura ambiente y de la generación de una central geotérmica durante un periodo de tiempo, comprendidos entre los años 2008 al 2018.

3.2. Unidad de análisis

Central de Generación Geotérmica ubicada en la región de la boca costa del país de Guatemala.

3.3. Variables

Las variables utilizadas en este estudio son:

- Temperatura ambiente. Es la variable independiente de este estudio, se caracteriza por ser una variable numérica continua, observable, de nivel de medición de intervalo, su dimensional es °C, las mediciones se han obtenido por un sensor de medición de temperatura ambiente.
- Generación neta de la planta entregada al sistema nacional Interconectado. Es la variable dependiente, ya que en este estudio la generación neta depende de las variaciones de temperatura ambiente. Sus características son numérica discreta, manipulable, nivel de medición. Razón, su dimensión es GWh.

- Velocidad del viento. Las características de esta variable son las siguientes; numérica continua, nivel de medición de intervalo, dimensión: km/h y es de tipo observable. Las mediciones se obtuvieron de la estación meteorológica Labor Ovalle.
- Humedad relativa. Variable numérica discreta, es una variable observable, dimensión porcentaje. Las mediciones se obtuvieron de la estación meteorológica Labor Ovalle.

3.4. Fases del estudio

Se realizó una revisión literaria del tema lo que permitió elaborar el marco teórico de la presente investigación, se obtuvieron datos estadísticos de once años comprendidos entre el 2008 al 2018, de la temperatura ambiente, la energía entregada al sistema nacional interconectado de la central, además de otras variables como la velocidad del viento y humedad relativa de la región próxima a la central analizada, se utilizó un software especializado para modelar los datos y se utilizó estadística descriptiva para validar la información, por medio de diagramas de dispersión y regresión logarítmica se pudo observar la relación que existe entre las variables y se analizó la estacionalidad de las variables utilizando el índice de variación estacional.

3.4.1. Revisión de literatura

Antes de la investigación se llevó a cabo la revisión documental del tema para determinar la existencia de estudios anteriores respecto a nuestra investigación. La primera fase del estudio consideró en primera instancia, contextualizar la investigación en curso y la sistemática del marco teórico de este

trabajo. Las fuentes que se utilizaron son de índole primario con contenido de información técnica y resultados de trabajos mayormente científicos.

Se desarrolló una lectura bibliográfica de los temas de interés relacionados con el objeto de estudio, para ellos se revisaron libros, artículos científicos, investigaciones y otros. Lo anterior permitió identificar temas claves y desarrollar una adecuada conceptualización y elaboración de una base sustentable que permitiera una robusta fundamentación de la investigación. Esto también constituyó el cuerpo del marco teórico de este trabajo.

3.4.2. Recolección de datos

La recolección de datos para llevar a cabo el estudio longitudinal permitió identificar tendencias y relaciones dentro de los datos de las variables investigadas.

La información de la generación neta de la planta se obtuvo de los resultados de la Operación anual de los informes del posdespacho de carga de la página web oficial del Administrador del Mercado Mayorista. Los datos se obtuvieron de los archivos anuales del Despacho de carga ejecutada del sistema nacional interconectado del periodo comprendido entre el año 2008 al 2018.

La información de la temperatura ambiente se obtuvo de la estación meteorológica Labor Ovalle, Quetzaltenango. Propiedad del Instituto nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología de Guatemala, INSIVUMEH

Los datos para modelar e identificar los resultados del objetivo tres completamente, no pudieron obtenerse por los inconvenientes de la pandemia COVID-2019, para lo anterior se requería la realización de mapas e información

satelital para observar comportamientos de la variable viento, densidad boscosa, frontera agrícola y realizar otras actividades para recolección de datos.

Según la OMC, “el COVID-19, es la enfermedad infecciosa causada por el coronavirus que se ha descubierto más reciente. Tanto este nuevo virus como la enfermedad que provoca eran desconocidos antes de que estallara el brote en Wuhan (China) en diciembre de 2019” (Organización Mundial de la Salud, 2020). Actualmente, el COVID 19 es una pandemia que afecta a muchos países de todo el mundo.

Debido a los primeros contagios registrados en Guatemala, con el nuevo Coronavirus (COVID-2019), el Congreso de la República de Guatemala ratificó el 12 de marzo de 2020, el decreto gubernativo 5-2020, de fecha 5 de marzo del año en mención que decretó estado de calamidad pública por un plazo de treinta días en todo el territorio nacional, decreto gubernativo que tomó vigencia un día luego de su publicación en el diario oficial (Congreso de la República de Guatemala, 2020)

El decreto 5-2020, restringió los derechos constitucionales reconocidos en los Artículos 5; Libertad de acción, Artículo 26; Libertad de locomoción 33; derechos de reunión y manifestación y Artículo 116; Regulación de la huelga para trabajadores del Estado, todos estos artículos son parte de la Constitución Política de la República de Guatemala, estas disposiciones se prolongaron hasta el 30 de septiembre del año 2020. Los hechos antes mencionados y la incertidumbre producida por la pandemia fueron las razones que limitaron poder cumplir con todos los objetivos de esta investigación, específicamente abordar el objetivo tres, del presente trabajo.

Para abordar parcialmente el contenido del objetivo tres, se obtuvieron los datos de velocidad del viento y humedad relativa, de la estación meteorológica Labor Ovalle, ubicado en el municipio de Olinstepeque del departamento de Quetzaltenango, Código: 13.14.1, Latitud: 14°52'10", Longitud: 91°31'52", Elevación: 2,390 M.S.N.M. Los datos obtenidos son el promedio mensual del periodo de enero 2011 a diciembre 2018.

3.4.3. Análisis de la información

Para analizar el conjunto de datos de las variables; temperatura ambiente y energía neta en GWh de la Central. se utilizó un software especializado de modelación estadístico, los primeros resultados del análisis correlacional mostraron una distorsión, especialmente en la variable dependiente, debido a paros forzados por mantenimiento de las unidades generadoras, pérdidas de recurso geotérmico y otras actividades relacionadas con la central analizada. Ver Anexo 1.

Para modelar los datos y poder presentar los resultados obtenidos para el objetivo específico uno, se recurrió al método de media recortada del 14 %. Ver Anexos.

Muestra ordenada.

$$x = \{x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n\}$$

Fórmula de media recortada.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

Para modelar los datos, presentar los resultados y cumplir con el objetivo específico dos se utilizó en Índice de Variación Estacional. Las series observadas con periodicidad fueron trimestrales. Como se procedió en el objetivo anterior en los datos analizados de la variable dependiente se observaron fluctuaciones, principalmente las fluctuaciones a la baja distorsionaban la muestra y considerando que estos índices no deben incidir sobre la serie anual. Fue necesario realizar la estimación eliminando las fluctuaciones irregulares observadas en cada periodo; para nuestro cálculo se tomó el valor mediano de cada periodo estacional por separado y se corrigió de forma que su promedio no afecte a la serie.

La modelación de datos del objetivo tres no requirió ajustes.

3.4.4. Modelación de datos

En esta fase se modelaron los datos, en el programa SPSS, se obtuvieron datos de las herramientas de estadística descriptiva, como media, mediana, desviación estándar, rango, correlaciones y los índices de variación estacional.

3.5. Técnicas de análisis de la información

Para desarrollar esta investigación y describir los resultados obtenidos en la modelación de datos, se utilizó estadística descriptiva y se organizó de la forma siguiente:

3.5.1. Correlaciones bivariadas

Para poder analizar la relación existente entre la variable independiente y la variable dependiente, variables de nuestro estudio, nos apoyamos en la

herramienta de análisis de datos llamada correlación. La correlación es una técnica de análisis de información con base estadística y consiste en; analizar la relación existente entre por lo menos dos variables, el resultado debe de mostrar la fuerza y el sentido de la relación. Los indicadores de fuerza de correlación están comprendidos entre los valores 0 a 1 y dependen de la dirección en que se agrupan los datos en la gráfica de correlación. Un diagrama de dispersión puede sugerir varios tipos de correlaciones entre variables con un intervalo de confianza determinado. La correlación puede ser positiva, negativa o nula. Positiva si existe un aumento de la variable dependiente en relación con la variable independiente, negativa si hay un descenso de la variable dependiente en relación con la variable independiente, o nula; esto ocurre cuando las variables no están correlacionadas.

El coeficiente de correlación de PEARSON se caracteriza por medir las relaciones lineales. Otros modelos miden las relaciones monotónicas, Sin embargo, puede existir una relación significativa entre variable en algunos casos, en que los resultados obtenidos de estos dos modelos anterior dan 0.

Para el presente trabajo de investigación y para modelar los datos de las variables, utilizamos los siguientes parámetros y modelos estadísticos:

- Diagramas de dispersión
- Coeficiente de Correlación de PEARSON
- Coeficiente de Determinación
- Regresión Lineal
- Regresión logarítmica
- Índice de variación estacional

Otro modelo estadístico utilizadas en este estudio fue el de Regresión Logarítmica, este modelo estadístico es una alternativa cuando el modelo lineal no logra demostrar un coeficiente de determinación apropiado.

3.5.2. Diagramas de dispersión

Un diagrama de dispersión muestra de manera gráfica la relación que hay entre dos variables cuantitativas sobre un mismo número de datos. De este modo nos permite estudiar las relaciones que existen entre dos factores. Las relaciones que se obtienen entre los conjuntos asociados de datos se muestran en forma de nube de puntos.

3.5.3. El coeficiente de correlación de PEARSON

Este coeficiente nos permitió medir el grado en que se relacionan las variables de estudio, las cuales son: Temperatura ambiente (variable independiente) y la generación neta de la planta entregada al SNI (Variable Dependiente). Expresado de otra forma; el coeficiente de correlación de Pearson: mide como de fuerte es la correlación lineal entre dos variables.

Fórmula de la correlación de Pearson.

$$r = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{N \sum x^2 - (\sum x)^2} * \sqrt{N \sum y^2 - (\sum y)^2}}$$

Donde:

N = número de muestras

$\sum X*Y$ = Sumatoria de la variable independiente y la variable dependiente

$\sum X$ = Sumatoria de la variable independiente

$\sum Y$ = Sumatoria de la variable dependiente

$\sum X^2$ = Sumatorio de la variable independiente al cuadrado

$\sum Y^2$ = Sumatorio de la variable dependiente al cuadrado

3.5.4. El coeficiente de determinación

Este coeficiente nos permitió obtener la variación de la variable dependiente en relación con la variable independiente. Este coeficiente nos permitió obtener la variación de Generación Neta entregada de la planta respecto al cambio de Temperatura Ambiente. Dicho de otra forma; el coeficiente de determinación mide cuanta varianza explica un modelo lineal.

Fórmula:

$$\text{Coeficiente de determinación \%} = r^2$$

Donde:

$$r = \text{Coeficiente de correlación de PEARSON}$$

3.5.5. La regresión lineal

Con este método estadístico pudimos estudiar la relación lineal existente entre las variables analizadas; Temperatura ambiente y generación neta y pudimos predecir el valor de una variable a partir de la otra.

La fórmula de la regresión lineal es:

$$y = a + bx$$

Donde:

Y = Variable dependiente

a = Es la constante

b = Coeficiente de la variable independiente

Nota: (Y) representa el incremento o decremento de la generación cada vez que le damos valores a la variable independiente (X).

Para encontrar el valor de b utilizamos la siguiente fórmula:

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x) - (\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

Donde:

N = número de muestras

$\sum X*Y$ = Sumatoria de la variable independiente y la variable dependiente

$\sum X$ = Sumatoria de la variable independiente

$\sum Y$ = Sumatoria de la variable dependiente

$\sum X^2$ = Sumatorio de la variable independiente al cuadrado

Para encontrar el valor de a utilizamos la siguiente fórmula:

$$a = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\langle \sum x \rangle}{n}$$

Donde:

a = Es la Constante

b = Es el coeficiente de la variable independiente

n = Es el número de muestras

$\sum Y$ = Es la sumatoria de la variable dependiente

$\sum X$ = Es la sumatoria de la variable independiente

3.5.6. Regresión logarítmica

El modelo de regresión logarítmica se utiliza cuando el modelo lineal no logra un coeficiente de determinación apropiado.

La función de la regresión Logarítmica es la siguiente:

$$y = A + B \ln(x)$$

3.5.7. Índice de variación estacional

Son observaciones que se dan secuencialmente en el tiempo es decir los componentes estacionales son movimientos periódicos de tiempo, en nuestro caso serán periodos trimestrales, el objetivo de utilizar el IVE es poder observar cual es el comportamiento de las variables en periodos definidos según las épocas climáticas que se presentan anualmente en la región donde se ubica la Central.

Fórmula modelo multiplicativo:

$$y_t = t_t * c_t * e_t * r_t$$

3.5.8. Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central utilizadas en este análisis son las siguientes:

3.5.9. Media

Esta medida de localización permitió obtener los valores de la media o promedio de la temperatura ambiente y energía entregada al sistema interconectado de la central, durante todo el lapso de periodo analizado y por periodo anual.

Fórmula:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

3.5.10. Mediana

Esta medida de tendencia central permitió identificar los valores intermedios de la muestra, durante todo el periodo analizado y por periodo anual.

Fórmula:

$$M_e = L_{me} + \left[\frac{n/2 - F}{f_{me}} \right] * A$$

L_{me} = Límite real inferior de la clase de la mediana

F = Frecuencia acumulada de la clase anterior a la mediana

f_{me} = Frecuencia absoluta de la clase de la mediana

A = Amplitud de intervalo de la clase de la mediana

3.5.11. Moda

Con la medida de localización se identificaron y analizaron los datos de temperatura ambiente y energía que con más frecuencia se registraron en el período analizado.

Fórmula:

$$M_0 = L_{m_0} + \left[\frac{D_1}{D_1 + D_2} \right] * A$$

Para poder entender cuál fue la variabilidad de los datos o su dispersión fue necesario utilizar medias de localización entre las que se encuentran:

3.5.12. Varianza

Esta herramienta nos permitió identificar como varían los datos respecto a los promedios de las variables analizadas, que corresponden a temperatura ambiente y energía entregada al sistema interconectado nacional.

Fórmula:

$$s^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}$$

3.5.13. Desviación estándar

Esta herramienta estadística nos permitió identificar la desviación estándar de la muestra de datos.

Fórmula:

$$s = \sqrt{s^2}$$

3.5.14. Rango

Esta medida de dispersión nos permitió identificar los rangos en que ubican el total de muestras que se utilizaron para el análisis.

Fórmula:

$$R = \text{Dato Mayor} - \text{Dato Menor}$$

3.5.15. Medidas de distribución

Método de Gauss. Para analizar la distribución de los datos, se utilizó el método de Gauss.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Impacto del aumento de temperatura ambiente en el rendimiento de los equipos de generación eléctrica de una central geotérmica y su repercusión en la generación neta

Resultado de la correlación directa respecto al aumento de temperatura ambiente y la generación neta de la Central Geotérmica.

- Al evaluar las variables, temperatura ambiente y la energía neta de la planta, se utilizó estadística descriptiva para validar los datos, los resultados se muestran a continuación.

Tabla I. Datos estadísticos temperatura ambiente

No.	Variable	Temperatura ambiente °C
1	Media	18.31
2	Mediana	18.37
3	Desviación Estándar	1.13
4	Rango	7.25
5	Mínimo	15.25
6	Máximo	22.50

Fuente: elaboración propia.

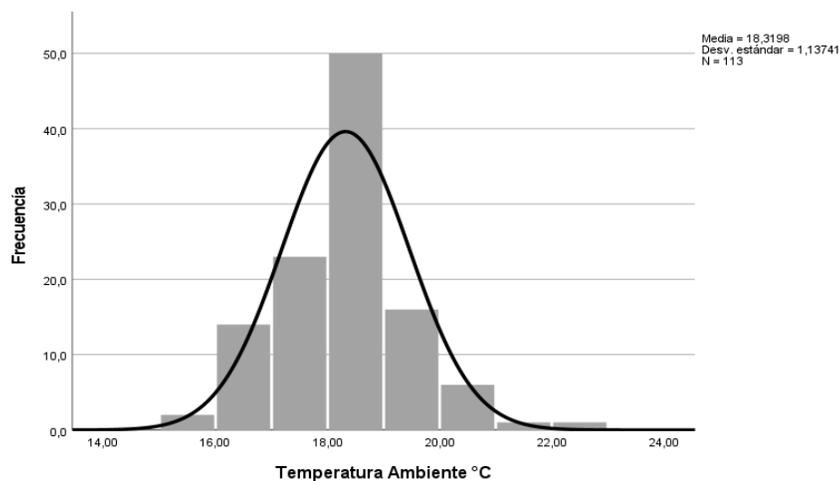
Tabla II. Datos estadísticos energía GWh

No.	Variable	Energía GWh
1	Media	9.69
2	Mediana	9.90
3	Desviación Estándar	1.29
4	Rango	5.81
5	Mínimo	6.65
6	Máximo	12.4584

Fuente: elaboración propia.

Histograma simple de la variable independiente Temperatura Ambiente de periodo analizado, de los años comprendidos del 2008 al 2018.

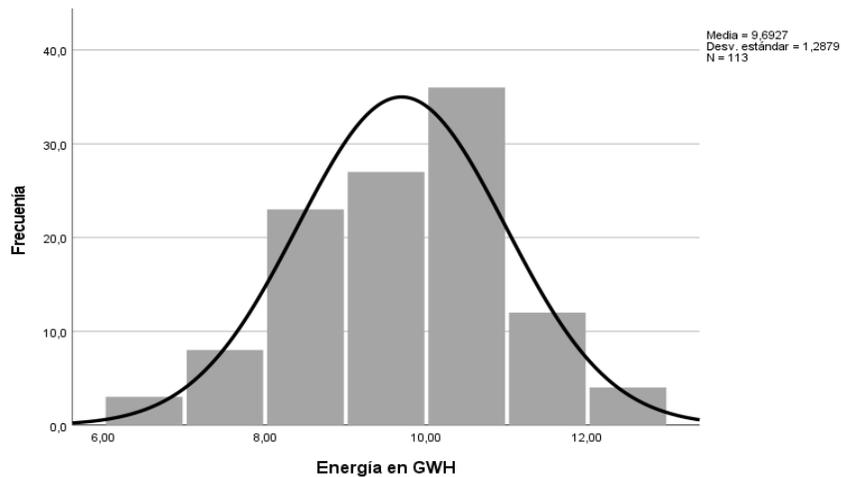
Figura 1. Histograma temperatura ambiente



Fuente: elaboración propia, utilizando datos proporcionados por el Instituto de sismología, vulcanología, metodología e hidrología d Guatemala. Consultado el 19 de octubre de 2020.

Histograma simple de la variable dependiente; energía en GWh de periodo analizado, de los años comprendidos del 2008 al 2018.

Figura 2. **Histograma de energía GWh**



Fuente: elaboración propia. utilizando datos obtenidos del posdespacho de carga del AMM.
Consultado el 28 de agosto de 2020. Recuperado de www.amm.org.gt.

- El coeficiente de correlación de Pearson permitió determinar el grado de asociación entre las dos variables analizadas; Temperatura ambiente y Energía entregada al SNI, el resultado obtenido fue el siguiente:

Coeficiente de Correlación (r): - 0.127

Una correlación negativa como la obtenida en el análisis de los datos, nos indica que a medida que aumenta la variable temperatura disminuye la variable GWh de energía entregada al SNI. Lo anterior no identifica que exista una correlación directa entre ambas variables, pero si una relación o asociación entre ambas.

- El coeficiente de determinación: Este coeficiente nos permitió obtener la variación de Generación Neta entregada de la planta respecto al cambio de temperatura ambiente.

Coeficiente de determinación (r^2): 0.016129

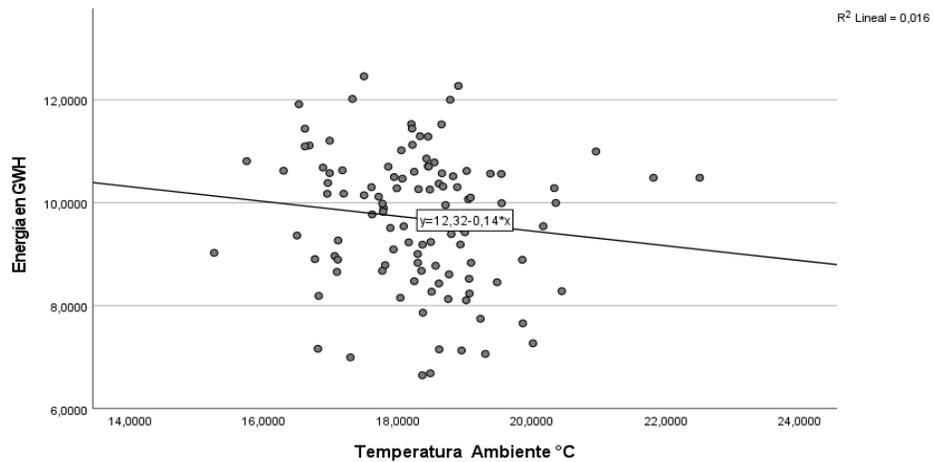
- La regresión lineal: con este método estadístico pudimos estudiar la relación lineal existente entre las variables analizadas; Temperatura ambiente y generación neta y pudimos predecir el valor de una variable a partir de la otra.

Tabla III. **Datos correlación**

		Temperatura Ambiente (Variable Independiente (X))	Energía GWh (Variable Dependiente (Y))
Temperatura Ambiente	Correlación de Pearson	1	-0.12
	Sig. (bilateral)		0.18
	N	113	113
Energía GWh	Correlación de Pearson	-0.12	1
	Sig. (bilateral)	0.18	
	N	113	113

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Diagrama de dispersión, consolidado 2008 – 2018



Fuente: elaboración propia.

- Al modelar los datos utilizando la correlación logarítmica.

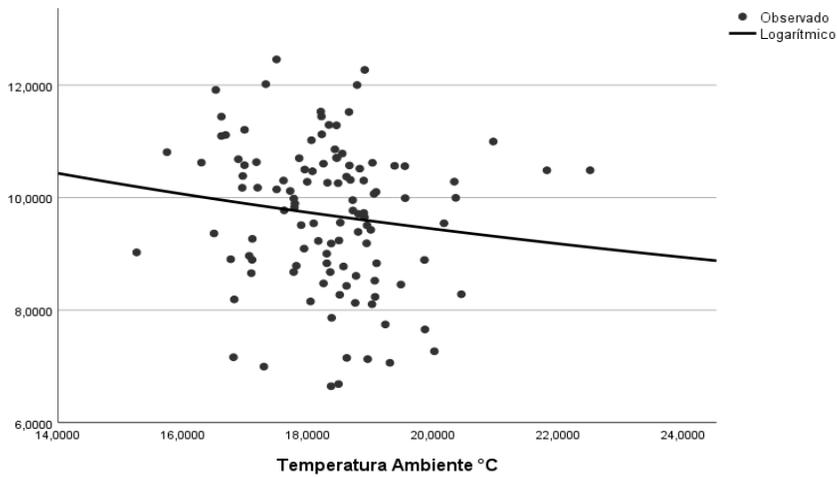
La modelación da como resultado una $r^2 = 0.023$.

Tabla IV. Resumen de resultados, modelo de regresión logarítmica

Ecuación	Resumen del Modelo					Estaciones del parámetro	
	R Cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Estimaciones Constantes	b1
Logarítmico	0.02	3.05	1	130	0.08	19.31	-3.36

Fuente: elaboración propia.

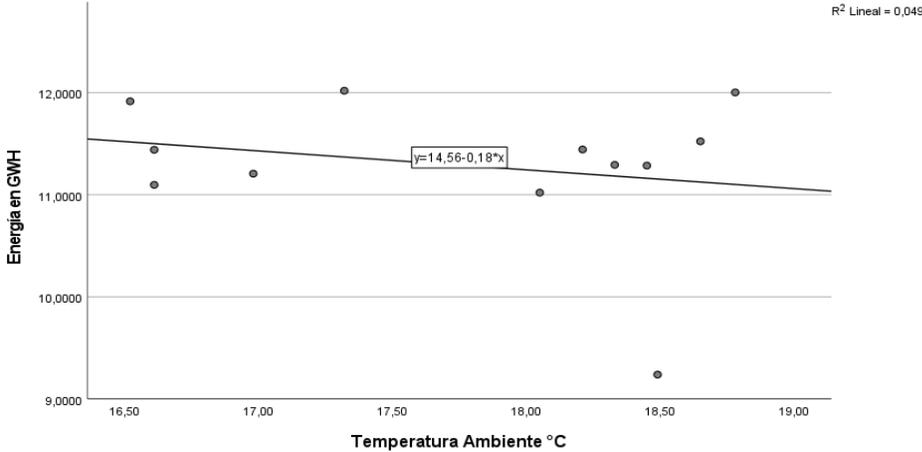
Figura 4. **Diagrama de dispersión, modelo regresión logarítmica consolidado 2008 – 2018**



Fuente: elaboración propia.

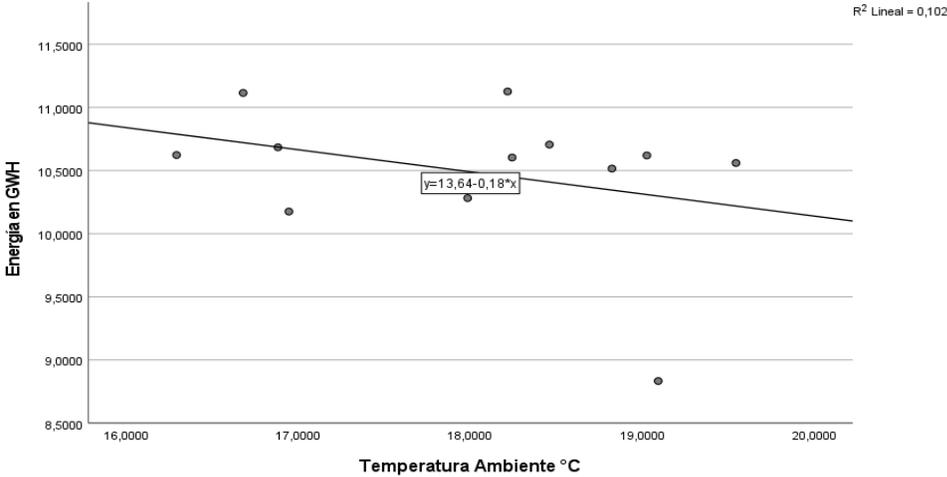
- Los datos fueron modelados anualmente y estos son los resultados que se obtuvieron.
 - Gráficas de los periodos con dirección negativa. años: 2008, 2009, 2012, 2014, 2017 y 2018.

Figura 5. Diagrama de dispersión, año 2008



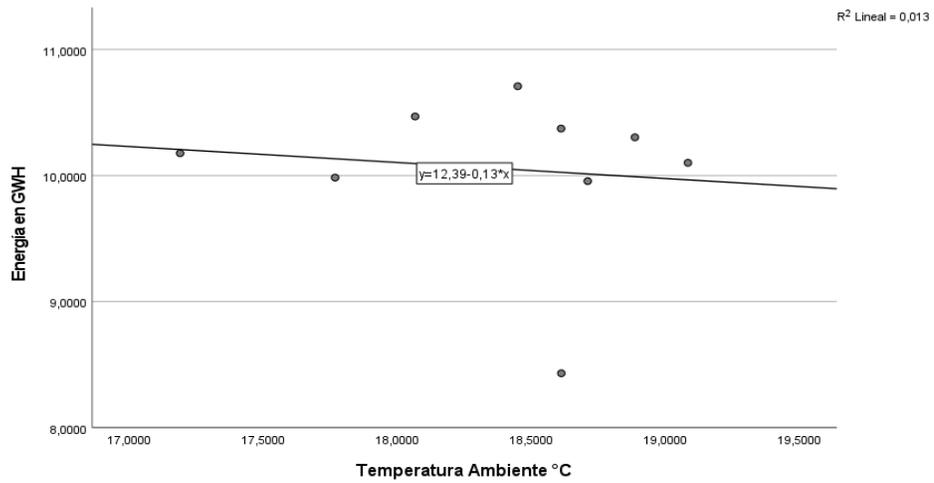
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Diagrama de dispersión, año 2009



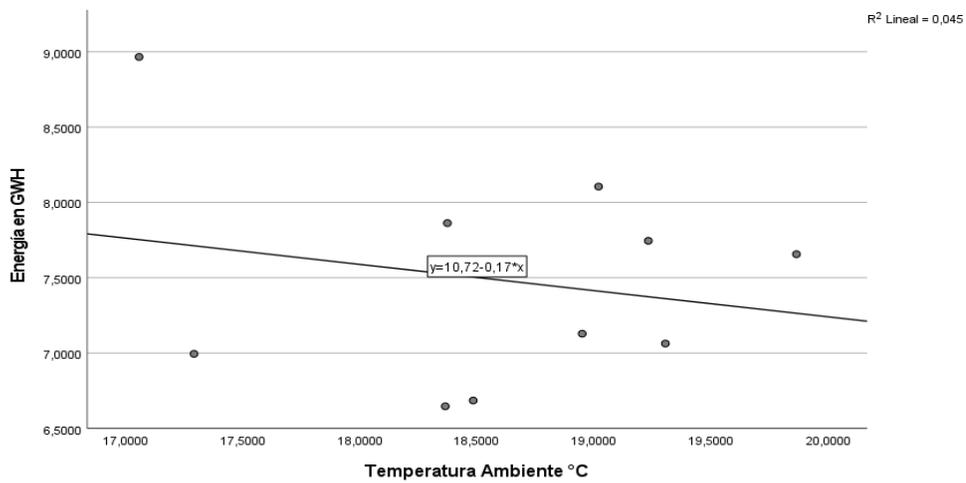
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Diagrama de dispersión, año 2012



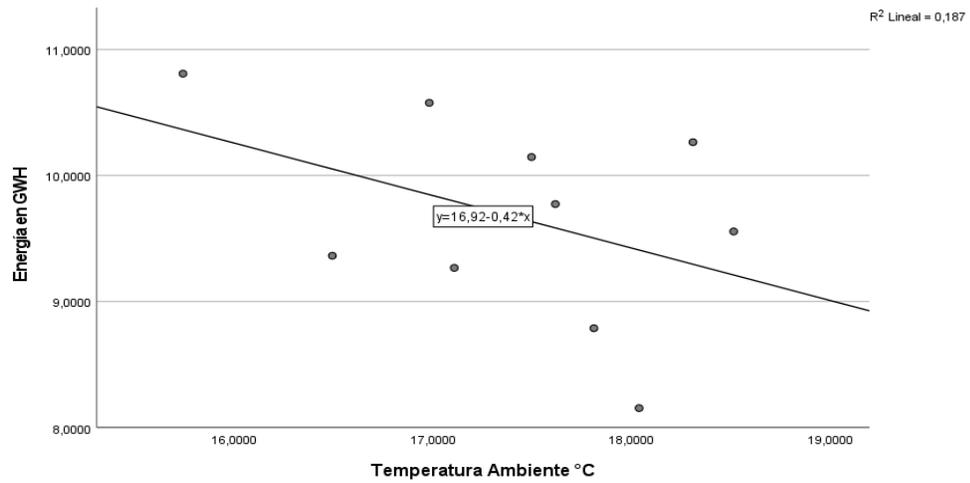
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Diagrama de dispersión, año 2014



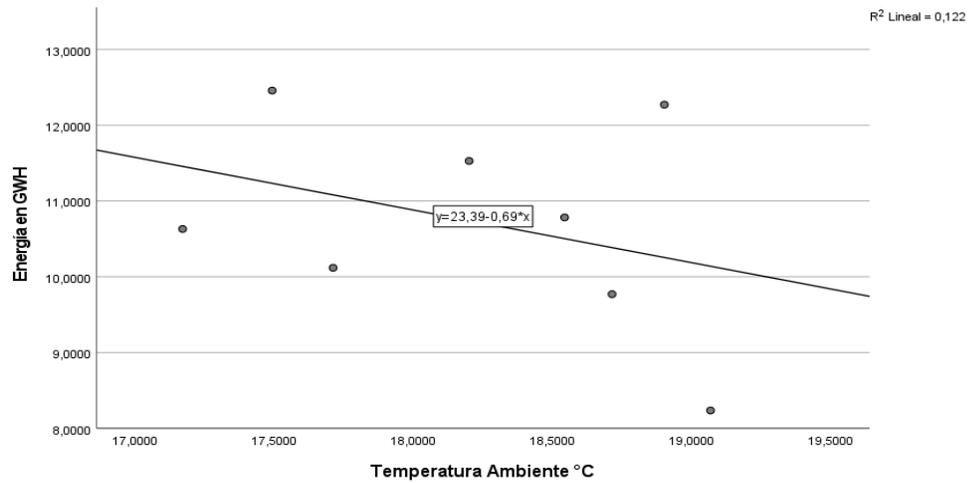
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Diagrama de dispersión, año 2017



Fuente: elaboración propia.

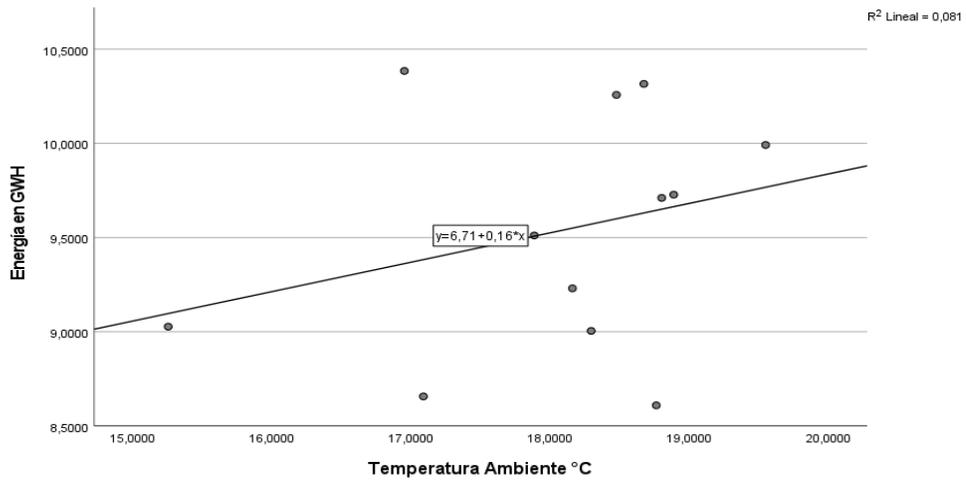
Figura 10. Diagrama de dispersión, año 2018



Fuente: elaboración propia.

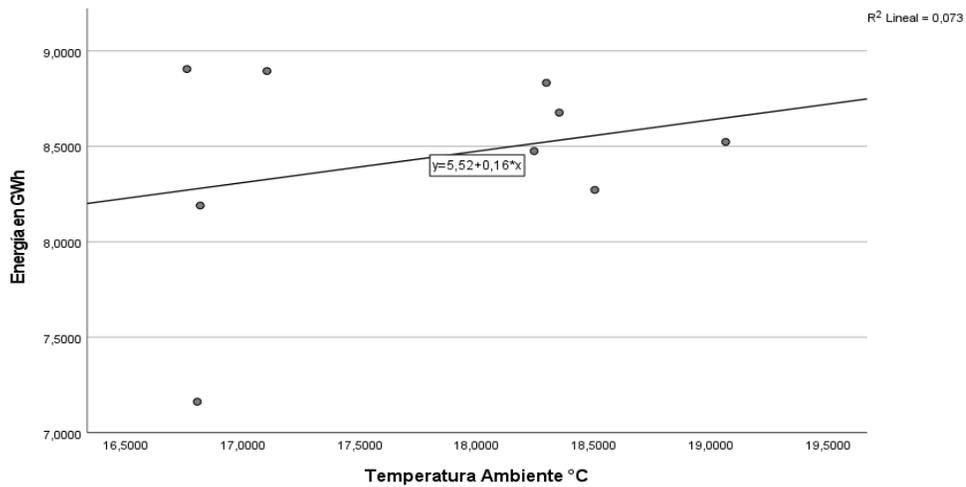
- Gráficas de los periodos con dirección positiva, año, 2010, 2011, 2013, 2015 y 2016.

Figura 11. Diagrama de dispersión, año 2010



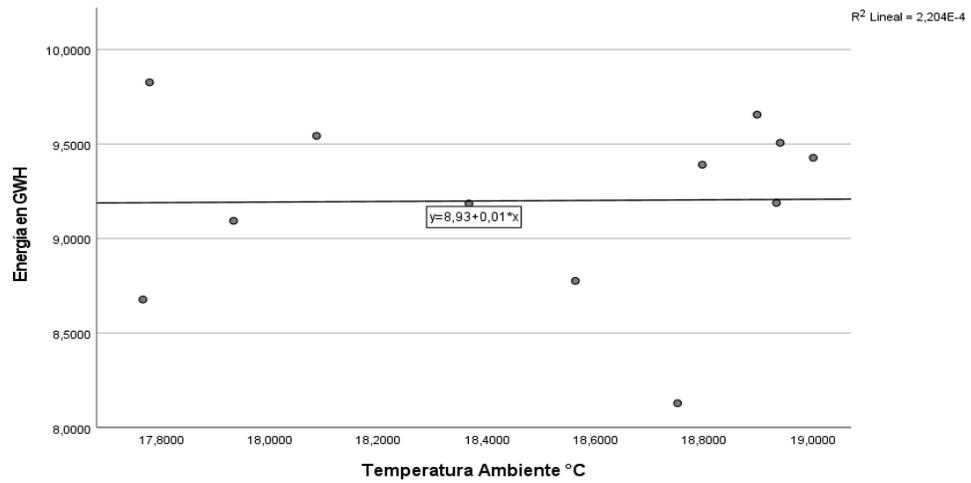
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Diagrama de dispersión, año 2011



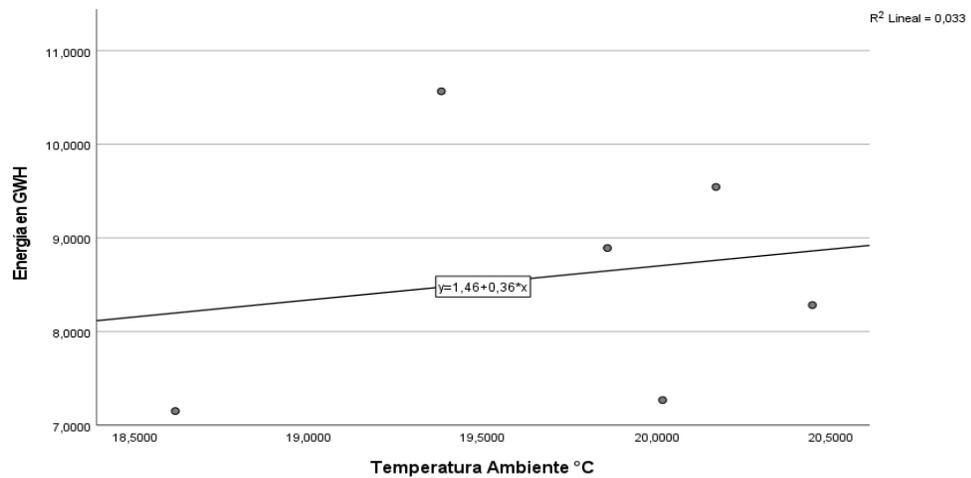
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Diagrama de dispersión, año 2013



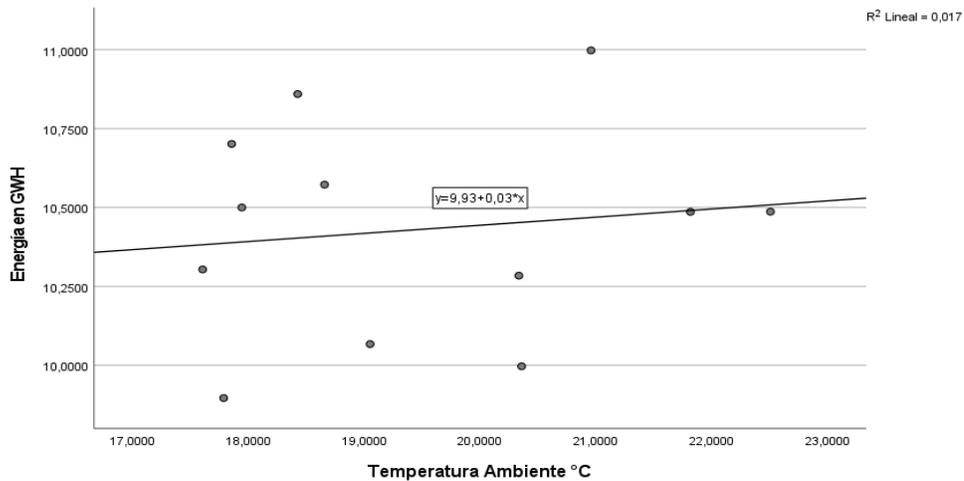
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Diagrama de dispersión, año 2015



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Diagrama de dispersión, año 2016



Fuente: elaboración propia.

4.2. Describir la variación estacional anual de la temperatura ambiente registrada en el periodo analizado y su incidencia en los meses más calurosos en la generación eléctrica de la planta

- Para analizar la variación estacional de la variable independiente, Temperatura Ambiente, se subdividieron cuatro grupos en periodos trimestrales de la siguiente manera:

Tabla V. Organización de los meses del año, para modelar el IVE

No	Período	Meses
1	Seco II	febrero, marzo y abril
2	Lluvia I	mayo, junio y julio
3	Lluvia II	agosto, septiembre y octubre
	Seco I	Noviembre, diciembre y enero
4		

Fuente: elaboración propia.

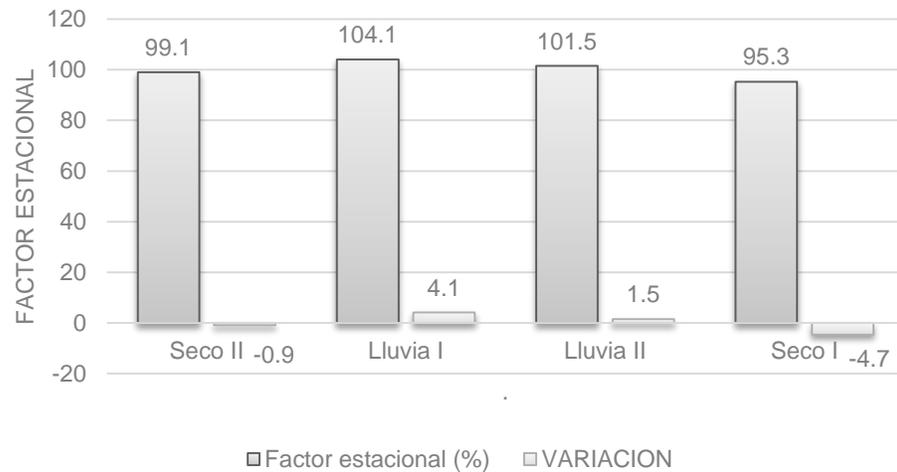
Tabla VI. **Datos factor estacional temperatura ambiente**

Período	Factor estacional (%)	Variación
Seco II	99.10	-0.94
Lluvia I	104.10	4.11
Lluvia II	101.50	1.50
Seco I	95.30	-4.67

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica del índice estacional de la variable Temperatura Ambiente, podemos observar la variación estacional en períodos trimestrales.

Figura 16. **Índice estacional, temperatura ambiente**



Fuente: elaboración propia.

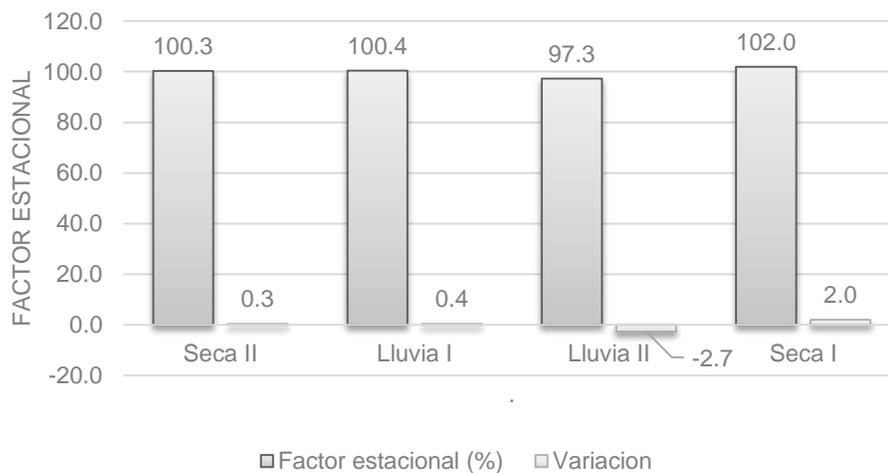
Tabla VII. **Datos factor estacional energía GWh**

Período	Factor estacional (%)	Variación
Seca II	100.3	0.29
Lluvia I	100.4	0.37
Lluvia II	97.3	-2.71
Seca I	102.0	2.04

Fuente: elaboración propia.

El Gráfico del índice Estacional de energía en GWh, muestra con detalles los datos modelados y los resultados obtenidos.

Figura 17. **Índice estacional, energía GWh**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Factores que inciden en un mejor rendimiento de los condensadores enfriados por aire, para mejorar el intercambio de calor y la generación eléctrica de la Central Geotérmica

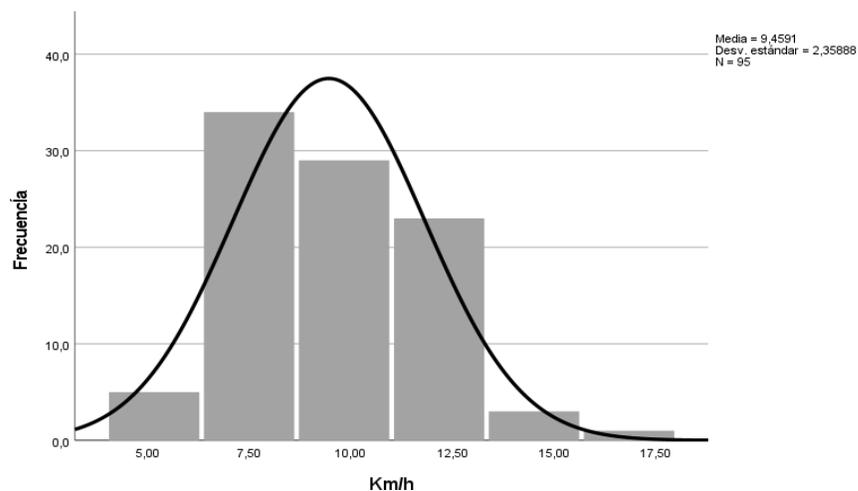
- Velocidad del viento

Tabla VIII. Datos del factor estacional velocidad del viento

Período	Factor estacional (%)	Variación
Seca II	111.51	11.56
Lluvia I	93.73	-6.32
Lluvia II	80.65	-19.43
Seca I	114.22	14.25

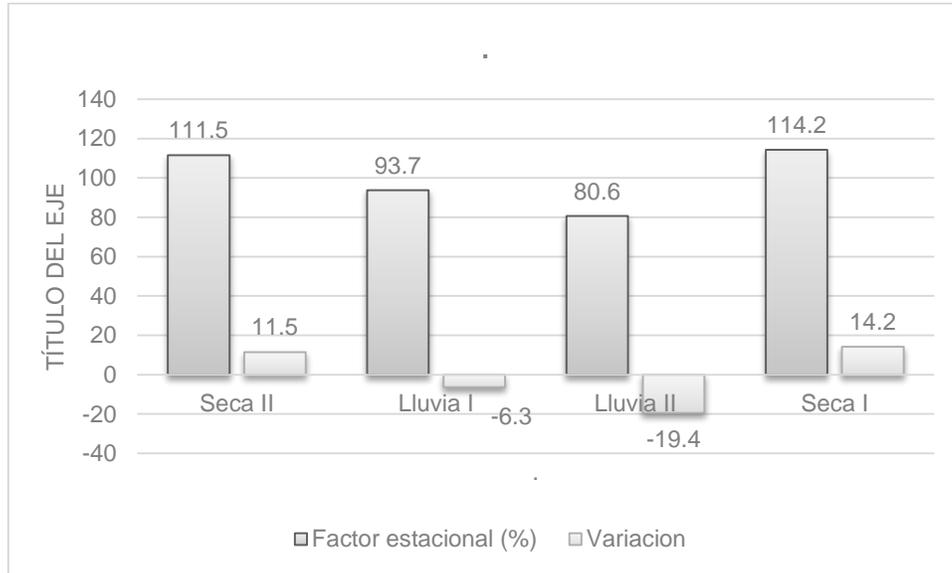
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Histograma velocidad del viento



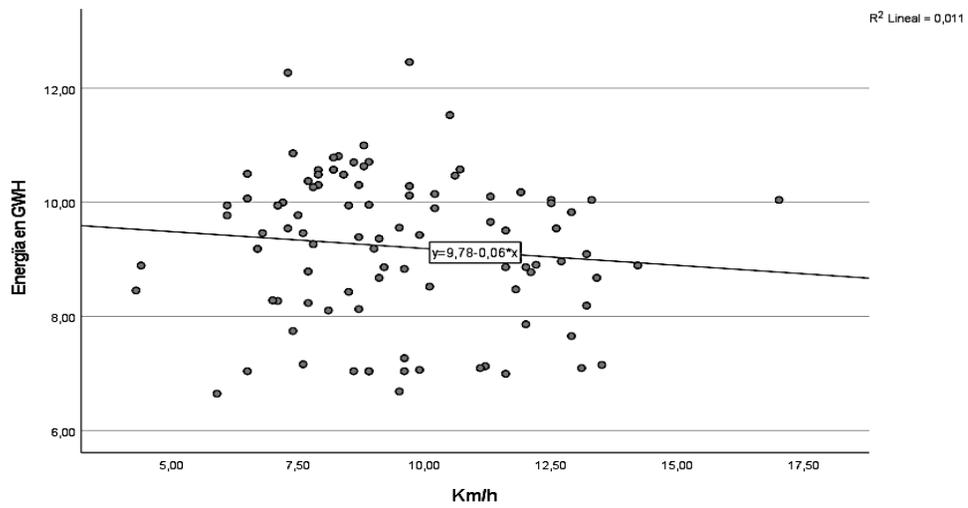
Fuente: elaboración propia, utilizando datos proporcionados por el Instituto de sismología, vulcanología, metodología e hidrología d Guatemala. Consultado el 19 de octubre de 2020.

Figura 19. Índice estacional velocidad del viento



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Diagrama de dispersión de datos, velocidad del viento



Fuente: elaboración propia

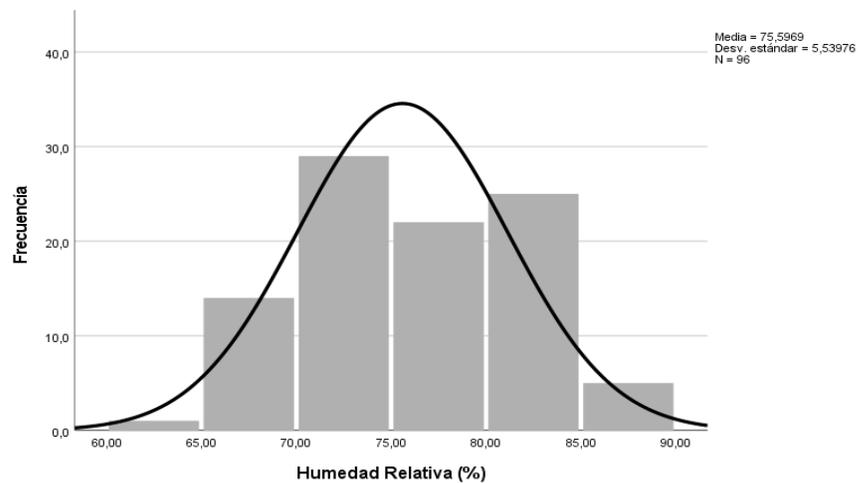
- Humedad relativa

Tabla IX. **Datos factor estacional, humedad relativa**

Período	Factor estacional (%)	Variación
Seco II	101.93	1.91
Lluvia I	102.31	2.30
Lluvia II	97.73	-2.37
Seco I	98.17	-1.93

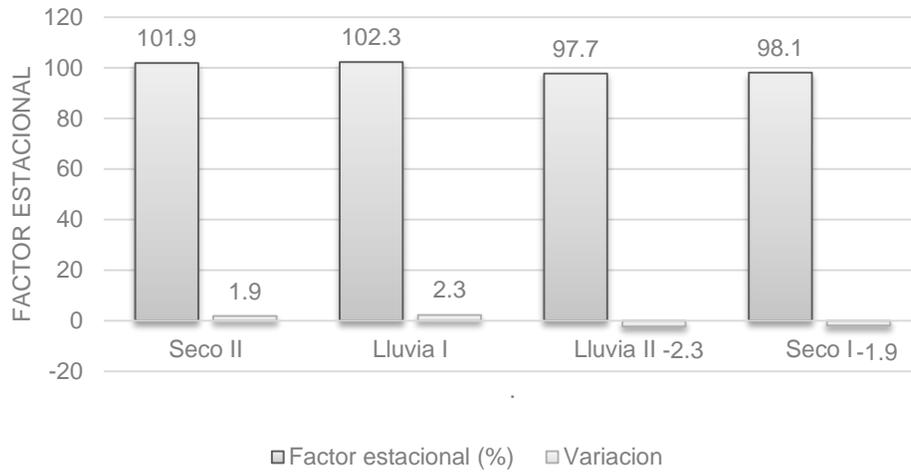
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Histograma humedad relativa**



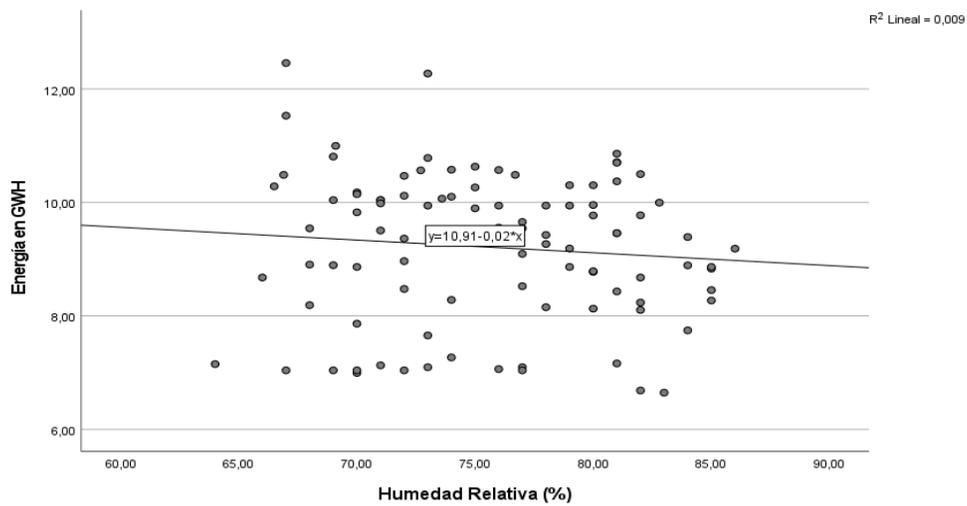
Fuente: elaboración propia, utilizando datos proporcionados por el Instituto de sismología, vulcanología, metodología e hidrología d Guatemala. Consultado el 19 de octubre de 2020.

Figura 22. Índice estacional humedad relativa



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Diagrama de dispersión de datos, humedad relativa



Fuente: elaboración propia.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Existencia de una correlación directa al evaluar la temperatura ambiente y la generación de energía eléctrica neta de la central geotérmica

Los modelos estadísticos utilizados para realizar las correlaciones entre las variables fueron seleccionados de manera cuidadosa. Se pudo observar que se necesitan grandes bancos de datos para desarrollar correlaciones más precisas. El estudio analizó cual es el efecto del clima en la eficiencia de los condensadores enfriados por aire.

La modelación de datos de índole longitudinal permite observar de forma gráfica, información sobre un proceso de cambio o comportamiento estacional de las variables de un estudio, lo que permitirá a los tomadores de decisión, estimar incidencias y anticipar futuros riesgos.

La matriz energética nacional, cuenta a la fecha con un número reducido de centrales geotérmicas y son importantes porque aportan estabilidad al sistema al ser catalogados como centrales de carga base, por tal motivo se espera, que aporten la mayor energía posible al sistema.

Es importante estudiar fenómenos externos que afecten su eficiencia, debido que, para la operación de la central geotérmica, muchos de estos fenómenos son complejos de entender.

Es necesario la realización de más estudios para verificar las tendencias halladas en la presente investigación, dadas las condiciones de crisis sanitaria en que se realizó este trabajo y la falta de datos históricos de las variables climáticas obtenidas de las estaciones meteorológicas a las que se tuvo acceso.

La evaluación de variables climáticas y su incidencia en los procesos de generación eléctrica en centrales térmicas, es un fenómeno complejo de modelar ya que para ello se necesita información de las variables climáticas de periodos extensos de tiempo, a los que no se tuvo acceso para realizar este estudio, por las razones ya justificadas.

En los registros obtenidos de la variable temperatura ambiente utilizados en este trabajo, se identificaron los siguientes datos: temperatura mínima registrada: $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, Máxima: $28.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperatura promedio: $18.33\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Los resultados de estadística descriptiva, de la variable independiente: temperatura Ambiente, proporcionaron la siguiente información: Media de los datos: $18.31\text{ }^{\circ}\text{C}$, mediana $18.37\text{ }^{\circ}\text{C}$, la desviación estándar fue de: $1.13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El registro de datos de la variable energía en GWh obtenidos en los informes del posdespacho de carga del AMM, permitieron identificar los siguientes datos; energía mínima entregada 2.96 GWh , energía máxima entregada 12.46 GWh , energía promedio entregada 9.28 GWh , total de energía entregada al SNI en el periodo 2008 al 2018: $1,362.97\text{ GWh}$.

En los resultados estadísticos de la modelación de la variable energía en GWh se obtuvo la siguiente información; Media: 9.69 GWh , Mediana: 9.90 GWh , la dispersión de la muestra se situó en 1.29 GWh .

El cambio climático es un fenómeno que afecta directamente la vida del ser humano y su entorno, los cambios en la temperatura ambiente y otras variables climáticas son poco comprendidos por la mayoría de las personas, sin embargo, los eventos climáticos extremos que ahora se dan con más frecuencia nos recuerdan que algo está sucediendo con nuestro medio ambiente.

El estudio determinó que el aumento de temperatura ambiente en la zona tiene el mismo comportamiento al alza observable a nivel mundial. Al agrupar periodos de años del 2008 al 2010, 2011 al 2014 y 2015 al 2018. Si se utiliza como base el periodo 2008 al 2010 donde el promedio de temperatura ambiente fue de 17.96 °C, para el período 2011 al 2014 se observa un incremento de 0.24 °C, en el periodo 2015 al 2018 el incremento fue de 0.78 °C. Según la Organización Meteorológica Mundial, el período 2014 al 2018, ha sido el período más caluroso hasta la fecha registrada a nivel mundial, con un incremento de temperatura de $1.04 \text{ °C} \pm 0.09 \text{ °C}$, al evaluar el mismo período en la región donde se ubica la central, el incremento fue de 0.73 °C.

Como se observa en el párrafo anterior, los años base de la investigación mostraron tener un promedio de temperatura ambiente más bajo en comparación a los años más recientes del estudio. Los cambios suscitados en las variables climáticas analizadas durante el período del estudio demostraron tener una incidencia directa con la generación neta de la central geotérmica.

Durante el período en que se analizó el fenómeno atmosférico de temperatura ambiente y como este afecta la generación neta de la central, los modelos estadísticos utilizados de regresión lineal permitieron observar, la existencia de una correlación directa entre ambas variables.

La prueba estadística de correlación paramétrica de PEARSON (r), se cumplieron con los siguientes supuestos: datos analizados 113, la distribución de los datos es normal, la variable independiente y dependiente fueron de intervalo y razón. Los datos obtenidos fueron: dirección negativa, fortaleza -0.127 y un coeficiente de determinación de 0.016.

El modelo de regresión logarítmica para corroborar la información obtenida en el modelo de Pearson proporcionó los siguientes datos: dirección negativa, el modelo de regresión logarítmica obtenido fue $y = 19,314 * \ln(x) - 3.316$, y un coeficiente de determinación de 0.023.

Como se indicó en los párrafos anteriores, la fortaleza de la correlación es débil, esto debido a que no se tiene control de las variables analizadas, también por el hecho que las variables climáticas son muy fluctuantes por eventos climáticos que se dan propios de cada temporada de lluvia o en la época seca. En la sección del marco teórico se describe; que en algunos casos se pueden obtener una relación significativa entre variables incluso si los coeficientes de correlación son igual o cerca de ser 0.

Al analizar cada año por separado, no todos los periodos demostraron tener una correlación directa. La modelación interanual donde se obtuvo una dirección negativa aportó los siguientes datos; 2008 fortaleza de -0.221, 2009 fortaleza de -0.319, 2012 fortaleza de -0.116, 2014 fortaleza de -0.212, 2017 fortaleza de -0.432 y para el año 2018 fortaleza de -0.349.

La modelación interanual donde se obtuvo una dirección positiva, los datos obtenidos fueron: 2010 fortaleza de 0.285, 2011 fortaleza de 0.269, 2013 fortaleza de 0.015, 2015 fortaleza de 0.182 y 2016 fortaleza de 0.129.

En los párrafos anteriores se puede observar que al analizar cada año por separado no existe una tendencia, algunos años mostraron tener una fortaleza negativa y en algunos otros una fortaleza positiva. Sin embargo, a pesar de la falta de homogeneidad, se obtuvo una correlación directa entre ambas variables al modelar todo el periodo analizado.

Al evaluar la relación directa que tiene el aumento de temperatura ambiente de la zona con la generación neta de la central, se obtuvieron los siguientes resultados. En el periodo base comprendido entre 2008 al 2010 el promedio de energía generada y entregada al SNI fue de 10.44 GWh, para el periodo 2011 al 2014 la generación de energía neta sufrió un descenso de -1.63 GWh y para el periodo comprendido entre el 2015 al 2018 el descenso fue de -0.82 GWh en comparación al periodo base.

5.2. Incidencia de la temperatura ambiente en la generación eléctrica de la central geotérmica

Actualmente, no se cuenta con suficientes estaciones meteorológicas en el país y especialmente en la región de la boca costa. Mejorar la cobertura, puede incidir en la exploración de otros fenómenos atmosféricos que afecten la eficiencia de la central eléctrica estudiada y en la utilización de otros métodos para la validación de los datos analizados.

Evidencia empírica no comprobada por un modelo estadístico, sugiere que, en los meses de agosto, septiembre y octubre que comprende el segundo trimestre de la época de lluvias, la central geotérmica es menos eficiente y por tal razón en este periodo han sido programados en años anteriores los mantenimientos generales de la central.

El análisis de índice estacional permite identificar patrones que, al comparar los resultados entre variables, proporciona elementos que mejoran la comprensión de cómo estas afectan el rendimiento de la central.

En Guatemala, no se marcan las cuatro estaciones del año, la estacionalidad climática en la región se conforma de dos periodos, la época de lluvia que inicia en el mes de mayo y termina en octubre y la época seca que inicia en noviembre y culmina en abril.

Por su parte, la temperatura ambiente es susceptible a diversos acontecimientos climáticos con características específicas de cada año calendario, como sequias prolongadas, tormentas o huracanes y otros eventos climáticos.

Por otro lado, la variable Energía en GWh es susceptible a eventos propios de la operación como lo son salidas forzadas por mantenimiento correctivo o preventivo, el propio recurso geotérmico, los daños ocasionados a la infraestructura de la central por eventos climáticos extremos; entre ellos deslaves que afectan las líneas de acarreo del recurso primario o líneas de reinyección y otros.

El factor estacional de la variable; Temperatura Ambiente (°C) fue para los meses de febrero, marzo y abril de 99.1 %, para los meses de mayo, junio y julio fue de 104.1 %, el factor para los meses de agosto, septiembre y octubre fue de 101.5 %, es importante considerar que según la información proporcionada por el INSIVUMEH en el mes de julio y parte de agosto se presenta un periodo seco en la región llamado canícula. Para los meses de noviembre, diciembre y enero se registró el factor estacional más bajo que fue de 95.3 %

Al evaluar el índice estacional de la variable temperatura ambiente, se observó un descenso en los meses de noviembre, diciembre y enero de - 4.67 °C en promedio, para los meses de febrero, marzo y abril la temperatura descendió de - 0.95 °C.

La temperatura ambiente se incrementa en la época de lluvia. En los meses de mayo, junio y julio se observó un aumento de 4.12 °C, en los meses de agosto, septiembre y octubre la temperatura tuvo un incremento de 1.50 °C en promedio.

El factor estacional al modelar la variable dependiente Energía en GWh fueron los siguientes: para los meses de noviembre, diciembre y enero 102 %, en los meses de febrero, marzo y abril fue de 100.3 %, los meses de mayo, junio y julio el factor estacional se situó en 100.4 % y para los meses de agosto, septiembre y octubre fue de 97.3 %.

El análisis de la variación estacional de la variable energía en GWh permitió observar el siguiente comportamiento, para los meses de noviembre, diciembre y enero la energía neta tuvo un incremento del 2.05 %, lo anterior indica que fue el período estacional de mejor generación neta de la central, para los meses de febrero, marzo y abril el incremento fue de: 0.30 %, los meses de mayo, junio y julio el incremento observado fue de: 0.37 %.

Contrario a lo descrito en el párrafo anterior, los meses de agosto, septiembre y octubre que constituyen el segundo trimestre de la época lluviosa en la región, la generación neta de la central presentó un descenso de -2.71 %.

Se pudo observar que el primer trimestre de la época seca se caracteriza por bajas temperaturas que favorecen la disipación del calor del fluido orgánico

a través de los condensadores enfriados por aire, lo que benefició la generación eléctrica neta de la central.

En el segundo trimestre de la época seca, se observa un ligero ascenso de la temperatura sin embargo existen condiciones aceptables para mantener una adecuada generación de electricidad.

El análisis estacional permitió identificar que el rendimiento de la central geotérmica, en el primer trimestre de la época de lluvias que en ocasiones incluye el periodo de canícula no se vio afectada considerablemente, como sucedió en los tres meses subsiguientes de la misma época estacional.

5.3. Incidencia de otros factores ambientales en el rendimiento de los condensadores enfriados por aire

Para analizar otros factores ambientales que influyen en la generación neta de la central, se evaluaron las variables velocidad del viento y porcentaje de humedad relativa.

Se concluyó que la velocidad del viento es determinante en mejorar la eficiencia de la disipación del calor en los condensadores enfriados por aire y su estacionalidad tiene una relación directa con la estacionalidad de la temperatura ambiente.

Al utilizar el aire como medio de enfriamiento en los condensadores utilizados para disipar el calor del fluido motriz en un ciclo binario, algunos estudios realizados en China, especialmente, han demostrado que su rendimiento es susceptible a la dirección y velocidad del viento, e inciden en las

presiones y calidad de saturación del fluido motriz que regresa al ciclo para la transferencia de calor del recurso geotérmico.

Este estudio se limita a analizar la estacionalidad de las variables climáticas y su incidencia en la generación neta de la central, y es un estudio pionero en la región, por lo que algunas asociaciones entre variables atmosféricas y de rendimiento de la central, merecen ser exploradas y analizadas posteriormente, con mayor detenimiento y equipo de medición.

Se evaluó la estacionalidad de la variable velocidad del viento en la región, tomando en cuenta que es un factor importante en el análisis, y se identificaron los siguientes datos, la velocidad mínima del viento registrada en el período analizado fue de: 0.0 km/h, la velocidad máxima registrada fue de 35.1 km/h y el promedio fue de: 9.4 km/h.

En la época seca se registraron vientos con mayor velocidad; en los meses de noviembre, diciembre y enero se pudo observar que el viento tuvo un aumento de 14.2 km/h sobre el factor estacional y para los meses de febrero, marzo y abril que componen el segundo trimestre de la época seca en la región, la velocidad del viento fue de 11.5 km/h.

Se observó que los vientos disminuyeron considerablemente en la época de lluvias, en el primer trimestre que comprende los meses de mayo, junio y julio los vientos disminuyeron -6.0 km/h en relación con el factor estacional y para los meses de agosto, septiembre y octubre los vientos disminuyeron -19.4 km/h.

En el período de época seca se observan condiciones del viento idóneas, que favorecen una buena disipación del calor en los condensadores y estimula la generación eléctrica de la central. La época de lluvias se caracteriza por la

ausencia de vientos haciendo menos eficiente la disipación del calor del ciclo binario.

Por su parte el porcentaje de humedad relativa en la región se mantiene en punto de rocío en los meses de febrero, marzo y abril clasificados en el presente estudio como el segundo trimestre de la época seca, y en los meses de mayo, junio y julio, primer trimestre de la época de lluvias.

Al modelar las variables humedad relativa y velocidad del viento con la variable Energía en GWh. Utilizando el método de correlación lineal de Pearson, se observaron correlaciones de dirección negativa con fortaleza débil en ambos casos. Siendo estas: -0.126 y -0.107 respectivamente.

Como se ha descrito en varias ocasiones, las correlaciones son de fuerza débil en todos los casos en que se aplicó el método de correlación lineal, debido a la variabilidad climática y otros factores ya descritos, pero los resultados siguen siendo representativos. Posteriormente se pueden continuar haciendo estudios para verificar estas tendencias con los datos utilizados en este trabajo y datos futuros.

El índice de estacionalidad de humedad relativa permitió observar que para los meses de agosto, septiembre y octubre hubo un descenso de -2.3 % de humedad relativa en la región y para los meses de noviembre, diciembre y enero fue de -1.9 %.

Se observó un aumento del porcentaje de humedad relativa en la región en los meses de febrero, marzo y abril del 1.9 % y 2.3 % para el primer trimestre de la época de lluvias.

Se puede concluir que el segundo trimestre de la época de lluvias se caracteriza por la ausencia de vientos, una disminución mínima del porcentaje de humedad relativa y altas temperaturas, siendo este periodo estacional el menos eficiente para disipar el calor de los condensadores enfriados por aire, desfavoreciendo la generación eléctrica de la central.

Este estudio establece una primera línea de observación y análisis de las variables climáticas, que afectan la eficiencia de la central geotérmica y puede contribuir a gestionar de mejor forma los periodos de mantenimiento programados y la gestión para la optimización de la generación, considerando la estacionalidad climática de la región como un factor importante.

CONCLUSIONES

1. Los años base de la investigación mostraron tener un promedio de temperatura ambiente más bajo en comparación a los años más recientes, en promedio se observó un incremento de 0.78 °C. Los cambios suscitados en las variables climáticas analizadas demostraron tener una incidencia directa con la generación neta de la central, en promedio se observó un descenso de 0.82 GWh de energía entregadas al SIN en el mismo período.
2. Las variables climáticas son fenómenos complejos de analizar por su alta variabilidad, los diagramas de dispersión interanual efectuados no concluyeron en una misma dirección, sin embargo, al modelar todo el período se observó un diagrama de dispersión con dirección negativa de fuerza débil. Es importante la realización de más estudios para verificar esta tendencia, dadas las condiciones en que se realizó esta investigación y la falta de datos históricos a la fecha existentes de las variables climáticas.
3. Los meses de noviembre, diciembre y enero se caracterizan por tener condiciones ideales de temperatura en la región, favoreciendo la disipación del calor del fluido orgánico a través de los condensadores enfriados por aire, lo que benefició la generación eléctrica neta de la central.
4. La estacionalidad del viento es un factor concluyente en mejorar la generación neta de la central. Sin embargo, la variabilidad de humedad relativa es discutible, en el transcurso de los dos periodos climáticos que caracterizan a la región, el porcentaje de humedad relativa es prácticamente de punto de rocío.

RECOMENDACIONES

1. Considerar la presente investigación, como alternativa para profundizar en el monitoreo y observación de las variables climáticas que afecten la eficiencia de la central. En especial observar el comportamiento de la variable temperatura ambiente, considerando que su incremento producto del fenómeno de cambio climático puede afectar la generación de la central y traer consigo, un efecto de pérdida económica considerable a mediano y largo plazo.
2. Estimar esta investigación como un instrumento de apoyo a la toma de decisiones, en la programación de mantenimiento general y parcial de la central geotérmica. Principalmente por los resultados observados en los índices de variación estacional.
3. Considerar la obtención de una central meteorológica propia, que proporcione datos atmosféricos de forma más fiable del lugar donde se ubica la central y que registre variables de temperatura ambiente, dirección predominante y velocidad del viento, precipitación, insolación, radiación, humedad relativa, tensión de vapor y punto de rocío.
4. Valorar este estudio como uno de los primeros en su tipo en la región, por lo que algunas asociaciones entre variables merecen ser exploradas y analizadas en estudios posteriores, con mayor detenimiento y equipo de medición.

5. Estimar la continuación de este estudio, donde puedan tomarse de referencia series de variables climáticas, de centrales meteorológicas que estén ubicadas en la región o más cercanas a la central analizada.

REFERENCIAS

1. Ashby y Michael F. (2016). *Materials and Sustainable Development* Amsterdam. Elsevier. DOI:10.1016/B978-0-08-100176-9.00001-3.
2. Asturias, F. A. (March, 2012). Status Update of Geothermal Development in Guatemala. *Geothermal Trining Programme*. p.1-11. Recuperado de <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-14-09.pdf>.
3. Baray, H. L. (2006). *Introduccion a la Metodologia de la Investigacion*. Ciudad: Chihuahua, Mexico. Edición electrónica. Recuperado: <https://www.eumed.net/libros/index.html>.
4. Bustamante, J.G, Tattner, A.S y Garimella, S. (july, 2019). Achieving near-water-cooled power plant performance with air-cooled condensers. *Applied Thermal Engineering*. Volumen(105). DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.05.065.
5. Cengel, Y. A. (2012). *Termodinámica* (Séptima Edición). New York, USA. Mc Graw Hill
6. Chamorro *et al.* (june, 2012). World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy *Energy*. Volumen(42). DOI:10.1016/j.energy.2011.06.005
7. Cheng, Y. Li, B, Li, Z y Shi. X. (march, 2019). Numerical simulation study of novel air-cooled condenser with lateral air supply *Case Studies in*

8. *Decreto 8-2020.* Congreso de la Republica de Guatemala, Diario de Centroamérica, Guatemala. 21 de marzo de 2020.
9. DiPippo, R. (2016). *Geothermal Power Generation.* Ámsterdam. Elsevier.
DOI:10.1016/B978-0-08-100337-4.00008-5.
10. Enel Green Power (2016). *Geothermal Power generation in the world 2010 - 2014 update report.* Geothrmics. Pisa, Italia. Bertani.
11. GeoThermal, (2019). *Energy.* Bruselas. Autor.
12. Ibarra, M. Rovira, A. y Padilla, D.C. (february, 2019). Performance of an Organic Rankine Cycle with two expanders at off-design operation
Applied Thermal Engineering. Volumen(149).
DOI:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.083.
13. INSIVUMEH, (2018). *Regiones Climaticas en Guetemala.* Guatemala. Autor.
14. IPCC, (2010). *Geotermal Energy.* Ginebra. Autor.
15. IPCC, (2019). *Climate Change and Land.* Ginebra. Autor.
16. IPCC, A. D. (2011). *IPCC Special Report of the Intergovernmental.* Ginebra. Autor.

17. Jacobson *et al.* (september, 2017). 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World. *Joule*. Volumen (1). DOI:10.1016/j.joule.2017.07.005.
18. Kahramana, M . Olcay, A. B. y Sorgüven, E. (july, 2019). Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a 21 MW binary type air-cooled geothermal power plant and determination of the effect of ambient temperature variation on the plant performance. *Energy Conversion and Management*. Volumen(192). DOI:10.1016/j.enconman.2019.04.036
19. Karmaker, Rahman, Hossain y Admed. (january, 2019). Exploration and corrective measures of greenhouse gas emission from fossil fuel power stations for Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*. Volumen(244). DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118645
20. Lee, Hashim, Ho, Fan y Klemes. (march, 2017). Sustaining the low-carbon emission development in Asia and beyond: Sustainable energy, water, transportation and low-carbon emission technology. *Journal of Cleaner Production*. Volumen(146). DOI:10.1016/j.jclepro.2016.11.144.
21. Lin, Mahvi, J. A . y Kunke, T.S. (april, 2020). Improving air-side heat transfer performance in air-cooled power plant condensers. *Applied Thermal Engineering*. Volumen(170) DOI:/10.1016/j.applthermaleng.2020.114913.
22. Mahvi, Rattner, Lin y Garimella. (march, 2018). Challenges in predicting steam-side pressure drop and heat transfer in air-cooled power plant

condensers *Thermal Engineering*. Volumen(133).
DOI:10.1016/j.applthermaleng.2018.01.008.

23. Martínez, I. (2019). *Thermal Machines and Heat Engines. Lectures on Thermodynamics*. Madrid, España. DOSSAT,S.A. Recuperado de <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c17/Power.pdf>.
24. McGoodwin, M. C. (2016). *Engineering Thermodynamics. Summary of topics from University of Washington Course*. Washington, USA. Autor. Recuperado de <https://www.mcgoodwin.net/pages/thermodynamics.pdf>.
25. Morales, J. C. (2014). *Fuentes de Energia Renovables y No Renovables. Aplicaciones*. México, México. Alfaomega.
26. Organizacion Mundial de la Salud (2020). *Nuevo Coronavirus*. Ginebra, Suiza. Autor.
27. Organization World Meteorological (2019). WMO Statement on the State of the *Global Climate in 2019*. Ginebra, Suiza. Autor.
28. Paul *et al.* (february, 2018). Global Carbon Cycling on a Heterogeneous Seafloor. *Trends in Ecology & Evolution* Valumen (33). DOI:10.1016/j.tree.2017.11.004.
29. Pattanayaka, L. Padhi, B. N. y Kodamasingh, B. (September, 2019). Thermal performance assessment of steam surface condenser. *Case Studies in Thermal Engineering*. Volumen(14). DOI:10.1016/j.csite.2019.100484.

30. Pedraza, J. M. (2019). *Conventional Energy in North America*. Ámsterdam. Elsevier. DOI:10.1016/B978-0-12-814889-1.00002-4.
31. Perera, Nik y Scartezzini. (february, 2019). Impacts of extreme climate conditions due to climate change on the energy system design and operation. *Energy Procedia*. Volumen(159). DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.002.
32. Pipatsawet, J y Podisuk, M. (october, 2013). Temperature Rise of the Earth. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Volumen(88). DOI:10.1016/j.sbspro.2013.08.499.
33. Rahman, B.A. y Amin, S.B. (2018). *Energy Resources in Bangladesh*. Suisa. Springer. DOI:10.1007/978-3-030-02919-7.
34. Sun, Q. *et al.* (september, 2017). Thermodynamic Optimization of a Double-pressure Organic Rankine Cycle Driven by Geothermal Heat Source. *Energy Procedia*. Volumen(129). doi:10.1016/j.egypro.2017.09.214.
35. Shortall, R. Davidsdottir, B. Axelsson, G. (october, 2015). A sustainability assessment framework for geothermal energy projects: Development in Iceland, New Zealand and Kenya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volumen (50). DOI:10.1016/j.rser.2015.04.175.
36. ThinkGeoEnergy(2019). *Top 10 Geothermal Countries 2018, Installed Capacity in MWe Year-End 2018*. Islandia. Autor.

37. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2019). *World Population United States*. Autor.
38. United-Nations, (June, 1992). *United Nations conference on environment & development Rio de Janerio sustainable development. Agenda 21*. United States. Autor.
39. World Economic Forum. (2019). *The Global Risks Report 2019* 14th Edition. .Ginebra. Autor.
40. Xiao *et al.* (november, 2019). Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 year. *Reomote Sensing of Environment*. Volumen(233). DOI:10.1016/j.rse.2019.111383.
41. Yang, L.J. Du, X. D. y Yang, Y:P. (july, 2011). Space characteristics of the thermal performance for air-cooled condensers at ambient winds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volumen(54). DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.023.
42. Yaning, Li y Shi (june, 2014). Quantitatively evaluating the effects of CO₂ emission on temperature rise. *Quaternary International*. Volumen(336). DOI:10.1016/j.quaint.2013.11.031.
43. Yilan y Kadirgan (february, 2020). Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey. *Renewabel Energy*. Volumen(146). DOI:10.1016/j.renene.2019.06.164.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de energía eléctrica entregada al sin

Datos de Energía en GWh												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018	10.6314	10.1189	11.5297	10.7842	8.2360	5.0227	6.3817	6.6910	6.1999	9.7710	12.2722	12.4584
2017	10.8087	9.3636	10.5774	10.1471	10.2649	9.7738	9.5561	6.6284	5.4009	8.7883	9.2672	8.1542
2016	10.0675	10.2843	10.9978	10.4864	10.4868	9.9970	10.5724	10.8595	10.5001	10.7013	10.3039	9.8965
2015	7.1505	6.1172	6.7817	5.9363	6.7534	6.9312	7.2682	8.2825	8.4550	8.8922	9.5443	10.5661
2014	8.9658	6.9951	7.8629	7.1290	7.7453	8.1052	7.6564	7.0633	6.6469	6.6852	5.9613	5.4387
2013	9.8266	8.6775	9.5437	9.5065	9.6557	9.1885	9.4276	8.1288	9.1852	9.3908	8.7759	9.0939
2012	3.8136	4.1701	5.9753	10.4691	10.3729	9.9558	10.1013	8.4315	10.3036	10.7091	9.9840	10.1770
2011	8.9051	8.1903	8.8947	8.4754	8.5235	8.2721	8.6770	7.1624	8.8330	5.4391	2.9609	3.0349
2010	10.3850	9.5113	10.2578	9.7280	9.9918	9.7108	10.3161	8.6091	9.2305	9.0045	8.6567	9.0270
2009	10.6231	10.1755	11.1147	10.6036	11.1261	10.7058	10.5602	8.8334	10.6200	10.5158	10.2820	10.6839
2008	11.9159	11.4406	12.0191	11.2932	12.0029	11.0211	11.4435	9.2381	11.2862	11.5235	11.2069	11.0970

Fuente: elaboración propia, utilizando datos obtenidos del posdespacho de carga del AMM.
Consultado el 28 de agosto de 2020. Recuperado de www.amm.org.gt.

Anexo 2. Tabla de temperatura ambiente °C

Datos de Temperatura Ambiente en °C												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018	17.17	17.71	18.20	18.54	19.07	18.71	20.02	19.22	19.23	18.71	18.90	17.49
2017	15.74	16.49	16.98	17.49	18.31	17.61	18.51	17.82	17.66	17.81	17.11	18.04
2016	19.05	20.33	20.96	21.82	22.51	20.36	18.66	18.42	17.94	17.85	17.60	17.79
2015	18.62	17.82	18.80	19.69	19.65	19.97	20.02	20.45	19.48	19.86	20.17	19.38
2014	17.05	17.29	18.37	18.95	19.23	19.02	19.86	19.20	18.36	18.48	18.28	17.81
2013	17.78	17.77	18.09	18.94	18.90	18.93	19.00	18.75	18.37	18.80	18.56	17.93
2012	16.73	17.66	17.65	18.07	18.61	18.71	19.08	18.61	18.89	18.45	17.77	17.19
2011	16.76	16.82	17.10	18.24	19.06	18.50	18.35	16.80	18.30	17.49	17.91	17.35
2010	16.95	17.89	18.48	18.89	19.55	18.80	18.67	18.76	18.16	18.29	17.09	15.25
2009	16.29	16.94	16.68	18.24	18.22	18.46	19.54	19.09	19.03	18.82	17.98	16.88
2008	16.52	16.61	17.32	18.33	18.78	18.05	18.21	18.49	18.45	18.65	16.98	16.61

Fuente: elaboración propia, utilizando datos proporcionados por el Instituto de sismología, vulcanología, metodología e hidrología de Guatemala. Consultado el 19 de octubre de 2020.

Anexo 3. Datos de energía

Datos de Energía en GWh (Media Recortada)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018	10.6314	10.1189	11.5297	10.7842	-	-	-	-	-	9.7710	12.2722	12.4584
2017	10.6314	10.1189	11.5297	10.7842	8.2360	-	-	-	-	9.7710	12.2722	12.4584
2016	10.8087	9.3636	10.5774	10.1471	10.2649	9.7738	9.5561	-	-	8.7883	9.2672	8.1542
2015	10.0675	10.2843	10.9978	10.4864	10.4868	9.9970	10.5724	10.8595	10.5001	10.7013	10.3039	9.8965
2014	7.1505	6.1172	6.7817	5.9363	6.7534	6.9312	7.2682	8.2825	8.4550	8.8922	9.5443	10.5661
2013	9.8266	8.6775	9.5437	9.5065	9.6557	9.1885	9.4276	8.1288	9.1852	9.3908	8.7759	9.0939
2012	-	-	-	10.4691	10.3729	9.9558	10.1013	8.4315	10.3036	10.7091	9.9840	10.1770
2011	8.9051	8.1903	8.8947	8.4754	8.5235	8.2721	8.6770	7.1624	8.8330	-	-	-
2010	10.3850	9.5113	10.2578	9.7280	9.9918	9.7108	10.3161	8.6091	9.2305	9.0045	8.6567	9.0270
2009	10.6231	10.1755	11.1147	10.6036	11.1261	10.7058	10.5602	8.8334	10.6200	10.5158	10.2820	10.6839
2008	11.9159	11.4406	12.0191	11.2932	12.0029	11.0211	11.4435	9.2381	11.2862	11.5235	11.2069	11.0970

Fuente: elaboración propia, utilizando datos obtenidos del posdespacho de carga del AMM.
Consultado el 28 de agosto de 2020. Recuperado de www.amm.org.gt.

Anexo 4. Datos de energía eléctrica entregada al SNI, ajustado

Datos de Temperatura Ambiente °C (Media Recortada)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018	17.1700	17.7109	18.1997	18.5430	-	-	-	-	-	18.7135	18.9015	17.4919
2017	15.7394	16.4912	16.9791	17.4937	18.3062	-	-	-	-	17.8078	17.1050	18.0353
2016	19.0497	20.3346	20.9574	21.8157	22.5066	20.3580	18.6566	-	-	17.8545	17.6038	17.7851
2015	18.6151	17.8185	18.8024	19.6912	19.6544	19.9667	20.0162	20.4468	19.4806	19.8575	20.1697	19.3800
2014	17.0547	17.2894	18.3726	18.9490	19.2315	19.0188	19.8648	19.2045	18.3636	18.4829	18.2846	17.8095
2013	17.7778	17.7656	18.0853	18.9392	18.8966	18.9322	19.0000	18.7501	18.3659	18.7957	18.5619	17.9325
2012	-	-	-	18.0658	18.6103	18.7096	19.0836	18.6112	18.8858	18.4487	17.7672	17.1889
2011	16.7591	16.8159	17.1012	18.2433	19.0621	18.5026	18.3507	16.8036	18.2957	-	-	-
2010	16.9519	17.8856	18.4759	18.8878	19.5485	18.8014	18.6732	18.7626	18.1597	18.2946	17.0884	15.2541
2009	16.2904	16.9436	16.6776	18.2419	18.2155	18.4586	19.5437	19.0915	19.0253	18.8224	17.9831	16.8798
2008	16.5200	16.6100	17.3200	18.3300	18.7800	18.0500	18.2100	18.4900	18.4500	18.6500	16.9800	16.6100

Fuente: elaboración propia, utilizando datos obtenidos del posdespacho de carga del AMM.
Consultado el 28 de agosto de 2020. Recuperado de www.amm.org.gt.

Anexo 5. Datos de energía ajustadas con la mediada interanual para modelar el índice de variación estacional

Datos de Energía en GWh (Ajustados para análisis de curva de variación estacional)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018	10.6314	10.1189	11.5297	10.7842	8.2360	9.9449	9.9449	9.9449	9.9449	9.7710	12.2722	12.4584
2017	10.8087	9.3636	10.5774	10.1471	10.2649	9.7738	9.5561	9.4598	9.4598	8.7883	9.2672	8.1542
2016	10.0675	10.2843	10.9978	10.4864	10.4868	9.9970	10.5724	10.8595	10.5001	10.7013	10.3039	9.8965
2015	7.1505	7.0409	7.0409	7.0409	7.0409	7.0409	7.2682	8.2825	8.4550	8.8922	9.5443	10.5661
2014	8.9658	6.9951	7.8629	7.1290	7.7453	8.1052	7.6564	7.0633	6.6469	6.6852	7.0962	7.0962
2013	9.8266	8.6775	9.5437	9.5065	9.6557	9.1885	9.4276	8.1288	9.1852	9.3908	8.7759	9.0939
2012	10.0427	10.0427	10.0427	10.4691	10.3729	9.9558	10.1013	8.4315	10.3036	10.7091	9.9840	10.1770
2011	8.9051	8.1903	8.8947	8.4754	8.5235	8.2721	8.6770	7.1624	8.8330	8.8638	8.8638	8.8638
2010	10.3850	9.5113	10.2578	9.7280	9.9918	9.7108	10.3161	8.6091	9.2305	9.0045	8.6567	9.0270
2009	10.6231	10.1755	11.1147	10.6036	11.1261	10.7058	10.5602	8.8334	10.6200	10.5158	10.2820	10.6839
2008	11.9159	11.4406	12.0191	11.2932	12.0029	11.0211	11.4435	9.2381	11.2862	11.5235	11.2069	11.0970

Fuente: elaboración propia, utilizando datos obtenidos del posdespacho de carga del AMM.
Consultado el 28 de agosto de 2020. Recuperado de www.amm.org.gt.

Anexo 6. Cuadro de datos de resultados de estadística descriptiva, evaluación interanual

	2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
	Temp. Ambiente	Energía en GVH																				
N	12	12	12	12	12	12	9	9	9	9	12	12	10	10	7	7	12	12	10	10	8	8
Perdidos	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	0	0	2	2	5	5	0	0	2	2	4	4
Media	17.7500	11.2906	19.0145	10.4970	18.0653	9.5357	17.7705	8.4370	18.3746	10.0560	18.4936	9.2000	18.5932	7.4955	19.7094	8.5941	19.4407	10.4295	17.4083	9.6701	18.2249	10.7252
Mediana	18.1300	11.3869	19.2287	10.6118	18.3853	9.6111	18.2433	8.5235	18.6103	10.1770	18.6560	9.2896	18.7160	7.3927	19.8575	8.4550	18.8531	10.4866	17.5537	9.6649	18.3714	10.7078
Desv.	0.8758	0.7290	1.0727	0.5982	1.1534	0.6320	0.8914	0.5437	0.5983	0.6548	0.4777	0.4779	0.8831	0.7229	0.6097	1.2137	1.6965	0.3375	0.8516	0.6203	0.6992	1.3903
Rango	2.2600	2.2810	3.2533	2.2927	4.2943	1.7759	2.3030	1.7427	1.8947	2.2776	1.2344	1.6978	2.8101	2.3089	1.8338	3.4156	4.9029	1.9103	2.7718	2.6545	1.8974	4.2224
Mínimo	16.5200	9.2380	16.2904	8.8334	15.2541	8.6091	16.7591	7.1624	17.1889	8.4315	17.7656	8.1288	17.0547	6.6469	18.6151	7.1505	17.6038	9.8965	15.7394	8.1542	17.1700	8.2360
Máximo	18.7800	12.0190	19.5437	11.1261	19.5495	10.3850	19.0621	8.9051	19.0836	10.7091	19.0000	9.9266	19.8649	8.9658	20.4468	10.5661	22.5066	10.9378	18.5102	10.8087	19.0674	12.4584

Fuente: elaboración propia.

Anexo 7. Cuadro de datos de diagrama de dispersión energía

		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
		Temperatura Ambiente °C	Energía en GVH																				
Temperatura Ambiente	Correlación de Sig. (bilateral)	1	-0.221	1	-0.319	1	0.285	1	0.269	1	-0.116	1	0.015	1	-0.212	1	0.182	1	0.129	1	-0.432	1	-0.349
	N	12	12	12	12	12	12	9	9	9	9	12	10	10	7	7	12	12	10	10	8	8	8
	Correlación de Sig. (bilateral)	-0.221	1	-0.319	1	0.285	1	0.269	1	-0.116	1	0.015	1	-0.212	1	0.182	1	0.129	1	-0.432	1	-0.349	1
Energía en GVH	N	12	12	12	12	12	12	9	9	9	9	12	12	10	10	7	7	12	12	10	10	8	8
	Correlación de Sig. (bilateral)	0.489		0.313		0.369		0.483		0.766		0.963		0.556		0.697		0.689		0.212		0.396	
	N	12	12	12	12	12	12	9	9	9	9	12	12	10	10	7	7	12	12	10	10	8	8

Fuente: elaboración propia.

Anexo 8. Cuadro de datos de velocidad del viento en km/h

Datos de Velocidad de Viento km/h												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018	8.8	9.7	10.5	8.2	7.7	7.1	8.5	7.1	6.1	6.1	7.3	9.7
2017	8.3	9.1	10.7	10.2	7.8	7.5	9.5	7.6	6.8	7.7	7.8	7.8
2016	6.5	9.7	8.8	8.4	7.9	7.2	8.2	7.4	6.5	8.6	8.7	10.2
2015	13.5	8.9	8.9	9.6	6.5	8.6	9.6	7.0	4.3	4.4	7.3	7.9
2014	12.7	11.6	12.0	11.2	7.4	8.1	12.9	9.9	5.9	9.5	13.1	11.1
2013	12.9	13.4	12.6	11.6	11.3	9.0	9.9	8.7	6.7	8.7	12.1	13.2
2012	17.0	12.5	13.3	10.6	7.7	8.9	11.3	8.5	7.9	8.9	12.5	11.9
2011	12.2	13.2	14.2	11.8	10.1	7.1	9.1	7.6	9.6	9.2	11.6	12.0

Fuente: elaboración propia, utilizando datos proporcionados por el Instituto de sismología, vulcanología, metodología e hidrología d Guatemala. Consultado el 19 de octubre de 2020.

Anexo 9. Cuadro de datos de porcentaje de humedad relativa

Datos de humedad relativa (%)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2018	75.0	72.0	67.0	73.0	82.0	78.0	73.0	76.0	79.0	80.0	73.0	67.0
2017	69.0	72.0	74.0	70.0	75.0	82.0	76.0	81.0	81.0	80.0	78.0	78.0
2016	73.6	66.5	69.1	66.9	76.7	82.8	76.0	81.0	82.0	81.0	79.0	75.0
2015	64.0	67.0	69.0	70.0	72.0	77.0	74.0	74.0	85.0	84.0	77.0	72.7
2014	72.0	70.0	70.0	71.0	84.0	82.0	73.0	76.0	83.0	82.0	77.0	73.0
2013	70.0	66.0	68.0	71.0	77.0	79.0	78.0	80.0	86.0	84.0	80.0	77.0
2012	71.0	71.0	69.0	72.0	81.0	80.0	74.0	81.0	80.0	81.0	71.0	70.0
2011	68.0	68.0	69.0	72.0	77.0	85.0	82.0	81.0	85.0	85.0	79.0	70.0

Fuente: elaboración propia, utilizando datos proporcionados por el Instituto de sismología, vulcanología, metodología e hidrología d Guatemala. Consultado el 19 de octubre de 2020.