



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO, AMBIENTAL Y FINANCIERO
PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE UN PROYECTO SOLAR TÉRMICO Y SU
INCORPORACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

Elviramaría Castellanos Contreras

Asesorado por el Ing. Msc. Axel Ernesto Siguí Gil

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO, AMBIENTAL Y FINANCIERO
PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE UN PROYECTO SOLAR TÉRMICO Y SU
INCORPORACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ELVIRAMARÍA CASTELLANOS CONTRERAS
ASESORADO POR EL ING. MSC. AXEL ERNESTO SIGUÍ GIL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA MECÁNICA ELÉCTRICA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
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:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO, AMBIENTAL Y FINANCIERO
PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE UN PROYECTO SOLAR TÉRMICO Y SU
INCORPORACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**

Tema que fue aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 5 de julio de 2021.

Elviramaría Castellanos Contreras

Ref. EEPFI-0798-2021
Guatemala, 05 de julio de 2021

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

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ANÁLISIS TÉCNICO, AMBIENTAL Y FINANCIERO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE UN PROYECTO SOLAR TÉRMICO Y SU INCORPORACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por la estudiante **Elviramaría Castellanos Contreras** carné número **200819349**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Energía y Ambiente.

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

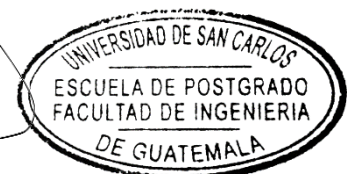
Axel Ernesto Siguí Gil
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 14867



Mtro. Axel Ernesto Siguí Gil
Asesor

"Id y Enseñad a Todos"

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




Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



EEP-EIME-020-2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO, AMBIENTAL Y FINANCIERO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE UN PROYECTO SOLAR TÉRMICO Y SU INCORPORACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria Elviramaría Castellanos Contreras, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Armando Alonso Rivera Carrillo'.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Guatemala, julio de 2021

DTG. 407-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN ANÁLISIS TÉCNICO, AMBIENTAL Y FINANCIERO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE UN PROYECTO SOLAR TÉRMICO Y SU INCORPORACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **Elviramaría Castellanos Contreras**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, septiembre de 2021

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por brindarme paciencia, sabiduría, fuerza de voluntad e inteligencia para siempre seguir y alcanzar mi meta.
- Mis padres** Sergio Mariano Castellanos Ibáñez y Sandra Carolina Contreras Anckermann, por toda la paciencia, esfuerzo y apoyo brindado a lo largo de la carrera, y por ser un gran ejemplo para mí.
- Mis hermanos** Sergiomariano, Carolina, Javier y Rodrigo Castellanos Contreras (q. e. p. d.), por todo el apoyo y paciencia a lo largo de la carrera.
- Mi novio** Ricardo Vásquez, por ser mi mejor amigo, mi apoyo incondicional, por creer en mí siempre, por tener paciencia en todo este tiempo y darme la fuerza para seguir adelante.
- Mis amigos** Por ser de importante influencia en mi vida y por brindarme su apoyo a lo largo de la carrera profesional y personal, especialmente a Gabriel Velásquez, Josué García, Adriana Pinto y Mario Contreras.

Mis amigas de la infancia Mireya Murga, Ángela García, María Lilian Franco, y Claudia Soto, por estar siempre presentes para mí y ser esas palabras de aliento siempre.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la alma <i>mater</i> que me permitió adquirir nuevos conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por formarme y proporcionarme los conocimientos necesarios para ser un excelente profesional.
Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.
Mi asesor	Ing. Axel Siguí, por la asesoría, apoyo y tiempo brindado en el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3.1. Pregunta principal de investigación	12
3.2. Preguntas complementarias de investigación.....	12
4. JUSTIFICACIÓN	15
5. OBJETIVOS.....	17
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	19
7. MARCO TEÓRICO.....	21
7.1. Energía solar	21
7.2. Radiación solar	21
7.2.1. Magnitudes relativas a la radiación solar.....	22
7.2.1.1. Irradiación.....	22
7.2.1.2. Irradiancia.....	22

	7.2.1.3.	Dispersión	23
	7.2.1.4.	Intermitencia	23
7.3.		Recurso solar en Guatemala	23
	7.3.1.	Capacidad solar instalada	24
7.4.		Aprovechamiento de energía solar	25
7.5.		Energía solar térmica	25
	7.5.1.	Aplicaciones de energía solar térmica.....	25
	7.5.2.	Centrales solares térmicas.....	26
	7.5.3.	Tipos de concentradores solares.....	26
7.6.		Política energética	28
7.7.		Matriz energética	28
7.8.		Despacho hidrotérmico	30
	7.8.1.	Precio de oportunidad de la energía	30
	7.8.2.	Programación dinámica dual estocástica (SDDP). 30	
8.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO	31
9.		MARCO METODOLÓGICO	35
	9.1.	Tipo de estudio	35
	9.2.	Diseño de investigación	35
	9.3.	Variables	36
	9.4.	Fases.....	38
	9.4.1.	Fase I: investigación.....	38
	9.4.2.	Fase II: recolección bases de datos	38
	9.4.3.	Fase III: análisis de datos.....	39
	9.4.4.	Fase IV: presentación y resultados	40
	9.5.	Riesgos de la investigación	41
	9.5.1.	Categoría I (sin riesgo).....	41

10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	43
11.	CRONOGRAMA	45
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	47
12.1.	Factibilidad técnica	47
12.2.	Factibilidad económica	47
12.3.	Factibilidad social	48
12.4.	Factibilidad ecológica	49
13.	REFERENCIAS	51
14.	APÉNDICES	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Potencial solar en Guatemala.....	24
2.	Diversificación de matriz energética en Guatemala; porcentaje de capacidad instalada por tecnología actual.....	29

TABLAS

I.	VARIABLES INDEPENDIENTES	36
II.	VARIABLES DEPENDIENTES.....	37
III.	PARÁMETROS BÁSICOS.....	39
IV.	RESUMEN.....	41
V.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	45
VI.	RECURSOS	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\$	Dólar, moneda de Estados Unidos
Ha	Hectárea
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
KWh/m²	Kilovatio hora por metro cuadrado
MW	Megavatio
m²	Metro cuadrado
Q	Quetzal, moneda de Guatemala

GLOSARIO

Administrador del Mercado Mayorista (AMM)	Entidad privada encargada de coordinar y operar las transacciones del mercado mayorista de electricidad de todos los agentes participantes.
Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE)	Órgano técnico encargado de cumplir y hacer cumplir la Ley General de Electricidad.
Costo marginal	Costo para producir un kilovatio hora (kWh) adicional para el cubrimiento de la demanda.
Despacho hidrotérmico	Planificación óptimo de generación de energía hidráulica y térmica con el que se obtiene el mínimo costo de operación.
Energía renovable	Energía que se obtiene de una fuente primaria natural inagotable.
Matriz energética	Representación gráfica de la energía clasificada por fuente o medio que se obtiene.

Ministerio de Energía y Minas (MEM)	Es el ministerio encargado de atender lo relativo al régimen jurídicoaplicable a la producción, distribución y comercialización de la energía y de los hidrocarburos, y a la explotación de los recursos mineros.
Precio de oportunidad de la energía	Máximo costo en que se incurre cada hora para abastecer un kWh adicional de demanda.
Sistema Nacional Interconectado (SIN)	Es el conjunto de instalaciones, centrales generadores, líneas de transmisión, subestaciones, redes de distribución, centros de carga, equipos eléctricos y en general toda la infraestructura eléctrica destinada.

RESUMEN

En la actualidad, el uso de energía renovables ha tenido un auge cada vez más importante a nivel mundial y se debe a que está orientado a que todos los sectores, específicamente el energético, cumpla con los objetivos de desarrollo sostenible; para lo cual se enfocan en la diversificación de la matriz energética, en búsqueda de formas de producir energía limpia a partir de nuevas tecnologías.

Guatemala, respecto de la investigación y búsqueda de nuevas fuentes de generación de energía limpia se ha quedado un poco rezagada, ya que solamente se ha explotado entre un 2 % a un 4 % de la energía solar fotovoltaica y eólica a gran escala, del potencial real que se tiene. En el país, solamente la energía hidráulica se ha desarrollado y explotado en lo que se refiere a energías renovables.

Si bien es cierto, dentro de los planes de expansión de la generación de energía eléctrica, políticas energéticas y objetivos generales por parte del Ministerio de Energía y Minas y en general del sector eléctrico, se ha tenido una mayor participación de energías no convencionales (solar y eólico); dicho estudio se centró en una nueva fuente de energía limpia que puede aportar impactos positivos técnicos, económicos y ambientales, logrando cumplir cada uno de estos objetivos planteados en la política energética e incorporando energía solar térmica.

Guatemala es uno de los países más vulnerables al cambio climático por su ubicación geográfica, sin embargo, también se pueden aprovechar sus recursos; debido a ello se da este impacto negativo; por lo que se tiene el interés en la

reducción del uso de combustibles fósiles en muchas aplicaciones. El presente estudio busca reemplazar dentro del despacho de carga cierta cantidad de generación de energía solar térmica; de lo mismo se concluirá cuando se obtengan los megavatios óptimos del proyecto y se verifique cuánto contribuirían a la reducción de gases de efecto invernadero.

Se espera que este estudio sea significativo para el sector eléctrico, y proporcione un aporte para considerar la incorporación de nuevas tecnologías como la solar térmica, ya que podría servir como antecedente para un futuro proyecto de inversión y contribuir realmente a la diversificación de la matriz energética y la conservación del medio ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

En Guatemala los objetivos, ejes y políticas energéticas han evolucionado con el tiempo, acoplándose con objetivos mundiales respecto del mejoramiento y cambio climático. La diversificación de la matriz energética de generación eléctrica es uno de los principales ejes a los cuales se ha ido enfocando cada una de las políticas, ya que se busca llegar hasta un 80 % de una matriz renovable. Por ello, en los últimos años se ha vuelto una realidad lo que en un momento se creía solamente una visión: el auge de las energías renovables dentro de la producción de energía eléctrica en el país.

Desde el 2015 se dieron las primeras operaciones de centrales con energía renovable no convencional (eólica y solar), que, si bien son energías renovables que aportan al Sistema Nacional Interconectado, solamente proporcionan entre un 2 a 3 % a la matriz energética. Esto se debe a que dichas centrales proporcionan energía solamente durante periodos de tiempo específicos (banda mínima y media) y no suministran energía eléctrica en periodos prolongados; por ello son conocidas como intermitentes.

Dadas estas condiciones es necesario realizar estudios de nuevas tecnologías renovables que puedan proporcionar esa firmeza y estabilidad al sistema, y energía eléctrica para cubrimiento de la demanda durante periodos prolongados o durante todas las bandas horarias, es decir, durante las 24 horas del día.

Guatemala, al ser un país que se encuentra en una ubicación estratégica permite contar con una diversidad de fuentes de energía renovable y

particularmente con energía solar; se cuenta con valores promedio de radiación por arriba de 5.3 kWh/m²/día, lo cual, con el adecuado aprovechamiento energético solar, se puede obtener un gran beneficio técnico y ambiental. En la actualidad solamente se ha impulsado el desarrollo de proyectos fotovoltaicos, lo cual solo es una de las aplicaciones y aprovechamientos que puede dársele a una fuente de energía como el sol.

Debido a esto es necesario implementar nuevas perspectivas y estudios para aprovechar este recurso solar basado en nuevas aplicaciones para la producción de energía eléctrica, que proporcionen energía limpia y segura, además de estabilidad y firmeza en el sistema eléctrico; para ello la solución propuesta es una planta de generación solar térmica incorporada al Sistema Nacional Interconectado.

El primer capítulo abarca la temática de la información general que incluye los antecedentes más importantes del estudio de investigación; el capítulo dos incluye el marco teórico en donde se describe de manera resumida una revisión bibliográfica del potencial solar en Guatemala y cómo se ha aprovechado el mismo para la instalación de plantas solares; así también se dan a conocer los conceptos básicos de la tecnologías solar térmica, así como los tipos y aplicaciones que esta tiene; el capítulo tres describe el marco metodológico de la investigación; el cuatro incluye el estudio sobre el marco legal, dando a conocer las leyes, normas sobre las cuales se rige y los beneficios que puede proporcionar dicho proyecto; el capítulo cinco incluye el análisis y presentación de resultados; luego, en el capítulo seis se muestran un estudio de costos y análisis financiero; en la parte final se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias y apéndices.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad, a nivel mundial las necesidades energéticas y actualizaciones normativas y ambientales van enfocadas al desarrollo de programas de transición de energías fósiles a energías renovables no convencionales (puede decirse que específicamente en solar y eólica). Todos los países avanzan a un ritmo distinto y su transición es de enfoques diversos. Sin embargo, es inminente el crecimiento de las energías renovables, la cual llegará a la mayoría de los países tarde o temprano, y la perspectiva es proporcionar 2/3 del incremento de la demanda eléctrica registrada para el 2040, y que esta sea suministrada por tecnología eólica y solar (Ríos, 2021).

En la actualidad la diversificación de la matriz energética mundial sigue teniendo una gran importancia y relevancia para muchos países, a pesar de tener distintos desarrollos, pero tienen un enfoque similar de sostenibilidad. Según la International Renewable Energy Agency “la capacidad renovable alcanzó los 2 537 gigavatios (GW) a nivel mundial a finales de 2019, registrando un aumento de 176 GW respecto del año anterior, “las energías eólica y solar representaron el 90 % de la capacidad renovables” (IRENA, 2020, p.5).

La evolución de la energía solar se ha tornado en un profundo problema por varias implicaciones desde varias perspectivas, como la tecnología, lo social, lo económico y ambiental. Raboaca *et al* (2019) en el artículo “*Concentrating Solar Power Technologies*” [Tecnologías de concentración de energía solar térmica] detalla el inagotable recurso solar disponible existente para ser impulsado y desarrollado en el campo, destacando la necesidad de sistemas de energía solar

cada vez más complejos. Proporciona así también una revisión de la evolución e implementación a nivel mundial de los mecanismos de la energía solar térmica.

El objetivo de este artículo fue abordar documentación como base para proporcionar la posibilidad de implementación de sistemas solares térmicos, y destacar su importancia en la actualidad y en un tiempo futuro. Así también hace énfasis en determinar lo importante que es proporcionar fuentes de alta tecnología que faciliten la distribución de oferta de energía demandada en periodos prolongados de tiempo, que, a diferencia de la tecnología fotovoltaica, la energía solar térmica, sí tiene capacidad para almacenar energía durante intervalos de tiempo para su posterior conversión en energía eléctrica.

Los autores, no solamente abarcan temas técnicos ni operaciones, sino también demuestran que un Megavatio instalado de solar térmica o CSP evita la emisión de 688 toneladas de CO₂ en comparación con un ciclo combinado y 1,360 toneladas de CO₂ en comparación con una planta de energía con combustible carbón.

Chaanaoui *et al.* (2016), en su artículo "*Benchmark of Concentrating Solar Power Plants: Historical, Current and Future Technical and Economic Development*" [Recopilación de plantas de energía solar térmica: desarrollo técnico y económico histórico, actual y futuro], hace un análisis y comparación respecto de una base de datos de 240 plantas solares térmicas que brinda un mapeo de las principales características técnicas y económicas de estos sistemas. La recopilación de esta información se basa en una historial desde 1982 hasta el 2020, haciendo énfasis que la mayoría de las plantas solares térmicas se encuentran concentradas en España y Estados Unidos.

En el mismo artículo los autores analizan las tecnologías utilizadas para estos sistemas solares térmicos, como colector cilindro parabólico (PTC), Torre central (SPT), reflector lineal de Fresnel (LFR) y colector de plato parabólico (PDC), enfocándose en el sistema cilindro parabólico debido a que las tecnologías Fresnel y de plato parabólico aún no son muy desarrolladas. Los resultados demuestran que la tecnología cilindro parabólico es el sistema más maduro y factible de todos, pero a su vez las de torre central son plantas con un futuro prometedor a largo plazo.

Constantemente los estudios y análisis se enfocan en encontrar fuentes alternativas de energías renovables que permitan sustituir en gran medida el alto porcentaje de producción de energía con base en combustibles fósiles. Alae *et al* (2020), en el artículo “*Overview of the integration of CSP as an alternative energy source in the MENA region*” [Resumen de la integración de la energía solar térmica como fuente de energía alternativa en la región Medio Oriente y África del Norte] realiza un estudio con datos meteorológicos y ubicaciones para simular el rendimiento técnico y económico de una central solar térmica de 50 MW con tecnología cilindro-parabólica y sistemas de almacenamiento, en comparación con centrales solares térmicas actuales ya en operación (en España y Estados Unidos).

El artículo tiene como finalidad presentar la factibilidad de un proyecto de 50 MW instalados en la región del Medio Oriente y África del Norte, indicando cuál sería la óptima ubicación para una producción máxima de generación de energía eléctrica a un costo menor, y que esta pueda llegar a cubrir la demanda y por ende sustituir una de las principales fuentes de MENA, que son los combustibles fósiles.

Los resultados demuestran que la región posee un gran potencial para producir energía eléctrica por medio de tecnología solar térmica con un costo

nivelado (LCOE) competitivo, en comparación con España, que es uno de los mayores líderes en producción en la actualidad. Esto puede llegar a conducir a la creación de un nuevo desarrollo sostenible en los países de esta región y a desplazar los combustibles fósiles, así como también llegar a ser uno de los mayores líderes en tecnología solar térmica.

Las energías renovables no convencionales en los sistemas eléctricos ocasionan por un lado muchos beneficios en la reducción de los costos de la energía, así como también contribuyen a cumplir con los objetivos ambientales de reducir los gases de efecto invernadero que se establecen año con año en las políticas de cada país. Pero también aportan efectos negativos como una alta penetración en las redes eléctricas que llegan a perjudicar la estabilidad de los sistemas, en el artículo "*CSP Dispatch optimization considering forecast uncertainties*" [Optimización del despacho de centrales solares térmicas considerando las incertidumbres del pronóstico], Burghi *et al.* (2018) analizan y estudian cómo se espera que la tecnología solar térmica desempeñe un papel importante en los sistemas eléctricos equilibrando la producción y la demanda de energía en un futuro cercano.

El artículo da a conocer que se esperan grandes expectativas debido a que este tipo de tecnología puede llegar a adquirir un almacenamiento térmico; por lo que este tipo de plantas pueden llegar a habilitarse para programar su despacho con base en una previsión o proyección de demanda, y por lo tanto son en un momento una generación flexible y pueden participar en el mercado mayorista frente a tecnologías con combustible fósil.

Los resultados presentados por los autores indican la posibilidad de participación de plantas solares térmicas dentro del despacho para el cubrimiento de demanda, siempre y cuando se consideren mejores prácticas para la operación

de la planta, así también que el programa de optimización o algoritmo desarrollado para la programación sea más preciso. Se pueden llegar a definir diferentes estrategias de participación, dependiendo del mercado eléctrico en que esté participando dicha central, pero la consideración de centrales solares térmicas ha demostrado beneficios económicos cuando se optimiza con la herramienta adecuada.

A nivel mundial se busca siempre reducir el consumo de combustibles fósiles, y Sudáfrica no está alejado de esto, tienen como objetivo generar el 42 % de su energía a partir de fuentes renovables para el año 2030. Según el artículo "*Concentrated Solar Power (CSP) Innovation Analysis in South Africa*" [Análisis de concentración de energía solar térmica en Sudáfrica] las centrales solares térmicas son las principales tecnologías de energía renovable que han sido priorizadas en Sudáfrica, debido al abundante recurso solar disponible en la región. Hay 7 centrales en construcción por el momento y 3 centrales en operación y conectadas a la red nacional eléctrica (Craig *et al.*, 2017).

Los autores detallan que dicha tecnología, a pesar de tener tanta relevancia, no se ha desarrollado con tanta rapidez hasta la fecha. Este artículo analiza las centrales solares térmicas desde un punto de vista en cuanto a los modelos de adaptación de tecnologías existentes y estrategias de difusión utilizadas por el gobierno, para mejorar así el desarrollo y despliegue de dicha tecnología. La razón de inclusión de esta se debe a que Sudáfrica recibe anualmente irradiación directa de 2,816 kWh/m² y al comparar las mejores ubicaciones con centrales solares operando a su capacidad total, Sudáfrica está por arriba de ellas.

Los autores concluyeron que, a pesar de tener aún costos elevados de instalación, en relación con otras tecnologías renovables, al adoptar la tecnología solar térmica, Sudáfrica está teniendo importantes efectos positivos ambientales,

ya que están obteniendo suministro de energía limpia, y tendrán un efecto anual de reducción de 1.5 millones de toneladas de emisiones de CO₂, y para poder reducir estos costos el gobierno debe poder implementar planes efectivos de apoyo para este tipo de tecnologías, y que sean igualmente competitivas.

En el artículo “*Storage of Thermal Solar Energy*” [Almacenamiento de energía solar térmica] (Stutz *et al.*, 2017) estudió y analizó las múltiples aplicaciones de la tecnología solar térmica desde la construcción hasta el uso en la industria y las plantas de generación eléctrica. El uso depende de la temperatura que se llega a manejar, que va desde la temperatura ambiente hasta más de 1,000 °C. Se analizan por ende los diferentes tipos de almacenamiento de energía solar térmica para aplicaciones de temperatura de baja, media y alta.

En el artículo se menciona que la energía solar disponible en el mundo es suficiente para satisfacer la demanda de energía; sin embargo, esta se encuentra diluida e intermitente; por lo tanto, son necesarios estos sistemas de almacenamiento de energía para cubrir las necesidades energéticas. Como resultado del estudio, se indica que, dentro de los sistemas de almacenamiento, el de energía térmica es uno de los más económicos que se puede aplicar en relación con otras técnicas (calor latente y almacenamiento termoquímico), ya que tiene un mayor desarrollo en el mercado.

Carvajal *et al.* (2017) en el artículo “*Developer view of the CSP evolution*” [Desarrollo de la evolución de la energía solar térmica] describe brevemente la historia de la energía solar térmica desde los inicios hasta la actualidad y ofrece una perspectiva sobre lo que puede esperarse en un futuro cercano para la industria. También entre los aportes importantes cabe señalar la importancia de los sistemas de almacenamiento térmico como clave y proporcionar ideas innovadoras para proyectos futuros de centrales solares térmicas.

Una de las contribuciones más importantes que describe el estudio es la tendencia que tiene la energía solar térmica en un futuro próximo, debido a su capacidad de despacho y flexibilidad de operación; estas características se convierten en sus principales activos y como consecuencia el sistema de almacenamiento térmico será un elemento esencial en los próximos proyectos. Todo esto permite dar un grado más de confiabilidad a los sistemas eléctricos, lo que abre paso a un desarrollo dentro de la industria local y un futuro brillante para este tipo de tecnología. Lo que también obliga a experimentar una reducción de costos para la instalación y soluciones nuevas de implementación de plantas solares térmicas.

En Brasil, la matriz energética está dominada por energías renovables principalmente por energía hidroeléctrica. En el artículo “*Concentrated solar power generation: firm and dispatchable capacity for Brazil’s solar future?*” [Generación de energía solar térmica: ¿capacidad firme y despachable para el futuro de energía solar en Brasil?], se analiza y proyecta que se tendrán proyectos instalados con tecnologías renovables a un mediano plazo, considerando energía eólica y solar fotovoltaica. Sin embargo, considerando la intermitencia de estas tecnologías no se puede asegurar una capacidad firme. Por lo que las centrales solares térmicas son la opción viable para este caso (Tomaschek *et al.*, 2016).

El estudio analiza las oportunidades de integrar las centrales solares térmicas al sistema eléctrico brasileño, haciendo uso de modelos de optimización y compara diferentes escenarios donde se analiza la contribución que la tecnología solar térmica aporta al mix de generación. Los resultados del estudio demostraron que las centrales solares térmicas pueden ser una opción para proveer energía eléctrica durante las horas de la tarde y cubrir las horas de demanda pico creando un beneficio sobre las plantas solares fotovoltaicas.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial se han ido superando distintos desafíos para alcanzar objetivos de desarrollo energético, para de esta manera tener un acople con objetivos ambientales y de desarrollo sostenible. Para ello se ha tenido una notable diversificación de la matriz energética a nivel mundial donde predominan las energías renovables, sustituyendo cada vez más a los combustibles fósiles. Guatemala ha estado en la misma línea de esta diversificación mundial, ya que se plantea dentro de sus políticas energéticas ejes estratégicos para alcanzar estos índices a nivel mundial en energías renovables.

La matriz energética actual es predominante por energía hidráulica, ya que ha sido uno de los recursos más explotado y conocido por su desarrollo tecnológico y también porque puede ofrecer generación por un tiempo prolongado y estable al sistema, al igual que las tecnologías que funcionan a base de combustibles fósiles. Si bien es cierto que ya hace varios años fueron incorporadas tecnologías no convencionales como la solar y eólica, no se ha explotado a su máximo y aprovechado el recurso solar que ofrece Guatemala.

En cuanto a la energía solar, el enfoque de desarrollo de proyectos y centrales de generación se basan en tecnología fotovoltaica debido al fácil acceso de instalación, costos, mantenimiento y otros factores que lo hacen atractivo; sin embargo, en la operación existen características que hacen que su eficiencia sea muy baja y por ello también es conocida como una central intermitente, ya que no puede brindar energía durante las 24 horas del día ni puede garantizar un potencia durante periodos largos; esto se debe a que por

el momento aún no se puede almacenar este tipo de tecnología por los elevados costos.

En la actualidad, existe otro tipo de tecnología que puede aprovechar el recurso solar y de igual manera almacenarlo, para garantizar así el suministro; se refiere a las centrales solares térmicas. Las cuales de igual manera utilizan como fuente primaria el sol y como ciclo secundario energía térmica (calentamiento de agua) sin utilizar combustibles alternos si no utilizando intercambiadores de calor y ciclos térmicos. Lo cual permiten tener energía las 24 horas, ser energía renovable y contribuir a las bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

De lo anterior surgen las siguientes preguntas que se buscan resolver en este estudio:

3.1. Pregunta principal de investigación

¿Cuáles son los aspectos técnicos, ambientales y financieros para el aprovechamiento energético de un proyecto solar térmico y su incorporación en el sistema nacional interconectado de Guatemala?

3.2. Preguntas complementarias de investigación

- ¿Cuáles son las consideraciones técnicas necesarias para un proyecto solar térmico en Guatemala?
- ¿Cuál es el impacto de un proyecto solar térmico en la matriz energética de Guatemala?

- ¿Cuál es la reducción de gases de efecto invernadero que proporciona un proyecto solar térmico al ser incorporado al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala?
- ¿Qué impacto tiene un proyecto solar térmico dentro del despacho de carga al incorporarlo al Sistema Nacional Interconectado de Guatemala?
- ¿Cuál es el costo-beneficio de la implementación de un proyecto solar térmico en Guatemala?

4. JUSTIFICACIÓN

La investigación se fundamenta en las líneas de investigación del área energética, específicamente en gestión y uso eficiente de la energía correspondiente a aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos; así mismo en el análisis de la matriz energética de Guatemala.

Guatemala cuenta desde el año 2015 con plantas solares fotovoltaicas. Las cuales contribuyen en aproximadamente en un 2 % al Sistema Nacional Interconectado, aprovechando el recurso solar guatemalteco. En la actualidad no se cuenta con estudios concretos sobre el aprovechamiento de plantas solares térmicas y sus beneficios técnicos, económicos y ambientales. Los actuales estudios se enfocan solamente en tecnologías conocidas y en ampliar la capacidad solar fotovoltaica en el país; sin embargo, la tecnología solar térmica es una opción que puede brindar múltiples soluciones debido a sus características de operación y almacenamiento.

Este trabajo presentará un proyecto de una central de generación eléctrica con tecnología solar térmica con los parámetros adecuados, que le permitan ser factible técnica y económicamente, para brindar una posible solución futurista a inversionistas o instituciones que busquen aumentar la estabilidad del sistema con energías no convencionales; así también contribuir al aumento del porcentaje de energías renovables del país y la diversificación de la matriz energética, cumpliendo con los ejes establecidos en el Plan de Energía 2017-2032 y la Política Energética 2019-2050.

El estudio presentará también el desplazamiento de tecnologías fósiles dentro del despacho hidrotérmico en el sistema eléctrico y el beneficio en la reducción del precio de la energía que se obtendrá en el mercado eléctrico, al introducir este tipo de proyectos al Sistema Nacional Interconectado; lo cual será de beneficio para el Administrador del Mercado Mayorista, ya que permitirá tener una referencia para al momento de la incorporación de este tipo de tecnologías, y de igual manera para darles mayores oportunidades a plantas solares en el futuro dentro del despacho de carga en el sistema, y tener una mayor seguridad.

Dentro de las acciones que se buscan en la planificación y planes en el Ministerio de Energía y Minas está la de priorizar el uso de las fuentes de energías renovables existentes y nuevas tecnologías para la diversificación de la matriz y la reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Ministerio de Energía y Minas, 2017), esto con la finalidad de reducir los impactos del cambio climático. Es por ello que toma relevancia la implementación de proyectos solares térmicos que permitirían reemplazar tecnologías fósiles.

5. OBJETIVOS

General

Realizar el análisis técnico, ambiental y financiero para el aprovechamiento energético de un proyecto solar térmico y su incorporación en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

Específicos

- Detallar los principales parámetros técnicos y económicos de un proyecto solar térmico de generación, para su incorporación al Sistema Nacional Interconectado.
- Identificar el impacto de la incorporación de proyectos solares térmicos en la matriz energética de Guatemala en relación con la matriz actual.
- Cuantificar el aporte en la reducción de gases de efecto invernadero al incorporar un proyecto solar térmico en el Sistema Nacional Interconectado en Guatemala.
- Comparar los efectos de incorporar un proyecto solar térmico al despacho de carga del Sistema Nacional Interconectado de Guatemala en la programación de largo plazo 2021-2022.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

A partir del presente estudio se analizará la implementación de una nueva tecnología al Sistema Nacional Interconectado como oportunidad para un mayor aprovechamiento del recurso solar que se tiene en Guatemala; además de proporcionar con ello energía limpia, segura y estable al sistema eléctrico a través de una planta de generación solar térmica. Es importante mencionar que en la actualidad no existe este tipo de estudio ni tecnología empleada en Guatemala para generación de energía eléctrica.

El presente estudio aportará la información necesaria de los parámetros principales y adecuados que le permitan ser factible técnica y económicamente para brindar así soluciones futuras y aumentar la estabilidad del sistema con energías renovables y también el porcentaje de las mismas, en cumplimiento con las políticas energéticas establecidas.

Con lo anterior, básicamente se busca aumentar el porcentaje de energía generada con energías limpias por tiempos prolongados, aprovechando los amplios recursos de Guatemala, sin afectar al sistema y reemplazar energías no renovables.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Energía solar

El sol como fuente de energía y recurso renovable, se caracteriza por no ser contaminante, inagotable y de acceso libre. Por lo que la búsqueda de nuevas fuentes de energía convierte a la energía solar en una alternativa viable y de cara a los problemas actuales de contaminación y de búsqueda de reducción de emisiones de CO₂ a nivel mundial. Así también contempla una opción atractiva de una fuente primaria para generación de energía eléctrica a grandes escalas.

El sol, a través de energía electromagnética, proporciona energía a la Tierra; así también el sol es el responsable de una u otra forma de la gran mayoría de las fuentes de energía del planeta; tiene influencia directa o indirecta sobre las mismas (Planas, 2020).

7.2. Radiación solar

A la radiación solar se le conoce como la energía emitida por el sol, que llega a propagarse en todas direcciones por medio del espacio mediante ondas electromagnéticas. Por ello es una importante variable que debe medirse para un amplio rango de aplicaciones, principalmente como fuente alternativa de energía en la generación de energía eléctrica (IDEAM, 2014).

Puede ser expresada en términos de exposición radiante o irradiancia, siendo esta última la cantidad de radiación solar que cae en una superficie terrestre y cuya

unidad es el Watt por metro cuadrado (W/m^2) y en función de cómo se recibe la radiación solar, los objetos en la superficie se distinguen por sus magnitudes relativas (Rivas, 2019).

7.2.1. Magnitudes relativas a la radiación solar

La radiación solar puede clasificarse de la siguiente manera:

- Radiación solar difusa: la forman los rayos luego de recibir varias desviaciones o difusiones en su trayecto al pasar por la atmósfera, o luego de ser reflejada por otras superficies.
- Radiación solar directa: la forman los rayos directos recibidos del sol. Esto ocurre cuando el sol no tiene ninguna obstrucción y es visible.
- Radiación global: se le conoce como a la sumatoria entre la radiación directa y difusa.

7.2.1.1. Irradiación

Energía incidente por unidad de superficie sobre un plano dado y a lo largo de un cierto período. Cuando se habla de irradiación, generalmente se refiere a la cantidad de irradiancia recibida en un tiempo determinado. Su unidad de medida es en kilovatio hora por metro cuadrado (kWh/m^2) (Murga, 2013).

7.2.1.2. Irradiancia

Es la radiación solar, que, debido a sus propiedades, logra llegar a la superficie terrestre. Se expresa en unidades de potencia por superficie generalmente en vatio por metro cuadrado (W/m^2) (Planas, 2020).

7.2.1.3. Dispersión

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales la radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. La dispersión depende de la longitud de onda (IDEAM, 2014).

7.2.1.4. Intermitencia

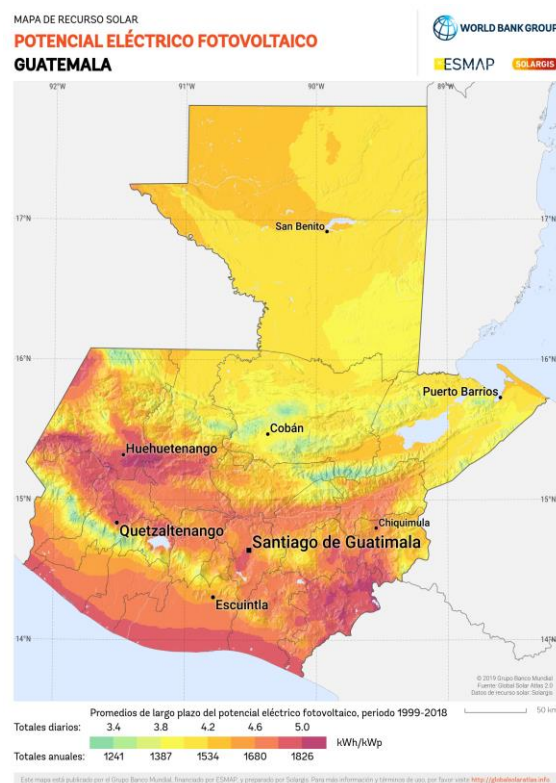
El recurso solar, debido a los diversos factores, no suele ser constante y es interrumpido. Una de las mayores características de proyectos que aplican tecnología solar o fuentes primarias como el sol o el viento, padecen ya que la fluctuación es inherente a la disponibilidad de este recurso, y es a lo que se le conoce como intermitencia (Ponce, 2016).

Esto es un factor que para los proyectos que pretenden utilizar este recurso como fuente principal, se vuelve un desafío tanto en temas de abastecimiento en baja o en gran escala; así también como incorporación de grandes proyectos en la matriz energética nacional o en temas regulatorios para una potencia firme. Por lo que es necesario sistemas de almacenamiento para controlar dicho efecto.

7.3. Recurso solar en Guatemala

Guatemala posee un gran potencial solar como se muestra en la figura 1, que, debido a su posicionamiento geográfico, el valor promedio de radiación solar global para todo el país es de 5.3 kWh/m² al día, el cual al compararlo es mayor a muchos países que cuentan con programas y proyectos exitosos de aprovechamiento de energía solar (Ministerio de Energía y Minas, 2018).

Figura 1. Potencial solar en Guatemala



Fuente: Solargis, (2017) .*Mapa geográfico de Guatemala. mostrando los índices de menor a mayor potencial solar.* Consultado el 3 de marzo de 2021. Recuperado de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/guatemala>.

7.3.1. Capacidad solar instalada

Guatemala cuenta actualmente con tecnología solar instalada para la generación eléctrica, de tipo fotovoltaico. Tiene instalados 80 MW que corresponden a la planta fotovoltaica más grande conocida como Horus (I y II); adicionalmente, dispone de instalaciones de plantas conocidas como Generadoras Distribuidas Renovables (GDR) que suman 12.50 MW, haciendo entre ambas un total de 92.50 MW en toda la región (Administrador del Mercado Mayorista, 2021).

7.4. Aprovechamiento de energía solar

La fuente de energía primaria como el sol es una fuente inagotable, la cual puede aprovecharse de muchas maneras dependiendo de la magnitud, el alcance y el objetivo primordial para el cual está enfocado. En usos menores se ha utilizado para calentamiento de agua, secado, invernaderos, climatización, entre otros.

La energía solar puede, principalmente, transformarse en energía térmica y eléctrica, haciendo uso adecuado de ella. La energía solar se usa generalmente empleando elementos adecuados como celdas fotovoltaicas o receptores solares, dependiendo del uso que se desea emplear; con ellos se obtendría energía solar térmica o bien energía solar fotovoltaica (Balcázar y Peña, 2016).

7.5. Energía solar térmica

La energía solar térmica utiliza lentes y espejos para enfocar la radiación concentrada y esta se puede aplicar para generar electricidad indirectamente. El calor absorbido de la irradiación solar se utiliza en ciclos termodinámicos para producir energía eléctrica. Dichos sistemas son capaces de generar energía incluso en ausencia del sol. Esto puede ser logrado mediante sistemas de

almacenamiento de energía (almacenamiento térmico), con la finalidad de ahorrar cantidades extras de energía térmica a la luz del día para ser utilizada en periodos en los que la luz solar no está disponible (Hossein *et al.*, 2018).

7.5.1. Aplicaciones de energía solar térmica

Existen diferentes tipos de aplicación para la energía solar térmica, la cual se puede diferenciar principalmente por la temperatura a la cual es aplicada:

- Baja temperatura: se utiliza básicamente para calentamiento de complejos habitacionales o de vivienda. Para uso de calentamiento de agua y calefacción, se manejan temperaturas menores a 65° Celsius.
- Media temperatura: se emplean temperaturas en un rango entre 100° a 300° Celsius. Se utilizan en procesos industriales.
- Alta temperatura: es empleada para la utilización en centrales solares térmicas, específicamente para producción de energía eléctrica. Las temperaturas son utilizadas por arriba de 500 °Celsius.

7.5.2. Centrales solares térmicas

Las centrales solares térmicas utilizan altas temperaturas para el empleo de la conversión de energía solar a energía eléctrica. Utilizan la energía del sol en plantas a grandes escalas, concentrando la radiación solar, permitiendo así alcanzar altas temperaturas para el proceso. Al producir dicha energía a altas temperaturas se almacena la misma en forma de calor, para posteriormente ser utilizada para seguir produciendo energía eléctrica según la demanda establecida (Agencia Alemana de Economía y Energía, 2015).

7.5.3. Tipos de concentradores solares

- Cilindro parabólico: posee un reflector largo en forma parabólica que enfoca los rayos del sol en un tubo receptor ubicado en el foco de la parábola. Utiliza tecnología de enfoque de línea. Enfoca la irradiación solar en su línea focal, allí se encuentra un receptor que absorbe el calor. La temperatura del cilindro parabólico, o PTC por sus siglas en inglés, es amplio en un rango de 100 a 400 °C, lo que lo hace funcional en varias aplicaciones (Hossein et al, 2018).

El colector se inclina con el sol, es decir, tiene un mecanismo de seguimiento, para mantener la luz solar enfocada mientras el astro rey se mueve durante el día. Los sistemas de concentración lineal cilindro parabólico se utilizan en instalaciones de sistema de energía solar térmica muy antiguos.

- Colectores Fresnel: su funcionamiento es similar a los sistemas de cilindro parabólico en que los espejos (reflectores) concentran la luz solar en un receptor ubicado sobre los espejos. Estos utilizan el efecto de lente Fresnel, el cual permite que un espejo de concentración tenga gran apertura y distancia focal corta. Estos sistemas son capaces de concentrar la energía del sol 30 veces su intensidad normal (Energy Information Administration, 2021).
- Concentración en torre central: utiliza una gran cantidad de espejos planos de seguimiento solar llamados heliostatos para reflejar y concentrar la luz solar en un receptor en la parte superior de una torre. Algunas de las torres de energías emplean agua como fluido de transferencia de calor, otros han estado experimentando con sales de nitrato fundido. La capacidad de almacenamiento de energía térmica permite que el sistema produzca

energía eléctrica durante tiempos prolongados, en tiempos nublados o por la noche (Energy Information Administration, 2021).

- Disco parabólico: estos sistemas utilizan un plato de espejo similar a lo que se conoce como una antena parabólica. La superficie en forma de plato dirige y concentra la luz solar en un receptor térmico, que luego absorbe y recoge el calor y lo transfiere a un generador. El tipo de motor más común utilizado en estos sistemas es el Stirling. Este sistema utiliza el fluido calentado para mover los pistones y crear energía mecánica, la cual hace funcionar un generador para producir energía eléctrica (Energy Information Administration, 2021).

7.6. Política energética

Para entender la importancia de la diversificación de la matriz energética, y del desarrollo y auge de las energías renovables en Guatemala, es necesario comprender los objetivos generales del gobierno, enfocados a la política energética 2020-2050. La política está orientada principalmente a un desarrollo sostenible a través del uso eficiente de recursos y siempre cumpliendo con compromisos ambientales.

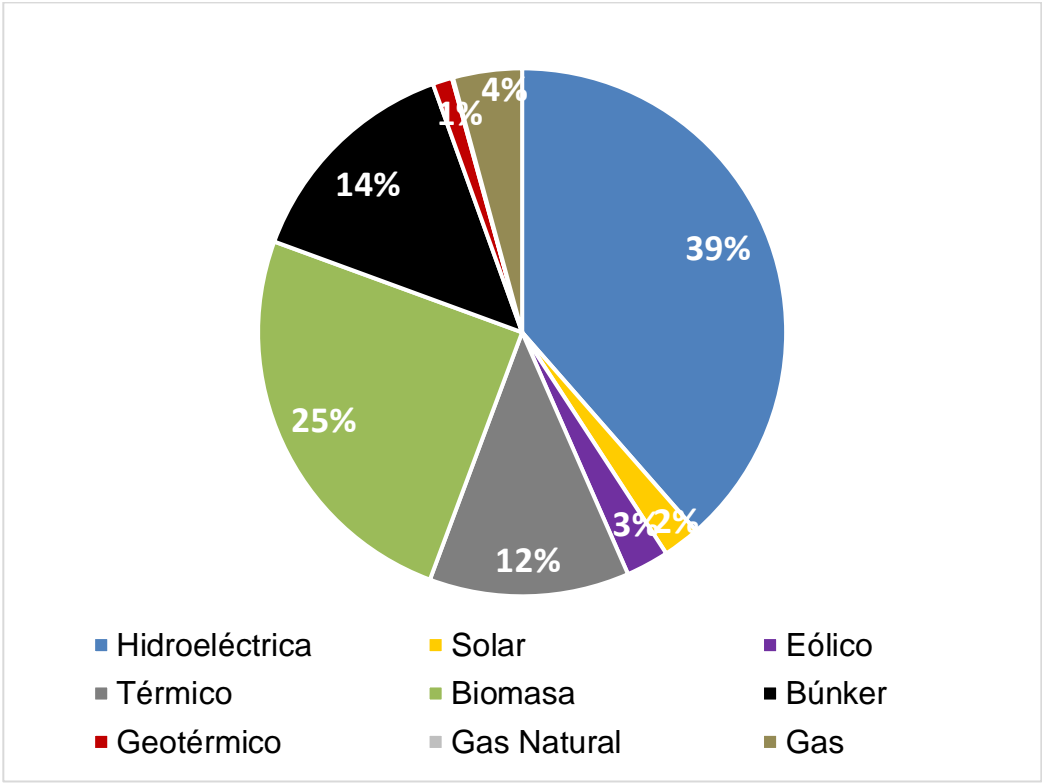
La política energética presenta también dentro de sus principales principios una responsabilidad ambiental en la cual está comprometida a contribuir con la reducción de gases de efecto invernadero emitidos a nivel nacional.

7.7. Matriz energética

Para tener un panorama inicial de la realidad nacional, se presenta la matriz energética de generación eléctrica, la cual muestra 70 % de energía renovable y

30 % de energía no renovable. Ya se cuenta con energías no convencionales adicionadas al sistema, en lo que se puede observar que solamente el 2 % es energía solar, la cual se refiere únicamente a energía solar fotovoltaica. Por lo que hasta el momento no se contempla energía solar térmica instalada en el sistema eléctrico guatemalteco.

Figura 2. Diversificación de matriz energética de Guatemala; porcentaje de capacidad instalada por tecnología actual



Fuente: elaboración propia.

7.8. Despacho hidrotérmico

Es la programación de despacho de carga considerando la disponibilidad de generación con la demanda y optimizando la generación hidrotérmica al mínimo costo.

7.8.1. Precio de oportunidad de la energía

Se refiere al costo de corto plazo de energía por cada hora en que se incurre para poder generar o producir un kilovatio hora adicional, para suministrar la demanda.

7.8.2. Programación dinámica dual estocástica (SDDP)

La programación dinámica dual estocástica o SDDP, por sus siglas en inglés, es un proceso de planificación iterativo de aproximación de la función de costo futuro, el cual depende de dos parámetros importantes: el tamaño de la muestra de estados y el número de escenarios presentes.

Con base en el estudio realizado sobre optimización del despacho hidrotérmico estocástico del SIN para un estudio de largo plazo, la programación dinámica se basa en el hecho de que “la función de costo futuro se puede representar como una función lineal por partes y se obtiene a través de un procedimiento recursivo en el tiempo, donde se calcula la decisión operativa óptima” (Sontay, 2011, p. 48).

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES

2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

2.1. Pregunta pincipal

2.2. Preguntas complementarias de investigación

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Energía solar

3.2. Radiación solar

3.2.1. Magnitudes relativas a la radiación solar

3.2.1.1. Radiación solar

3.2.1.2. Irradiación

3.2.1.3. Irradiancia

3.2.1.4. Dispersión

3.2.1.5. Intermittencia

3.3. Recurso solar en Guatemala

3.3.1. Capacidad instalada solar

- 3.4. Aprovechamiento de energía solar
- 3.5. Energía solar térmica
 - 3.5.1. Aplicaciones de energía solar térmica
 - 3.5.2. Centrales de generación solar térmica
 - 3.5.3. Tipos de concentradores solares
- 3.6. Política energética
- 3.7. Matriz energética
- 3.8. Despacho hidrotérmico
 - 3.8.1. Precio de oportunidad de la energía
 - 3.8.2. Programación dual dinámica estocástica

- 4. MARCO METODOLÓGICO
 - 4.1. Tipo de estudio
 - 4.2. Diseño de investigación
 - 4.3. Variables
 - 4.4. Fases
 - 4.4.1. Fase I: investigación
 - 4.4.2. Fase II: recolección base de datos
 - 4.4.3. Fase III: análisis de datos
 - 4.4.3. Fase IV: presentación de resultados
 - 4.5. Riesgos de la investigación
 - 4.5.1. Categoría I

- 5. MARCO LEGAL
- 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS
- 7. COSTOS APROXIMADOS Y ANÁLISIS FINANCIERO
- 8. FACTIBILIDAD DE LA PROPUESTA

CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIAS
APÉNDICES

9. MARCO METODOLÓGICO

9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es descriptivo ya que busca determinar los beneficios y efectos técnicos, ambientales y económicos del aprovechamiento energético de la energía solar térmica y su incorporación en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala, a través de proyectos nuevos de generación eléctrica, con la finalidad analizar los beneficios en relación con las tecnologías actuales instaladas en Guatemala.

9.2. Diseño de investigación

Es un estudio no experimental transversal, ya que se desarrollará y analizará con la base de datos de la programación de largo plazo, del año estacional 2021-2022.

Es un estudio analítico, ya que se buscan los parámetros adecuados para el mejor aprovechamiento de un proyecto de generación eléctrica con tecnología solar térmica y su efecto en el Sistema Nacional Interconectado.

Es también un estudio comparativo, ya que se analizará el efecto de la tecnología solar térmica en el Sistema Nacional Interconectado actualmente, e incorporando una planta solar térmica en el sistema, cómo esta llegaría desplazar en el despacho económico a cualquier tecnología y a variar el precio de la energía, y de igual manera comparar las variaciones de la matriz energética.

Se busca plantear una comparación ambiental respecto los efectos de gases de efecto invernadero emitidos respecto a otras tecnologías, específicamente con la solar fotovoltaica.

9.3. Variables

Las variables que se utilizarán son de tipo cuantitativo, específicamente parámetros técnicos, índices económicos y de mercado eléctrico. Se estudiarán los parámetros técnicos adecuados para instalar y hacer factible un proyecto de generación solar térmico, tales como los precios de la energía, los aspectos comerciales y los costos del proyecto. Así también se utilizarán variables cualitativas para describir los distintos beneficios técnicos y ambientales que se obtendrían al incorporar una nueva tecnología al país.

Tabla I. **Variables independientes**

Variable	Definición	Unidad
Dimensión del proyecto solar térmico	Tamaño y capacidad instalada del proyecto solar térmico	MW
Capacidad instalada solar fotovoltaica en Guatemala	Capacidad de plantas solares fotovoltaicas en Guatemala, en el Sistema Nacional Interconectado	MW
Horas de generación solar	Horas en que es efectivo utilizar la energía solar	Cantidad de horas
Precio de venta de la energía	Es el precio al cual se evaluaría el proyecto para su retorno	US\$/MWh
Costo variable de generación	Costo en el que se incurre para generar un MWh	US\$/MWh

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Variables dependientes**

Variable	Unidad	Definición	Variables de las que depende
Porcentaje de energía renovable en la matriz	%	Energía a base de fuentes primarias renovables como agua, sol, viento, etc.	Capacidad instalada de las tecnologías en Guatemala renovable.
Porcentaje de energía solar en la matriz energética	%	Energía que utiliza como fuente primaria el S ^o sol.	Capacidad instalada de las tecnologías en Guatemala solar.
Volumen de generación solar	MWh	Energía eléctrica entregada al sistema.	Horas de generación solar, en las que es posible el aprovechamiento solar, y la planta solar puede entregar energía.
Precio de oportunidad de la energía	US\$/MWh	Es el costo marginal, es el costo que se tiene por suministrar un kWh adicional de energía para cumplir la demanda del sistema.	Máquina marginal en el sistema eléctrico que suministra el último kWh para cumplir la demanda. Lista de mérito, despacho de generación.
Tasa Interna de Retorno (TIR)	%	Rentabilidad del proyecto, es el rendimiento esperado de la inversión realizada por el proyecto, es el beneficio esperado.	Volumen de energía, precio de venta, costos asociados, capex, VAN.

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se describe cada una de las variables independientes a utilizar en el estudio, con la definición, su dimensional y la variable de la cual depende.

9.4. Fases

El desarrollo del presente estudio se cumplirá a través de las siguientes fases:

9.4.1. Fase I: investigación

Se dará inicio con una revisión de bibliografía sobre energía solar térmica, si existen estudios previos en Guatemala respecto de este tipo de tecnología en relación con la generación eléctrica. Adicionalmente se hará una revisión de estudios previos realizados sobre proyectos de generación solares térmicos y su aprovechamiento en países como África, Chile, España, Estados Unidos, Ecuador y otros países donde la tecnología se ha desarrollado exitosamente.

9.4.2. Fase II: recolección de bases de datos

Es necesario contar con la base de datos del SDDP del Sistema Nacional Interconectado y del despacho de Guatemala respecto del año 2021-2022; esta se obtendrá del AMM, la cual se refiere a información pública para evaluar cómo se encuentra la proyección del despacho hidrotérmico actualmente de todas las tecnologías y los precios de oportunidad de la energía.

Es necesario tener la base de datos de la capacidad instalada por tecnología de Guatemala, esto se obtendrá del AMM, la cual como información precisa para evaluar la matriz energética. De igual manera se evaluará la política energética actual y el plan de expansión de la generación para validar y revisar los objetivos y ejes esperados respecto de las tecnologías renovables.

Se contará con la base de datos de producción de gases de efecto invernadero que produce cada tipo de tecnología en Guatemala; esto se obtendrá del MEM; dicha información se utilizará para calcular los posibles efectos que tendrá la tecnología solar térmica y el beneficio que proporcionaría en relación con otras tecnologías, específicamente sobre la solar fotovoltaica.

9.4.3. Fase III: análisis de datos

Se analizarán los parámetros y dimensionamientos técnicos, económicos y ambientales de proyectos de centrales solares térmicas en otros países con éxito, con la finalidad de calcular y obtener parámetros propios de una central solar térmica en Guatemala.

Tabla III. **Parámetros básicos**

Parámetros	Control
Ubicación	
Radiación solar	
Eficiencia del colector	
Número de colectores	
Área total del campo	
MW instalados	
MWh generados al año	

Fuente: elaboración propia.

Con los parámetros básicos se podrán especificar las mejores áreas de estudio con base en mapas solares de radiación de Guatemala, donde se obtenga el mayor aprovechamiento solar para el proyecto. Así también el

potencial de producción anual posible de acuerdo con la capacidad instalada y la generación esperada. Así también especificar qué tipo de central solar será el idóneo para el área seleccionada, ya sea parabólica, de torre o de disco *starling*.

Se analizará el costo del proyecto, luego de tener todos los parámetros técnicos; se debe de contar con el costo inicial del mismo, y el de operación y mantenimiento; con ellos se analizará y realizará una evaluación financiera para determinar la rentabilidad del proyecto. Al obtener la información mencionada se plantearán dos escenarios y se ejecutarán casos en el software SDDP:

- Escenario 1: Sistema Nacional Interconectado 2021-2022 sin planta solar térmica.
- Escenario 2: Sistema Nacional Interconectado 2021-2022 con planta solar térmica.

Se realizarán despachos de carga en ambos escenarios y se obtendrán precios de oportunidad de la energía; así también se obtendrán las matrices energéticas en ambos escenarios, para realizar una comparación de ambos y de esta manera visualizar las variaciones al adicionar un proyecto solar térmico. Al tener el panorama completo se puede analizar y comparar el efecto de gases de efecto invernadero entre un escenario y otro, haciendo la relación entre la incorporación de un proyecto solar térmico y sin él.

9.4.4. Fase IV: presentación y resultados

Se presentará los resultados obtenidos de forma concreta y resumida en la siguiente tabla para los datos del proyecto solar térmico propuesto.

Tabla IV. **Resumen**

Descripción del proyecto	Evaluación financiera	
Ubicación	Inversión	MM US \$
Área total de campo	Capex por MW	MMUS\$/MW
Capacidad (MW)	Ingresos anuales	MM US\$
Energía total (GWh)	EBITDA	MM US\$
Tipo de instalación	TIR	%
Figura regulatoria	<i>Payback</i>	Años

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados obtenidos de las comparaciones de ambos escenarios del despacho, matrices y efectos ambientales de gases de efecto invernadero, se presentarán los datos de forma gráfica.

9.5. Riesgos de la investigación

La investigación no realizará ningún tipo de interacción o modificación a las variables fisiológicas, psicológicas y sociales, por lo tanto se clasifica en la categoría I.

9.5.1. Categoría I (sin riesgo)

Se considera sin riesgo debido a que no se realiza ninguna modificación o intervención intencionada sobre variables biológicas, psicológicas o sociales, ya que la misma no se efectúa sobre seres humanos, sino sobre el sistema eléctrico de Guatemala y en relación con el mercado eléctrico. La investigación utilizará datos de dominio público.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para el análisis técnico, económico y ambiental del aprovechamiento de un proyecto solar térmico y su incorporación al Sistema Nacional Interconectado se utilizarán diversas técnicas de análisis de datos.

Para ello se hará uso principalmente de variables de mercado eléctrico de Guatemala obtenida del AMM como: demanda, potencia, energía generada, despacho y precio de oportunidad de la energía. Todo esto se encuentra dentro de la base de datos PLP 2,021-2,022, la cual utiliza modelos econométricos de regresión simple, regresión múltiple con variables como población, usuarios conectados, precio *spot*, componentes desagregados del PIB, demanda de grandes consumidores, periodo de Semana Santa y temperatura.

También se tomará en consideración la hidrología dentro de la PLP 2,021-2,022, para lo cual ya ha utilizado estadística inferencial, como modelos NNME y técnicas de *Downscaling*; también es utilizado el modelo hidrológico Sacramento.

Así también se utilizarán los resultados obtenidos del *Stochastic Dual Dynamic Programming* (SDDP) que es una herramienta que ofrece soluciones matemáticas y estadísticas que formulan sistemas duales estocásticos de optimización de despacho hidrotérmico a través de la optimización de una función objetivo, sujeta a restricciones operativas y parámetros aleatorios. El software internamente utiliza estos métodos de análisis estadísticos.

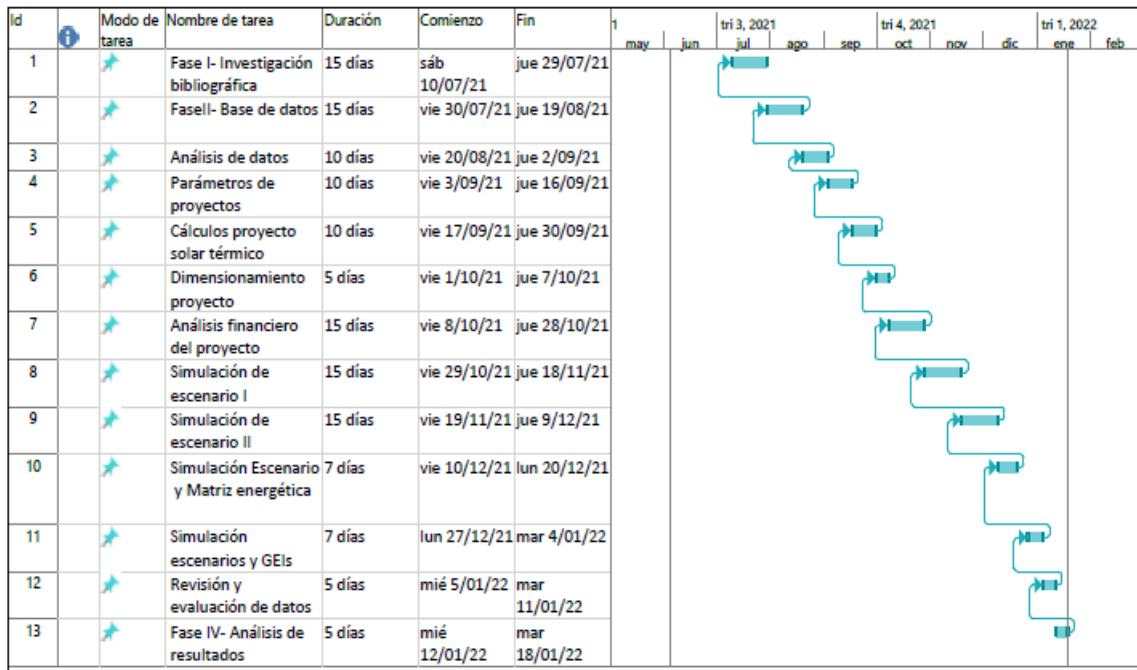
De igual manera se utilizará estadística descriptiva con herramientas como: promedio, promedio ponderado, porcentajes y medidas de posición.

Para la representación de los datos se utilizarán gráficos de los siguientes tipos: diagrama de barras y de sectores.

9. CRONOGRAMA

El cronograma de actividades es una representación gráfica que incluye las diferentes acciones que se realizarán, así como el tiempo que se dedicará a cada una, para cumplir con los objetivos propuestos. En la siguiente tabla se distribuyen las actividades planificadas en el presente diseño de investigación.

Tabla V. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Project.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

12.1. Factibilidad técnica

El tipo de estudio es técnicamente factible ya que se cuenta con las herramientas necesarias para realizarlo; se dispone, además, de equipo de cómputo necesario y licencias. Adicionalmente se tiene el conocimiento y experiencia para utilizar el programa de simulación para efectuar las corridas y escenarios necesarios planteados para obtener los resultados.

Se cuenta con la licencia y el programa Stochastic Dual Dynamic Programming (SDDP), con el cual se estará realizando el despacho de carga planteado. Estarán a la disposición todas las bases de datos para obtener y realizar los análisis deseados.

12.2. Factibilidad económica

Se cuenta con un financiamiento propio, y los costos asociados al estudio pueden ser cubiertos; por lo que es factiblemente económico.

Los recursos para la elaboración del estudio se presentan en la tabla siguiente:

Tabla VI. **Recursos**

Recurso	Disponibilidad	Valor (Q)
Humano	Se realizará por un investigador; en este caso el estudiante y el asesor. Asesor Q2,500 Estudiante Q9,000	11,500.00
Gastos estudiantiles	Inscripción anual de la Maestría Curso PAG 1-Diseño de Investigación Curso PAG 2-Trabajo de investigación	5,031.00
Financiero	Es necesario contar con la licencia del software SDDP actualizada; dicha licencia será proporcionada por el área de energía, teniendo un costo de Q65.00 por cada hora que se utilice	7,800.00
Equipo de cómputo	Se trabajará con equipo de cómputo propio	Sin costo
Insumos de oficina	Servicios básicos y papelería	1,000.00
Acceso a la información	Toda la información es pública y está a disposición para el desarrollo del trabajo	Sin costo
Fuentes de financiamiento	No se cuenta con financiamiento externo, será propio	
Total		25,331.00

Fuente: elaboración propia.

12.3. Factibilidad social

El estudio no afecta a un grupo social directo, y no es afecto sobre un grupo determinado de personas. Se estará realizando sobre el Sistema Nacional Interconectado, por lo que no tiene repercusiones sobre seres humanos; por tanto, es factiblemente social en esta fase.

12.4. Factibilidad ecológica

Es factible ambientalmente, ya que se está analizando energías limpias y nuevas opciones de fuentes y aprovechamientos de energía. Se está en una fase de exploración, por lo que no se está afectando directamente a la naturaleza, ni se está creando un impacto negativo real.

13. REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (2021). *Capacidad instalada*. Guatemala: AMM. Recuperado de <https://www.amm.org.gt/anuales-vwp.php#>.
2. Agencia Alemana de Economía y Energía. (2015). *El suministro de energía verde para hoy y para mañana*. Berlin: DENA. Recuperado de https://www.powerfuels.org/fileadmin/dena/Dokumente/pdf/203/9080_Infobroschuere_Technologieausstellung_ES.pdf.
3. Alae, A., Ahmed, A. M., y Samir, T. (2020). Overview of the integration of CSP as an alternative energy source in the MENA region. *Energy Strategy Reviews*, 29. doi: 10.1016/j.esr.2020.100493.
4. Balcázar, H., y Peña, J. (2016). Estudios de desarrollo y aprovechamiento de energía solar térmica. *Revista Clepsidra*, 11/2016, pp.100-107. doi:10.26564.
5. Burghi, A. C., Hirsch, T. y Pitz-Paal, R. (2018). CSP dispatch optimization considering forecast uncertainties. *AIP Conference Proceedings* 2033. Stuttgart: AIP. doi:10.1063/1.5067206
6. Carvajal, J., Barea, J., Barragan, J., y Altamann, T. (2017). Developer view of the CSP Evolution. *AIP Publishing*. Dubai, UAE. Recuperado de <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4984575>.

7. Chaanaoui, M., Vaudreuil, S., y Bounahmidi, T. (2016). Benchmark of concentrating solar power plants: historical, current and future technical and economic development. *Procedia Computer Science*, 83, pp. 782-789. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.167>.
8. Craig, O. O., Brent, A., y Dinter, F. (2017). Concentrated Solar Power (CSP) Innovation Analysis In South Africa. *South Africa Journal Of Industrial Engineering*, 28, pp.14-27. doi:10.7166/28-2-1640.
9. Energy Information Administration. (2021). *Solar thermal power plants: solar explained*. Estados Unidos: EIA. Recuperado de <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-thermal-power-plants.php>.
10. Hossein, M., Ghavini, M., Sadeghzadeh, M., Alhuyi, M., Kumar, R., Naeimi, A., y Ming, T. (2018). Solar power technology for electricity generation: A critical review. *Energy Science & Engineering*, 6, pp.340-361. doi:10.1002/ese3.239.
11. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). Colombia: IDEAM. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar>.
12. International Renewable Energy Agency (2020). *Renewable capacity statistics 2020*. North America: IRENA. Recuperado de <https://irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020>.
13. Ministerio de Energía y Minas (2017). *Plan Nacional de Energía 2017-2032*. Guatemala: MEM. Gobierno de Guatemala. Recuperado de

<https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/10/15.-Plan-Nacional-de-Energia-2018-2032.pdf>.

14. Ministerio de Energía y Minas (2018). *Energía Solar en Guatemala*. Dirección General de Energía. Guatemala: Guatemala: MEM. Gobierno de Guatemala. Recuperado de <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2018/07/Energ%C3%ADa-Solar-en-Guatemala.pdf>.
15. Murga, E. R. (2013). Diseño de la investigación de un sistema solar térmico para generar (Tesis de grado de Ingeniería Mecánica Industrial). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0680_MI.pdf.
16. Planas, O. (2020). *Energía solar*. Cataluña: Universidad de Gerona. Recuperado de <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/radiacion-solar/sol/importancia>.
17. Ponce, C. (2016). Los desafíos de la intermitencia de las energías renovables no convencionales. *Observatorio Económico*, pp. 2-3. doi:10.11565/oe.vi111.124.
18. Prieto, C. (2020). Thermal storage for concentrating solar power plants. En *Advances in Thermal Energy Storage Systems*. pp. 673-697. USA: Woodhead Publishing. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121008235?via%3Dihub>
19. Raboaca, M. S., Badea, G., Enache, A., Filote, C., Rasoi, G., Rata, M., y Felseghi, R. A. (2019). Concentrating Solar Power Technologies.

Energies, 12/6. pp. 2-4. doi:10.3390/en19061048. Gene Therapy University. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/331855150_Concentrating_Solar_Power_Technologies.

20. Ríos, F. (2021). La necesidad de la actualización normativa de las energías renovables no convencionales. *Futuro Renovable*, (8/4), pp. 13-15. Guatemala: AGER. Recuperado de <https://ager.org.gt/revista-futuro-renovable/>.
21. Rivas, J. M. (2018). *Desarrollo de una aplicación web SIG para calcular el potencial eléctrico solar de un área urbana, en la ciudad de Guatemala*. (Tesis Maestría). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/12113>.
22. Solargis. (2017). *The World Bank, solar resource data*: Guatemala: Solargis. Recuperado de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/Guatemala>.
23. Stutz, B., Nolwenn, L. P., Kuznik, F., Johannes, K., Palomo, E. Bedecarrats, J.-P y Pham, D. (2017). Storage of thermal solar energy. *Comptes Rendus Physique*. 7/8, pp. 401-414. doi:10.1016/j.crhy.2017.09.008.
24. Tomaschek, J., Haasz, T., y Fahl, U. (2016). Concentrated solar power generation: Firm and dispatchable capacity for Brazil's solar future? *Conference Proceedings 1734, 110005*. Germany: AIP Publishing. Recuperado de <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4949202>.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Matriz de consistencia

ANÁLISIS TÉCNICO, AMBIENTAL Y FINANCIERO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE UN PROYECTO SOLAR TÉRMICO Y SU INCORPORACIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE GUATEMALA			
Problema	Objetivos	Preguntas de investigación	Fase final
Problema principal	General	Pregunta general	Conclusiones
Desconocimiento del aprovechamiento energético de un proyecto solar térmico y su incorporación en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.	Determinar el aprovechamiento energético de un proyecto solar térmico y su incorporación en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.	¿Cuáles son los aspectos técnicos, ambientales y financieros para el aprovechamiento energético de un proyecto solar térmico y su incorporación en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala?	Los principales aspectos que permiten la implementación de un proyecto solar térmico en el SIN pueden llegar a considerarse a partir de.... La instalación de una planta solar térmica presentaría impactos ambientales positivos de.... En relación con otras tecnologías....
Problemas secundarios	Específico	Preguntas específicas	
Desconocimiento del impacto y diversificación de la matriz energética de Guatemala.	Evaluar el impacto de proyectos solares térmicos en la matriz energética de Guatemala	¿Cuál es el impacto de un proyecto solar térmico en la matriz energética de Guatemala?	Un proyecto solar térmico incorporado a la matriz energética de Guatemala, contribuye al cumplimiento de los ejes de las políticas energéticas de Guatemala y los ejes principales dentro de los cuales se encuentra la diversificación de la matriz. Al incorporar un proyecto de este tipo, se está logrando alcanzar un xxx% de energía renovable en comparación con años anteriores....

Continuación de apéndice 1.

Problema principal	General	Pregunta general	Conclusiones
Desconocimiento del impacto en la reducción de gases de efecto invernadero en relación con otras tecnologías.	Evaluar el aporte en la reducción de gases de efecto invernadero al incorporar un proyecto solar térmico de generación.	¿Cuál es la reducción de gases de efecto invernadero que proporciona un proyecto solar térmico?	Los proyectos de energía renovable, específicamente solar térmico, contribuyen a la reducción de gases de efecto invernadero y tienen un menor impacto local y socio-ambiental ya que se reduce el consumo de....
Desconocimiento de las consideraciones técnicas para la implementación de un proyecto solar térmico.	Detallar los parámetros técnicos necesarios para la elaboración de un proyecto solar térmico (ubicación, equipo, dimensionamiento, entre otras).	¿Cuáles son las consideraciones técnicas necesarias para un proyecto solar térmico?	Los principales criterios que permiten recomendar la instalación de una central solar térmica para las condiciones actuales de Guatemala en el SIN, son la cantidad de radiación requerida, ubicación, equipo, operación y mantenimiento.
Desconocimiento de la incorporación de un proyecto solar térmico y su efecto en el despacho de carga.	Analizar los efectos en el despacho de carga en el Sistema Nacional Interconectado.	¿Qué efectos se tienen al incorporar un proyecto solar térmico al despacho de carga?	Dentro del sector eléctrico, al incorporar un proyecto solar térmico se tienen los siguientes efectos: 1. Desplazamiento de plantas: se desplazan xxx MW de tecnología búnker. 2. Se obtiene xx % de reducción en el precio de la energía, debido a que el CVG de esta tecnología es más económica, se está desplazando en ciertas bandas a tecnologías más caras para el cubrimiento de la demanda.

Continuación de apéndice 1.

Problema principal	General	Pregunta general	Conclusiones
Desconocimiento del beneficio de la implementación de un proyecto solar térmico.	Elaborar el análisis costo-beneficio de la implementación de un proyecto solar térmico conectado al SIN de Guatemala.	¿Cuál es el costo-beneficio de la implementación de un proyecto solar térmico conectado al SIN de Guatemala?	Un proyecto con este tipo de tecnología tiene un retorno de inversión de xxx, en un tiempo estimado de...

Fuente: elaboración propia.