



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UN SISTEMA
DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO FLOTANTE EN EL EMBALSE DE REGULACIÓN DE
UNA HIDROELÉCTRICA EN GUATEMALA**

Melzar Ismael de León Moro

Asesorado por M.A. Ing. Daniel Ángel Figueroa García

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UN SISTEMA
DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO FLOTANTE EN EL EMBALSE DE REGULACIÓN DE
UNA HIDROELÉCTRICA EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MELZAR ISMAEL DE LEÓN MORO

ASESORADO POR M.A. ING. DANIEL ÁNGEL FIGUEROA GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López de López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO FLOTANTE EN EL EMBALSE DE REGULACIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha mayo de 2023.

Melzar Ismael de León Moro



EEPFI-PP-0373-2023

Guatemala, 21 de abril de 2023

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

Estimado Ing. Rivera

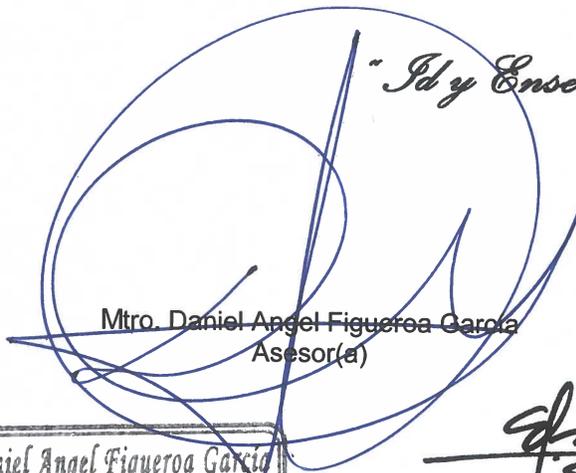
Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO FLOTANTE EN EL EMBALSE DE REGULACIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA EN GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Formulación y evaluación de proyectos energéticos**, presentado por el estudiante **Melzar Ismael De León** carné número **200413075**, 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.

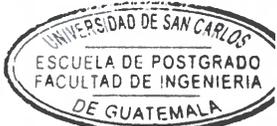
Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

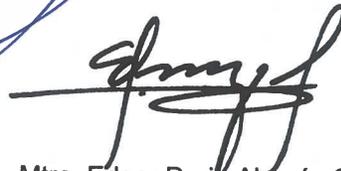


Mtro. Daniel Angel Figueroa Garcia
Asesor(a)

Daniel Angel Figueroa Garcia
Ing. Mecánico Electricista
Colegiado 13087



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



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



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
ESCUELA DE POSTGRADO



EEP-EIME-0372-2023

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO FLOTANTE EN EL EMBALSE DE REGULACIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Melzar Ismael De León**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

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

Guatemala, abril de 2023



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

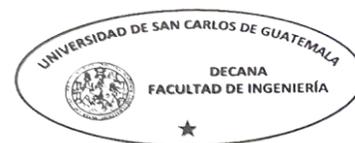
LNG.DECANATO.OIE.6.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO FLOTANTE EN EL EMBALSE DE REGULACIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA EN GUATEMALA,** presentado por: **Melzar Ismael De Leon Moro** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Firmado digitalmente por AURELIA ANABELA CORDOVA ESTRADA Fecha: 24/05/2023 09:01:01 p.m. Razón: Orden de impresión Ubicación: Facultad de Ingeniería, USAC.

Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
Decana



Guatemala, mayo de 2023

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2023 Correlativo: 6 CUI: 2198914780701

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por brindarme la sabiduría, entereza y perseverancia para culminar esta meta.
- Mis padres** Ismael de León y María del Rosario Moro, por apoyarme, creer en mí y nunca renunciar. Su ejemplo y enseñanza en la vida quedó grabado en mi corazón.
- Mis hermanos** Juan Pedro y Sarvia de León, por apoyarme, brindarme palabras de aliento y compartir sacrificios; nunca lo olvidaré.
- Mi novia** Eva Medina, ahora mi compañera de vida, y la que me alentó en este último paso.
- Mi tío** Edgar de León, al impulsar el inicio de esta meta que ahora culmina.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	En especial a la Facultad de Ingeniería, por ser el alma <i>mater</i> que me brindó enseñanzas tanto profesionales como de vida.
Mis amigos	Por todo el apoyo incondicional, la convivencia y las aventuras vividas.
Mi asesor	M.A. Daniel Ángel Figueroa García, por la dedicación en la guía de este trabajo de graduación, y sobre todo por su valiosa amistad.
Mi familia	Porque de una manera u otra, siempre recibí su apoyo y motivación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
2.1. Delimitación y planteamiento del problema	5
2.2. Pregunta principal de la investigación	6
2.3. Preguntas auxiliares	6
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	9
5. ENFOQUE EXPLORATORIO	11
6. MARCO TEORICO.....	13
6.1. Energías renovables.....	13
6.1.1. Energía solar	13
6.1.2. Energía eólica.....	13
6.1.3. Energía hidráulica.....	14

6.1.4.	Energía geotérmica	14
6.1.5.	Biomasa	14
6.2.	Sistemas de generación fotovoltaicos	15
6.2.1.	Descripción de los sistemas fotovoltaicos de generación.....	15
6.2.2.	Clasificación de los sistemas fotovoltaicos de generación.....	15
6.2.2.1.	Sistemas aislados o autónomos.....	16
6.2.2.2.	Sistemas acoplados a la red	17
6.2.2.3.	Sistemas con almacenamiento.....	17
6.2.2.4.	Sistemas para autoconsumo	18
6.2.2.5.	Sistemas a gran escala	19
6.3.	Radiación solar	20
6.4.	Estado actual de la tecnología de generación fotovoltaica flotante	21
6.5.	Componentes principales de los sistemas fotovoltaicos	24
6.5.1.	Paneles fotovoltaicos	24
6.5.1.1.	Paneles de silicio monocristalino.....	25
6.5.1.2.	Paneles de silicio policristalino	25
6.5.1.3.	Paneles de capa fina.....	25
6.5.1.4.	Paneles bifaciales	25
6.5.1.5.	Paneles orgánicos.....	26
6.5.1.6.	Paneles de concentración	26
6.5.2.	Inversores.....	27
6.5.3.	Conductores.....	28
6.5.4.	Estructuras y anclaje	29
6.5.4.1.	Estructura de soporte	30
6.5.4.2.	Flotadores	30
6.5.4.3.	Sistema de soporte en tierra	30

	6.5.4.4.	Anclaje	31
6.6.		Factores de pérdidas energéticas	31
6.7.		Dimensionamiento de los sistemas de generación fotovoltaicos.....	32
	6.7.1.	Cálculo de la potencia a instalar	32
	6.7.2.	Cantidad máxima de paneles por ramal	33
		6.7.2.1. Tensión de circuito abierto - V_{co} -	34
		6.7.2.2. Corriente de corto circuito - I_{sc} -	35
		6.7.2.3. Número de ramales en paralelo.....	36
	6.7.3.	Selección de los inversores	37
		6.7.3.1. Potencia pico de las instalaciones	39
	6.7.4.	Conductores	39
		6.7.4.1. Conductores de corriente continua	40
		6.7.4.2. Conductores de corriente alterna.....	41
	6.7.5.	Protecciones eléctricas	41
		6.7.5.1. Protección contra sobre corrientes	41
		6.7.5.2. Protecciones contra sobretensiones....	42
		6.7.5.3. Protecciones de media o alta tensión ..	42
7.		PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	45
8.		METODOLOGIA.....	49
	8.1.	Diseño y tipo de investigación	49
	8.2.	Fases del estudio	49
		8.2.1. Fase 1. Exploración bibliográfica	49
		8.2.2. Fase 2. Determinación de los límites de la capacidad de generación.....	50
		8.2.3. Fase 3. Diseño técnico del sistema de generación fotovoltaico.....	50

8.2.4.	Fase 4. Diseño técnico de sistema soporte.....	50
8.2.4.1.	Fase 4.1. Diseño técnico del sistema de flotación	51
8.2.4.2.	Fase 4.2. Diseño técnico del sistema de soporte en tierra	51
8.2.5.	Fase 5. Investigación y recopilación de valores de mercado	51
8.2.6.	Fase 6. Análisis técnico-económico	51
8.2.7.	Fase 7. Presentación y discusión de resultados	52
9.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	53
9.1.	Recolección de información	53
9.2.	Descripción y exploración de datos.....	53
9.3.	Herramientas de cálculo.....	54
10.	CRONOGRAMA	55
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO Y RECURSOS NECESARIOS	57
	REFERENCIAS	59
	APÉNDICES.....	63
	ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Sistema fotovoltaico autónomo.....	16
Figura 2.	Sistema fotovoltaico acoplado a la red	17
Figura 3.	Sistema fotovoltaico con almacenamiento.....	18
Figura 4.	Sistema fotovoltaico para autoconsumo	19
Figura 5.	Sistema fotovoltaico a gran escala	20
Figura 6.	Radiación solar en Guatemala.....	21
Figura 7.	Diseño del sistema solar fotovoltaico flotante	22
Figura 8.	Evolución de la capacidad de sistemas fotovoltaicos flotantes a nivel global.....	25
Figura 9.	Tipos de paneles solares.....	27
Figura 10.	Representación de un sistema fotovoltaico conectado a red.....	29
Figura 11.	Cronograma de actividades.....	55

TABLAS

Tabla 1.	Presupuesto de la investigación	57
-----------------	---------------------------------------	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
β	Coeficiente de temperatura
α	Coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito.
AC	Corriente alterna
CC	Corriente continua
I_{sc}	Corriente de corto circuito
I_{entrada max}	Corriente de entrada máxima
I_{SC MAX}	Corriente máxima de corto circuito
US\$	Dólar de Estados Unidos
F_{DI}	Factor de dimensionamiento
FV	Fotovoltaico
GW	Giga watts
°C	Grado centígrado
I+D	Investigación y Desarrollo
E	Irradiancia media
kWh/m²	Kilowatt hora por metro cuadrado
AM1.5G	Masa de aire, espectro estándar en la superficie de la tierra.
MW	Mega watts
m/s	Metros por segundo
N_{paneles por ramal}	Número de paneles
N_{ramales}	Numero de ramales
N_{max}	Número máximo de paneles en serie

%	Por ciento
P_G	Potencia generada
P_{MAX}	Potencia máxima
P_{pico}	Potencia pico
Q	Quetzales
T_{ambiente}	Temperatura ambiente
T_{panel}	Temperatura del panel
TONC	Temperatura nominal que alcanza la célula del panel
V_{co}	Tensión de circuito abierto
V_{mpp}	Tensión de punto de máxima potencia
U_{max}	Tensión máxima obtenida en la entrada
UV	Ultravioleta
W/m²	Watt por metro al cuadrado

GLOSARIO

Autoconsumo	Consumo por parte de productores de bienes o servicios producidos por ellos mismos.
CAPEX	Es el gasto que una empresa realiza en bienes de equipo y que genera beneficios para una compañía, bien sea a través de la adquisición de nuevos activos fijos, o bien por medio de un aumento en el valor a los activos fijos ya existentes.
Concesión demanial	Título habilitante que permite el uso especial o el uso privativo que requiera instalaciones fijas de un bien de dominio público.
Electrónica de potencia	Dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para transformar y controlar voltajes y corrientes de niveles significativos, mediante el procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica.
Embalse de regulación	Depósito natural o artificial para recoger agua, que se transporta hasta la central eléctrica para iniciar la producción de energía.
Energía primaria	Es una magnitud física que se asocia con la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo mecánico, emitir luz, generar calor.

HDPE	Polietileno de alta densidad.
Hibridación	Para fuentes de energía renovable entiéndase como la generación utilizando dos o más fuentes de energía.
Innovation Fund	Fondo de Innovación, programas de financiación para la demostración de tecnologías innovadoras bajas en carbono.
Intermitencia	Que se interrumpe, cesa o disminuye y luego prosigue o se repite.
MPP	Punto de máxima potencia.
MPPT	Seguidor de punto de máxima potencia.
OPEX	Gastos operativos. Se refiere a todos los gastos que una empresa realiza para llevar a cabo sus funciones principales: pagar la renta, la nómina, adquirir materia prima, mantenimiento, entre otras.
PVC	Policloruro de vinilo.
SERIS	Solar Energy Research Institute of Singapore.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
TIR	Tasa Interna de Retorno.
VPN	Valor Presente Neto.

XLPE

Polietileno reticulado.

RESUMEN

El uso de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica ya es una tecnología ampliamente utilizada en el mundo. Su uso en el territorio guatemalteco va desde la implementación de pequeños sistemas domiciliarios para autoconsumo, hasta sistemas de generación fotovoltaica de grandes dimensiones, que tienen la capacidad de producir hasta 50 MW de potencia e inyectarlo al Sistema Nacional Interconectado -SIN-.

La hibridación de sistemas de generación a base de energías renovables se perfila como una alternativa fuerte para la mitigación a la intermitencia de este tipo de generación y da pie a este estudio, que propone la implementación de un sistema solar fotovoltaico flotante en el embalse de una hidroeléctrica.

Este proyecto busca aprovechar la superficie del agua para generar energía limpia y renovable a partir de un sistema de paneles solares montados sobre estructuras flotantes, que se instalan en el agua del embalse. La energía producida por los paneles solares es transmitida a través de cables subacuáticos a una subestación eléctrica cercana, donde se puede convertir y distribuir para su uso en hogares y empresas.

Algunas de las ventajas, incluyen la posibilidad de aprovechar la superficie del embalse para la generación de energía solar sin ocupar tierra adicional, y la capacidad de reducir la evaporación del agua en el embalse al proporcionar sombra y reducir la temperatura del agua.

El diseño de un sistema solar fotovoltaico flotante puede ayudar a reducir la dependencia de la energía generada por combustibles fósiles, y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático.

OBJETIVOS

General

Analizar la viabilidad técnica y económica de un sistema de generación fotovoltaico flotante para la optimización de la generación de una central hidroeléctrica en Guatemala.

Específicos

1. Estimar la capacidad de generación fotovoltaica que puede ser instalada en el embalse de regulación de la hidroeléctrica.
2. Diseñar el sistema de generación fotovoltaico a instalar con base en la capacidad de generación estimada.
3. Examinar la viabilidad económica de implementar un sistema de generación fotovoltaico flotante en comparación con un sistema convencional.

INTRODUCCIÓN

Toda tecnología de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables está sujeta a cierta intermitencia que limita la producción de manera continua, algunas de estas formas de generación se ven afectadas en mayor grado que otras, dependiendo de la continuidad y estabilidad de la fuente de energía primaria o de cuanta de esta se pueda almacenar.

La energía hidroeléctrica, si bien, puede acumular grandes cantidades de energía primaria (agua), mediante el uso embalses de almacenamiento, la cantidad de agua reservada se ve reducida en tiempos de sequía, al disminuir el afluente de los ríos que alimentan el embalse, obteniendo como consecuencia el racionamiento del agua para operar, y generar solamente en períodos específicos del día.

Con la implementación de un sistema de generación fotovoltaico flotante en el embalse de una hidroeléctrica, esta investigación pretende aportar una alternativa para consolidar un sistema de generación híbrido que permita entre otros, una gestión más dinámica del uso del agua de una hidroeléctrica, principalmente en épocas secas; estabilizar la generación que se inyecta a la red, reduciendo la cantidad de agua evaporada por la incidencia directa del sol con el espejo de agua; y presentar una alternativa a algunos cuestionamientos medioambientales de un sistema fotovoltaico convencional, como lo es la utilización de grandes cantidades de terreno para poder instalar el sistema de generación fotovoltaico.

En ese sentido, la investigación se desarrollará en seis capítulos.

El primer capítulo describe el proceso de construcción de un sistema fotovoltaico, y factores que intervienen en él, tanto técnicos, económicos, medio ambientales, incluyendo un breve análisis de la normativa guatemalteca.

En el segundo capítulo se analizarán los límites tanto de área, como físicos, eléctricos, entre otros, que determinarán la cantidad de energía que se podrá producir con la implementación de los paneles fotovoltaicos.

El tercer capítulo, se enfoca en el diseño del sistema fotovoltaico como tal, la selección del tipo de panel a utilizar, la configuración y conexión de estos, así como la selección de los inversores, dimensionamiento de los conductores tanto de corriente directa como de corriente alterna y las protecciones adecuadas al sistema propuesto.

En el cuarto capítulo, se realizará el diseño y dimensionamiento de un sistema mecánico de soporte flotante y un sistema de soporte mecánico terrestre para el mismo diseño y cantidad de paneles solares.

Al pasar al quinto capítulo, se procederá a realizar una investigación de mercado recopilando los precios de los componentes del sistema solar, incluyendo los costos del sistema de soporte acuático y terrestre, precios de transporte, importación y todo lo relacionado a la determinación de la inversión necesaria para implementar el diseño propuesto del sistema fotovoltaico.

El capítulo seis se enfocará en la evaluación técnica y económica, comparando el sistema solar convencional (terrestre), y el flotante, observando los beneficios, obstáculos, recuperación de la inversión, proyección de la

generación e impactos medioambientales, que permitan determinar la viabilidad del proyecto.

Al final del estudio se presentarán los resultados, conclusiones y recomendaciones, de la investigación.

1. ANTECEDENTES

En el presente estudio de investigación, se identificaron investigaciones previas, relacionadas con el análisis y diseño de sistemas de generación fotovoltaicos flotantes.

Según Cruz (2021), en su publicación *Instalación fotovoltaica flotante de autoconsumo con excedentes, no acogida a compensación: diseño y legalización*, donde expone los principales beneficios de las instalaciones fotovoltaicas flotantes, las proyecciones de crecimiento y su potencial, y realiza el diseño de una instalación flotante para auto consumo con excedentes, en una balsa dedicada el riego ubicada en la provincia de Jaén, Regantes, España, concluye enfocándose en la necesidad de establecer normativas claras, que le dé certeza jurídica a los inversores y soluciones concretas a problemas que surgen en esta nueva subdivisión de proyectos fotovoltaicos.

Según Lagos (2021) en su tesis de maestría *Análisis técnico, económico y medioambiental sobre plantas fotovoltaicas flotantes y su potencial implementación*, donde expone diferentes aplicaciones de las plantas solares flotantes, tecnologías de flote, factores que influyen en el diseño y operación de este sistema de generación. A partir de ello encuentra que se obtiene menor ratio de CAPEX en plantas mayores a 200 MW de potencia (0.63 US\$), en comparación con plantas entre 0 y 10 MW de potencia (1.84 US\$), para los costos del OPEX (operación y mantenimiento), enfatiza que hay considerables diferencias entre los beneficios y complicaciones para el mantenimiento de la planta flotante en comparación con una planta en tierra. Finaliza con la viabilidad económica concluyendo que la rentabilidad exigida no se satisface aun en los

escenarios más optimistas, principalmente por el elevado monto de inversión inicial asociado a los flotadores, amarres y anclajes, y al ángulo de inclinación condicionado a latitudes alejadas del ecuador; haciendo la salvedad de la necesidad de optimizar la economía de escala y curvas de aprendizaje en cuanto a las tecnologías de flotadores para reducir los costes y alcanzar la competitividad.

En la tesis de Maestría *Instalación y explotación de una planta fotovoltaica flotante en el embalse de José María Oriol-Alcántara II vía ampliación de concesión demanial* (Martínez, 2021). Se desarrolla y evalúa las especificaciones y diseño de los elementos que conforman la planta flotante, los impactos ambientales y viabilidad económica del proyecto bajo la premisa de ampliar la concesión de uso de bienes de dominio público de la empresa Iberdrola Generación S. A. para la generación hidroeléctrica en la planta José María Oriol-Alcántara II.

De los resultados obtenidos concluye que el proyecto como tal, no resulta rentable financieramente al proyectar un $VPN < 0$ y una rentabilidad más baja que el coste del capital ($TIR < \text{tasa de descuento}$), sin embargo, la orientación del proyecto como un proyecto de Investigación y desarrollo I+D que sienta las bases para el desarrollo de energías renovables innovadoras, aportaría el valor suficiente para la inversión, considerando que permitiría acudir a subvenciones por parte de Europa en futuras convocatorias abiertas por el Innovation Fund, además de abrir escenarios que permitan desarrollarlo de maneras más ventajosas.

En la tesis de Maestría *Incorporación de plantas fotovoltaicas flotantes en el embalse de la hidroeléctrica de Urrá para el aprovechamiento areal y de infraestructura eléctrica* (Niño y Rodríguez, 2021). Donde desarrolla un

diagnóstico de todos los factores que intervienen para la incorporación de plantas fotovoltaicas en el embalse de la hidroeléctrica de Urrá, para posteriormente considerar la viabilidad y funcionalidad de la propuesta. Concluye, que este tipo de proyectos son totalmente compatibles con planes de desarrollos sostenible, por lo que, al incluir objetivos como agua limpia, saneamiento energía no contaminante, ecosistemas terrestres, e inclusive desarrollo económico social, el costo elevado de la inversión inicial (que pueden ser coadyuvados con exenciones de impuestos, apoyo financiero para proyectos de inversión de energía limpia o apoyo internacional), puede concluir en un proyecto altamente viable.

Según Puebla (2022), en su publicación *Estudio técnico-económico de una instalación solar fotovoltaica flotante y su comparativa con una instalación fotovoltaica tradicional*, donde evalúa el diseño técnico y rendimiento económico de sistemas fotovoltaicos idénticos en dos ambientes diferentes, uno sobre el agua y el otro en tierra; realiza el estudio utilizando diferentes tipos de paneles y configuraciones, concluyendo que las instalaciones flotantes pueden llegar a ser hasta un 10 % más eficientes que su símil en tierra bajo condiciones específicas, tales como ángulos de inclinación y tipos de paneles utilizados, sin embargo, en ninguno de los casos evaluados la recuperación de capital de un sistema flotante fue menor a la recuperación de un sistema en tierra, desventaja que puede verse compensada por la eliminación del uso del espacio en tierra o mejoras en el aprovechamiento del agua del embalse.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Delimitación y planteamiento del problema

La intermitencia, es una constante de la que adolecen hasta el día de hoy los sistemas de generación que utilizan como energía primaria las fuentes renovables. Los enormes avances tecnológicos en el desarrollo y la madurez en la utilización de este tipo de energías han logrado mermar el impacto de esta intermitencia, la cual, afecta de manera diferente a cada tecnología como, por ejemplo, la noche a la energía fotovoltaica o el verano a la energía hidroeléctrica.

La generación hidroeléctrica implica la liberación controlada de agua, (almacenada previamente en un embalse), a través de las turbinas. Al llegar el verano, el caudal de los ríos que alimentan el embalse se reduce, lo que implica que los niveles de agua en los embalses tienden a disminuir, por lo que, dentro de la gestión del agua de la hidroeléctrica, se opta por reducir la generación de acuerdo con los niveles de agua disponibles.

Adicionalmente, una consecuencia del almacenamiento del agua, y que se incrementa durante la estación de verano, es la evaporación natural del agua por el calor, que puede llegar a ser considerablemente alta, dependiendo de la intensidad del sol, lo cual, también es un volumen de agua que no se utiliza para el propósito de su almacenaje y que, a la larga, puede llegar a impactar en la generación de electricidad.

Otra situación que interviene en la reducción de la generación, (aunque si bien es cierto, esta es necesaria y aplicada en todo tipo de generación y puede

estar sujeta a una planificación), es la indisponibilidad de las maquinas generadoras por algún desperfecto o el mantenimiento al que todo elemento mecánico debe de someterse para mantener el buen funcionamiento de los equipos.

Una alternativa planteada en los últimos años, que coadyuva a disminuir los impactos de la reducción de la generación es la diversificación de las fuentes de energía renovables, un sistema solar sobre el embalse de regulación de la hidroeléctrica puede complementar la generación hidroeléctrica y proporcionar una fuente adicional de energía eléctrica durante estos periodos de disminución del afluente de agua y reducir los niveles de evaporación del agua almacenada. Considerando lo anterior, se plantean las siguientes preguntas de investigación:

2.2. Pregunta principal de la investigación

¿Cuál es la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de generación fotovoltaica flotante que permita optimizar la generación en una central hidroeléctrica en Guatemala?

2.3. Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es la capacidad de generación fotovoltaica que puede ser instalada en el embalse de regulación de la hidroeléctrica?
- ¿Cuál es el diseño técnico del sistema de generación fotovoltaico flotante a instalar?
- ¿Cuál es el balance económico del sistema fotovoltaico flotante en comparación con un sistema convencional?

3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica en el área de Gestión y uso Eficiente de la Energía, específicamente dentro de la línea de investigación de *Formulación y evaluación de proyectos energéticos*, de la Maestría de Energía y Ambiente.

El estudio aporta un análisis técnico y económico de la utilización y optimización del recurso energético renovable al utilizar y asociar dos fuentes de energía diferentes, la potencial hídrica, ya existente, y la solar, como proyecto a instalar, al valerse del espacio que ocupa el espejo de agua del embalse de regulación de una hidroeléctrica en Guatemala, e instalar sobre él los paneles del sistema de generación fotovoltaica mediante un sistema de flote.

Con la implementación de dicho proyecto se espera la optimización de la energía eléctrica total generada, al considerar el aporte de la energía solar fotovoltaica, por ejemplo, en época de sequía, cuando se reduce la cantidad de agua que ingresa al embalse, y por ende se reduce la cantidad de energía generada por la hidroeléctrica. Esto tendría un impacto positivo en el costo de la energía, puesto que, cuando la generación con recurso renovable escasea, la potencia del sistema eléctrico se compensa con el ingreso de generadores que utilizan energía primaria proveniente de fuentes de origen no renovable, la cual tiene un costo más elevado, y emite cantidades considerables de gases de efecto invernadero.

El desarrollo de este estudio proporciona información añadida a los diferentes proyectos que se desarrollan para la combinación de diferentes

fuentes de energía renovable, por mencionar alguna, la solar – eólica, aportando como beneficio adicional para el ambiente, la no utilización de áreas de terrenos que pueden ser utilizados para otras actividades.

4. ESQUEMA DE SOLUCIÓN

A partir del presente estudio, se estimará el potencial energético solar disponible en el lugar donde se encuentra ubicado el embalse de una hidroeléctrica, además de determinar los límites máximos o mínimos de infraestructura, de área, físicos y de capacidad disponibles para poder diseñar el sistema de generación fotovoltaico que permita optimizar la generación de la central hidroeléctrica.

Una vez establecidos los límites técnicos se procederá a diseñar y dimensionar el sistema fotovoltaico, su capacidad de generación, selección de los tipos de paneles, orientación, inclinación, así como, la selección de los tipos de conductores tanto para la corriente continua como para la corriente alterna, inversores, protecciones y sistemas de soporte, para luego, realizar el análisis económico y determinar la viabilidad de la implementación de sistema solar en el embalse de regulación de la hidroeléctrica.

5. ENFOQUE EXPLORATORIO

En el sentido de que el diseño de la presente investigación es de carácter cuantitativo con enfoque descriptivo, no se formulará una hipótesis.

6. MARCO TEORICO

Este capítulo desarrolla conceptos básicos relacionados con el diseño de sistemas fotovoltaicos de generación.

6.1. Energías renovables

El estudio de Chavarría (2009), las define como “aquellas que permiten satisfacer las necesidades energéticas presentes sin poner en compromiso las necesidades de energía de las generaciones futuras y de los países en desarrollo” (p. 1-4). Las mayores fuentes energía renovable utilizadas hasta la fecha son:

6.1.1. Energía solar

Esta energía es obtenida de la radiación solar que alcanza la superficie del planeta y es transformada en energía eléctrica mediante el uso de elementos denominados paneles solares.

6.1.2. Energía eólica

Esta energía se consigue al utilizar y manejar el viento. Se implementan turbinas eólicas que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica.

6.1.3. Energía hidráulica

Se obtiene a partir del movimiento del agua en ríos, presas o mareas, por medio de turbinas hidráulicas que transforman la energía cinética del agua en energía eléctrica.

6.1.4. Energía geotérmica

Se obtiene a partir del calor del interior de la tierra, mediante la utilización de sistemas de perforación y bombas de calor que transforman el calor en energía eléctrica.

6.1.5. Biomasa

Se obtiene a partir del aprovechamiento materia orgánica, como residuos agrícolas o forestales, que se queman para producir energía térmica o eléctrica.

La importancia de las energías renovables radica en el hecho de que son limpias, seguras y sostenibles, ya que no emiten gases contaminantes ni contribuyen al cambio climático. También representan una opción sustitutiva a las diversas fuentes de energía no renovables también denominadas convencionales, como los combustibles fósiles, que no son renovables y emiten sustancias contaminantes.

6.2. Sistemas de generación fotovoltaicos

En esta sección, se describe de manera general el concepto de un sistema de generación fotovoltaico componentes y se abordan las diferentes clasificaciones que han surgido a partir de su implementación de estos.

6.2.1. Descripción de los sistemas fotovoltaicos de generación

Estos sistemas, son un conjunto de elementos que, a partir de una fotocelda y un fenómeno físico de unión de materiales semiconductores, transforman la energía solar proveniente del sol en electricidad (Sánchez, 2021). Los sistemas fotovoltaicos están compuestos principalmente por los siguientes componentes: paneles solares fotovoltaicos, inversores, baterías de almacenamiento, conductores y protecciones. Los sistemas fotovoltaicos se utilizan en diversas aplicaciones, desde pequeños sistemas de iluminación hasta grandes sistemas de energía solar a gran escala que alimentan las redes eléctricas de los países. Todos estos sistemas son una alternativa sostenible a las fuentes que hacen uso de energías no renovables, como los combustibles fósiles.

6.2.2. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos de generación

De acuerdo con Cruz (2021) “La forma principal en la que se clasifican las distintas instalaciones fotovoltaicas es por su uso, distinguiendo en, si su fin es para autoconsumo o se destina para la venta de energía como una instalación productora” (p. 44). La correcta definición y elección del sistema, ayudara en las necesidades energéticas del usuario, tanto en la ubicación como en el

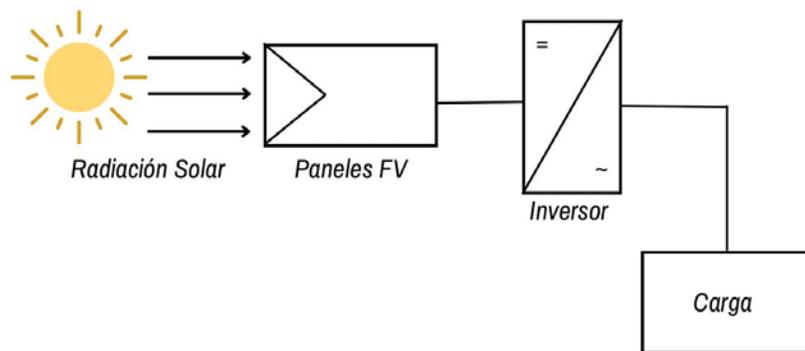
presupuesto disponible. A continuación, se presenta una clasificación general de dichos sistemas:

6.2.2.1. Sistemas aislados o autónomos

“Es un conjunto de cargas y dispositivos eléctricos y electrónicos cuyos consumos energéticos se ven satisfechos por un generador solar fotovoltaico. Se caracteriza por no estar conectado a la red eléctrica convencional” (Alonso et al., 2013, p. 51). Se utilizan en áreas rurales o aisladas que no tienen acceso a la energía eléctrica.

Figura 1.

Sistema fotovoltaico autónomo



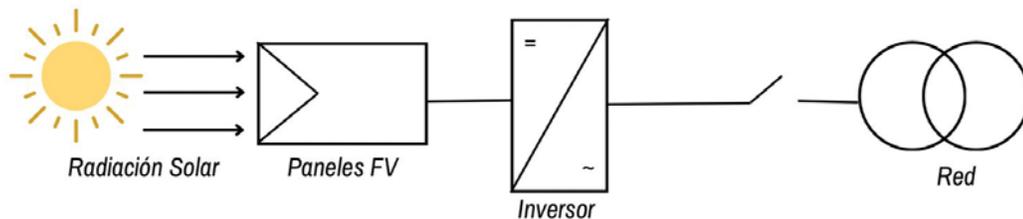
Nota. Diagrama básico de un sistema fotovoltaico autónomo. Elaboración propia, realizado con Canva.

6.2.2.2. Sistemas acoplados a la red

Estos sistemas se diseñan para conectarse a la red eléctrica. La energía obtenida se inyecta a la red para que sea utilizada por otros consumidores de electricidad. Pueden tener o no sistemas de almacenamiento.

Figura 2.

Sistema fotovoltaico acoplado a la red



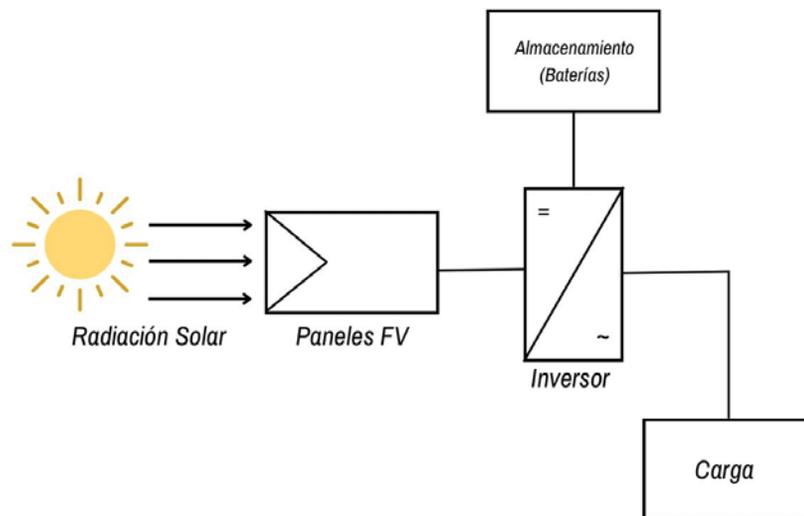
Nota. Diagrama básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red. Elaboración propia, realizado con Canva.

6.2.2.3. Sistemas con almacenamiento

Estos sistemas se diseñan con la capacidad de guardar la energía producida por el sistema de paneles mediante la implementación de baterías. La energía almacenada se utiliza en momentos de menor o nula producción solar.

Figura 3.

Sistema fotovoltaico con almacenamiento



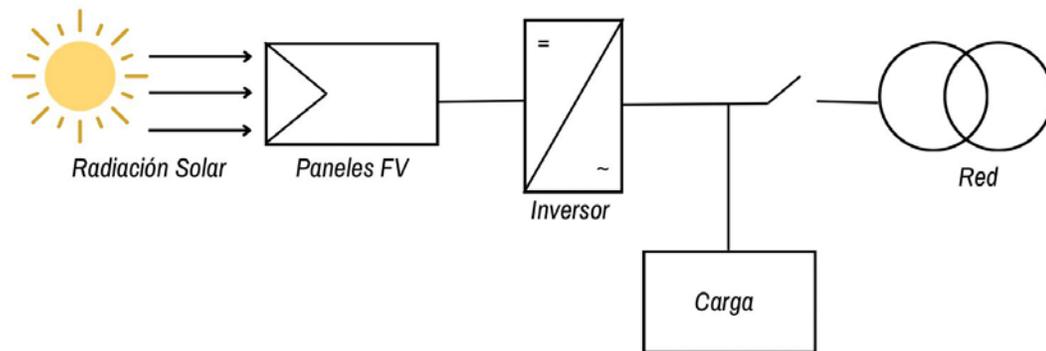
Nota. Diagrama básico de un sistema fotovoltaico con almacenamiento. Elaboración propia, realizado con Canva.

6.2.2.4. Sistemas para autoconsumo

Son sistemas que se diseñan para que la energía eléctrica generada sea utilizada para el consumo en un edificio o una vivienda. Con estos sistemas se reduce la dependencia de una red eléctrica externa. En varios países, los excedentes de energía producidos se pueden vender inyectándolos a la red eléctrica.

Figura 4.

Sistema fotovoltaico para autoconsumo



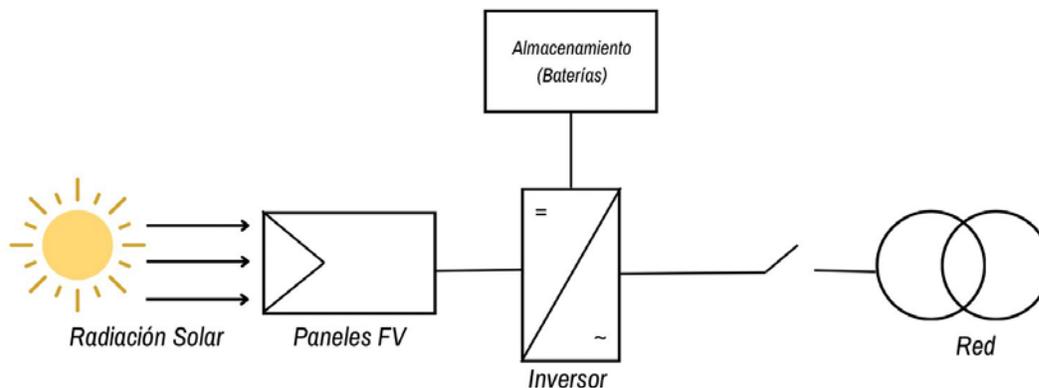
Nota. Diagrama básico de un sistema fotovoltaico para autoconsumo. Elaboración propia, realizado con Canva.

6.2.2.5. Sistemas a gran escala

Estos son parques solares o plantas de energía solar, que producen energía ocupando grandes extensiones de terreno. Generalmente se conectan al Sistema Nacional Interconectado y pueden proveer energía a pueblos enteros por la cantidad de potencia del sistema.

Figura 5.

Sistema fotovoltaico a gran escala



Nota. Diagrama básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red. Elaboración propia, realizado con Canva.

6.3. Radiación solar

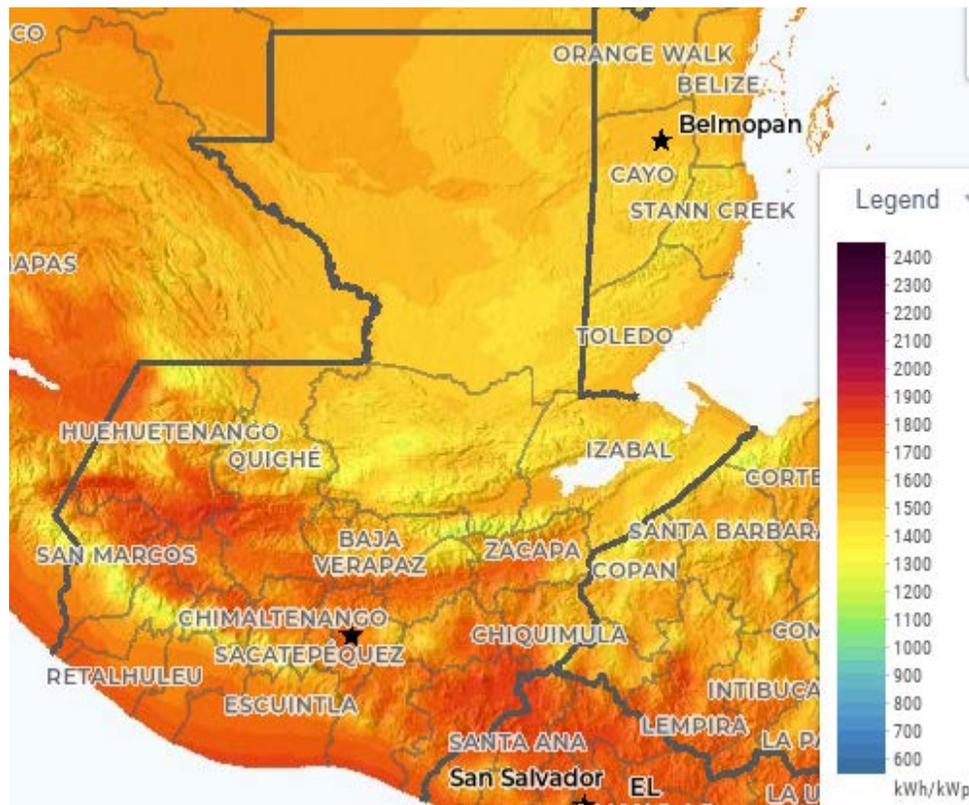
La energía que el Sol emite es conocida como Radiación Solar, son ondas electromagnéticas que llegan a la tierra en forma de luz.

La potencia de la radiación depende de las condiciones atmosféricas, geográficas y del momento del día, sin embargo, en condiciones óptimas la irradiancia obtenida en la superficie de la tierra es de aproximadamente de 1000 W/m². Esta radiación puede llegar a la tierra en forma directa o difusa.

En la imagen que muestra la radiación solar, se observa el mapa de Guatemala con el nivel y distribución de la intensidad de radiación solar. Para el caso de Guatemala el promedio de la radiación solar se encuentra entre 2.36 y 5.65 kWh/m² de acuerdo con los datos obtenidos de Global Solar Atlas.

Figura 6.

Radiación solar en Guatemala



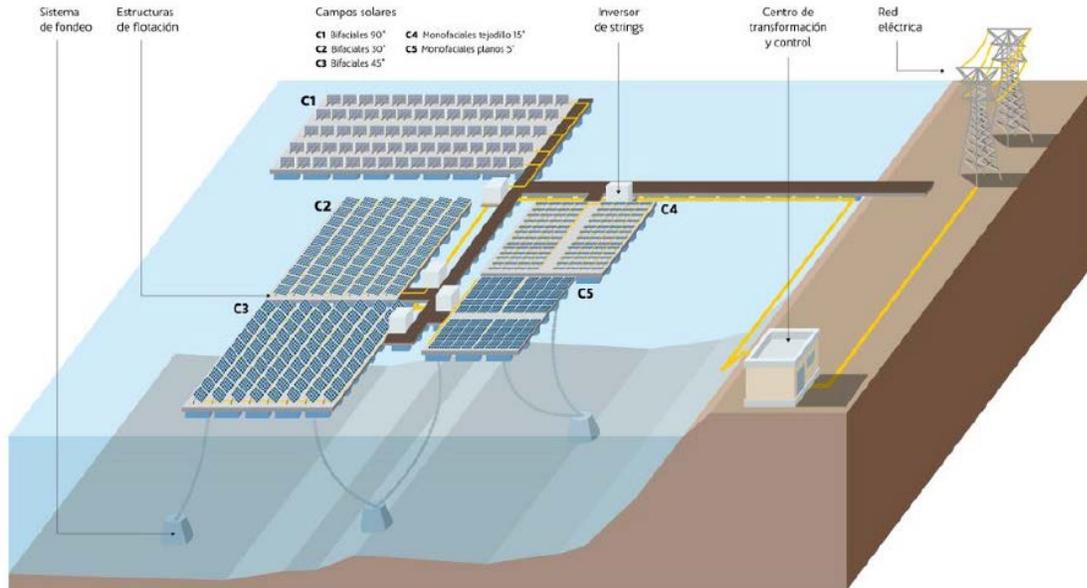
Nota. Distribución de la radiación solar en Guatemala. Obtenido de Global Solar Atlas (2023). *Global Solar Atlas* [Mapa interactivo]. (<https://globalsolaratlas.info/map>), consultado el 7 de abril de 2023. De dominio público.

6.4. Estado actual de la tecnología de generación fotovoltaica flotante

Los sistemas de generación fotovoltaica flotantes están ganando popularidad debido a la ventaja que suponen de producir energía eléctrica sin hacer uso de grandes extensiones de tierra. Estos sistemas están diseñados para flotar sobre cuerpos de agua, como lagos, embalses, ríos y océanos.

Figura 7.

Diseño del sistema solar fotovoltaico flotante



Nota. Instalación flotante de Sierra Brava. Obtenido de A. Cruz (2021). *Instalación fotovoltaica flotante de autoconsumo con excedentes, no acogida a compensación: diseño y legalización.* (<https://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/16515>), consultado el 27 de febrero de 2023. De dominio público.

En la actualidad, los sistemas de generación fotovoltaica flotantes se encuentran en diferentes etapas de desarrollo y aplicación en todo el mundo. Se han instalado plantas solares flotantes en países como China, Japón, India, Estados Unidos, Australia y algunos países de Europa.

En algunos casos, se están desarrollando tecnologías para que los paneles solares floten directamente sobre el agua sin necesidad de estructuras de soporte. Estos sistemas están diseñados para minimizar el impacto ambiental y mejorar la eficiencia de la generación de energía.

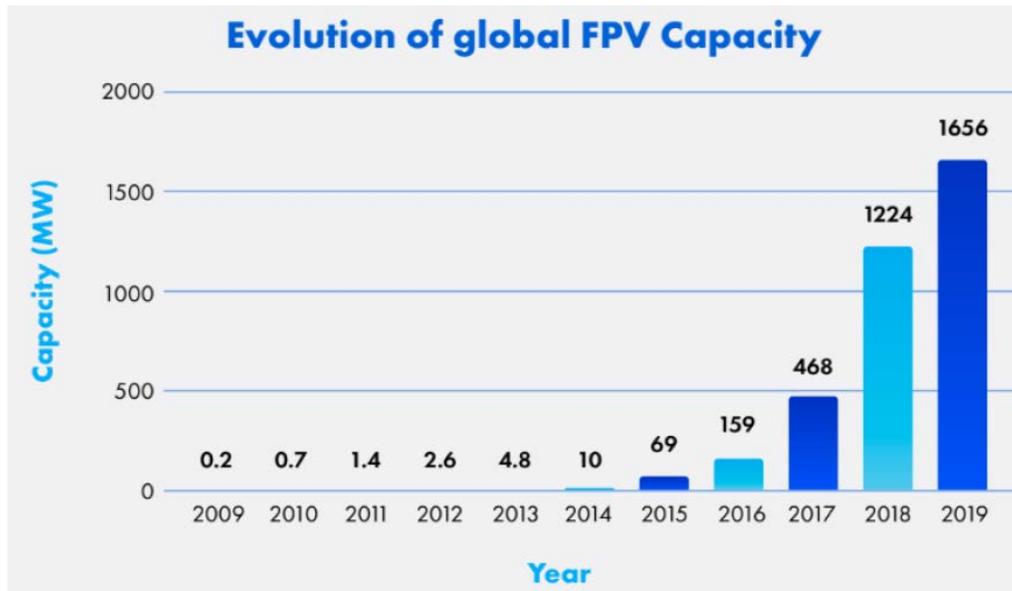
De acuerdo con los estudios realizados por el SERIS, citados por Cruz (2021):

El sector de la energía eléctrica a partir de sistemas fotovoltaicos flotantes ha experimentado un rápido crecimiento en años recientes, con una capacidad mundial acumulada de alrededor de 1,7 GW. En 2019, se registró un aumento significativo de 432 MW, lo que representa un crecimiento del 35% con respecto al año anterior, que tenía 1,2 GW instalados. Asia lidera la tendencia, con 1,1 GW en construcción, seguida de Europa, que planea instalar 60,4 MW, y América del Norte, América del Sur y Oceanía, que tienen en marcha proyectos de menor escala.

China encabeza la lista de países con más infraestructuras fotovoltaicas flotantes, con cuatro plantas en funcionamiento que superan los 100 MW y otras tres con más de 50 MW. En Europa, destacan las plantas O'mega en Francia con 17 MW, y Sekdoorn y Tynaarlo en Holanda, con 14,5 y 8,4 MW, respectivamente. (p. 8)

Figura 8.

Evolución de la capacidad de sistemas fotovoltaicos flotantes a nivel global



Nota. Evolución de la potencia fotovoltaica flotante. Obtenido de M. Puebla (2022). *Estudio técnico-económico de una instalación solar fotovoltaica flotante y su comparativa con una instalación fotovoltaica tradicional.* (<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/56843>), consultado el 5 de marzo de 2023. De dominio público.

6.5. Componentes principales de los sistemas fotovoltaicos

En esta sección se describen brevemente los elementos que conforman los sistemas fotovoltaicos en general

6.5.1. Paneles fotovoltaicos

Son recuadros conformados por elementos más pequeños denominados celdas solares, todas las celdas operando juntas transforman en energía eléctrica (corriente continua), la radiación solar que incide en el panel. Varios paneles

solares pueden conectarse entre sí para escalar la capacidad del sistema y con ello, generar la cantidad de energía necesaria para alimentar hogares, edificios o incluso comunidades enteras.

La industria ha desarrollado varios tipos de paneles solares, cada uno con características y aplicaciones únicas.

6.5.1.1. Paneles de silicio monocristalino

Se trata de una tecnología compuesta por una única pieza de cristal de silicio altamente puro, y que presenta una elevada eficiencia en la conversión de la luz del sol en energía eléctrica. Son reconocidos por su uniformidad y color negro.

6.5.1.2. Paneles de silicio policristalino

Estos paneles están hechos de silicio fundido y son menos costosos de producir que los paneles monocristalinos. Son reconocidos por su color azul y su eficiencia energética es un poco menor que los paneles monocristalinos.

6.5.1.3. Paneles de capa fina

Según Puebla (2022) “El fundamento de estos paneles es depositar varias capas de material fotovoltaico en una base. Dependiendo del material empleado podemos encontrar paneles de capa fina de silicio amorfo, telurio de cadmio, cobre, indio, galio y selenio o células fotovoltaicas orgánicas” (p.27). Son flexibles y livianos, lo que los hace ideales para aplicaciones en superficies curvas.

6.5.1.4. Paneles bifaciales

Estos paneles pueden recolectar energía solar desde ambos lados, lo que en circunstancias específicas resultan más eficientes en la conversión de la radiación solar en electricidad.

6.5.1.5. Paneles orgánicos

Estos paneles utilizan polímeros orgánicos para recolectar energía solar y son muy flexibles, lo que los hace ideales para aplicaciones en superficies curvas o en textiles.

6.5.1.6. Paneles de concentración

Estos paneles utilizan lentes o espejos para concentrar la luz solar en células solares pequeñas y altamente eficientes. Se utilizan en proyectos de energía solar a gran escala.

Cada panel tiene sus ventajas y desventajas, sin embargo, la variedad de tecnologías permite adaptarse a las necesidades específicas del proyecto y las condiciones ambientales donde se instalarán.

Figura 9.

Tipos de paneles solares



Nota. La imagen muestra algunos tipos de paneles solares. Obtenido de Tritec Intervento (2017). *Tipos de paneles fotovoltaicos.* (<https://tritec-intervento.cl/tipos-de-paneles-fotovoltaicos/>), consultado el 23 de marzo de 2023. De dominio público.

6.5.2. Inversores

Un inversor provee la corriente alterna (AC), que se inyectará a la red eléctrica ya sea interna o externa, alimentado por la corriente continua (CC), obtenida de los paneles solares.

Además de la transformación de corriente de continua a alterna, algunos inversores tienen funciones de monitoreo y control para administrar y de seguimiento de máxima potencia.

Existen diferentes tipos de inversores, incluyendo inversores de cadena, inversores centrales, inversores micro y optimizadores de potencia, cada uno diseñado para diferentes tipos de sistemas y necesidades energéticas.

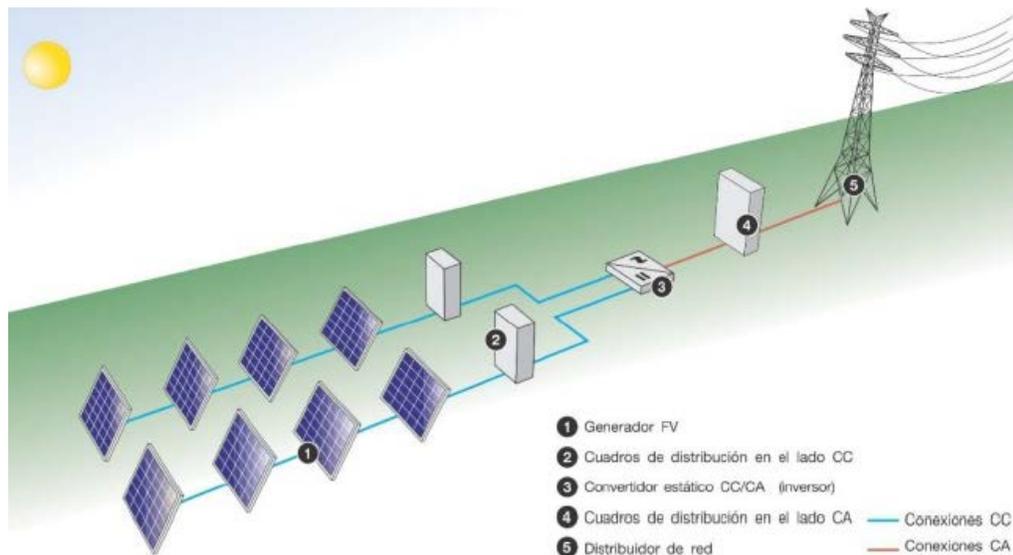
6.5.3. Conductores

Los conductores conectan todos los elementos del sistema fotovoltaico y permite que la energía producida en forma de electricidad se transporte hacia el inversor y de ahí al resto del sistema eléctrico. Cobre y aluminio son los dos principales metales con los que se fabrican los conductores debido a su gran capacidad conductiva. Estos conductores deben ser dimensionados adecuadamente para disminuir las caídas de tensión.

El tipo de cable utilizado debe ser compatible con la clasificación de temperatura y tensión del sistema. Los cables utilizados en sistemas fotovoltaicos deben ser resistentes a los rayos ultravioleta -UV- y al agua. Los cables más comunes utilizados en sistemas fotovoltaicos son los cables de cobre con revestimiento de PVC o XLPE.

Figura 10.

Representación de un sistema fotovoltaico conectado a red



Nota. Esquema básico de una instalación solar fotovoltaica conectada a red. Obtenido de M. Puebla (2022). *Estudio técnico-económico de una instalación solar fotovoltaica flotante y su comparativa con una instalación fotovoltaica tradicional.* (<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/56843>), consultado el 5 de marzo de 2023. De dominio público.

6.5.4. Estructuras y anclaje

A continuación, se describen algunos conceptos generales relacionados con los componentes mecánicos de los sistemas de generación fotovoltaica; estructuras fijas y móviles, para la generación en tierra firme y estructuras de flote y anclajes para los sistemas flotantes.

6.5.4.1. Estructura de soporte

Las estructuras de soporte son las encargadas de proveer el soporte mecánico para sujetar los paneles solares en el ángulo y dirección correcta, además de mantener los paneles en su lugar ante la acción del viento, lluvia y otros climas. Aparte de las estructuras fijas, existen también estructuras móviles, provistas de motores que orientan los paneles a la posición del sol con el fin de optimizar la energía obtenida del sistema.

6.5.4.2. Flotadores

El sistema flotante es una estructura que tiene como función sostener los paneles solares sin permitir que se sumerjan completamente. Además, se encarga de mantener la posición geográfica de la instalación mediante la utilización de anclas o amarres.

El diseño del sistema flotante debe ser adecuado a las condiciones atmosféricas y funcionales de la zona, incluyendo temperaturas extremas, velocidad y composición del agua, entre otros factores importantes. Aunque la forma generalmente adoptada es cuadrangular, esto no es un requisito y la plataforma puede tener varias subdivisiones.

El diseño se realiza mediante un análisis de esfuerzos, viento y flotabilidad en un software de elementos finitos. Los materiales más comunes utilizados son HDPE, acero inoxidable para soportar los paneles y espuma de poliuretano para aumentar la flotabilidad. Estos materiales pueden ser reciclables.

6.5.4.3. Sistema de soporte en tierra

La estructura de soporte del campo de paneles fotovoltaicos es un componente auxiliar esencial que desempeña tres funciones principales. En primer lugar, actúa como un marco que proporciona rigidez al conjunto de módulos FV, adaptando su geometría y disposición. En segundo lugar, orienta los módulos hacia una inclinación y orientación adecuadas según la ubicación geográfica y el tipo de aplicación. Por último, sirve como un elemento intermedio para conectar los módulos FV con el suelo o con otros elementos constructivos, como paredes o techos.

Se utilizan estructuras soporte de hierro, aluminio, acero inoxidable o madera para montar los módulos fotovoltaicos, las cuales deben proteger al generador de los fenómenos atmosféricos como el viento.

6.5.4.4. Anclaje

El anclaje es un componente esencial en los sistemas fotovoltaicos flotantes, ya que es responsable de garantizar la estabilidad de la estructura de soporte y los flotadores en el agua. Es crucial que el sistema de anclaje sea lo suficientemente robusto para soportar no solo la estructura que soporta los paneles, sino también a los paneles solares en sí y los demás componentes del sistema, y esté diseñado para resistir las condiciones climáticas y las corrientes de agua.

6.6. Factores de pérdidas energéticas

El rendimiento de un sistema fotovoltaico puede verse afectado por diversos factores. Esta baja del rendimiento esperado, también denominado pérdidas, pueden incluir variaciones en la potencia nominal, conexiones

deficientes, polvo y suciedad, cambios en la dirección y longitud de la radiación solar, resistencia de los cables, cambios en la temperatura, sombras y pérdidas de conversión del inversor.

6.7. Dimensionamiento de los sistemas de generación fotovoltaicos

Es fundamental dimensionar correctamente los principales componentes de un sistema fotovoltaico en especial si este se conectará a una red eléctrica externa. Los componentes que integran el sistema de generación fotovoltaico son los paneles solares, los inversores, los conductores y los dispositivos de protección, tal como se ha mencionado anteriormente.

6.7.1. Cálculo de la potencia a instalar

De acuerdo con lo expresado por Mogollón (2022), “el sistema de generación fotovoltaico se compone de un grupo de paneles interconectados en serie y en paralelo que transforman la energía solar en energía eléctrica” (p.54), también indica que:

Es fundamental que un sistema de generación fotovoltaico esté sobredimensionado para garantizar el rendimiento óptimo y producir la energía necesaria. Por lo general, un sistema de este tipo produce menos energía de la que está diseñada debido a diversos factores, entre ellos podemos encontrar diferencias entre la temperatura de diseño y la de operación de los paneles, suciedad, pérdidas por sombras, inclinación fuera de rango, y la caída de tensión en los conductores de corriente continua. El sobredimensionamiento del sistema es crucial para

compensar estas pérdidas y producir la potencia necesaria para el sistema y se estima en aproximadamente un 11.5%. (p.54)

6.7.2. Cantidad máxima de paneles por ramal

Un inversor puede manejar una tensión máxima, la cual se obtiene con el voltaje de circuito abierto del sistema de generación fotovoltaico y cuando los paneles están en su temperatura más baja. Para obtener esta temperatura mínima, se debe tomar en cuenta una radiación solar mínima y la temperatura ambiente más baja de la zona, que por lo general ocurre durante el invierno. Esta temperatura se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$T_{panel} = T_{ambiente} + \frac{(TONC - 20)}{800} * E$$

Dónde:

- T_{panel} : temperatura de la célula obtenida en condiciones de temperatura ambiente.
- $T_{ambiente}$: temperatura nominal del área donde será instalado el sistema.
- $TONC$: temperatura nominal que alcanza la célula del panel, y que por definición se establece como la temperatura que alcanzan las células de los paneles al ser expuestas a las siguientes condiciones:
 - Irradiancia: 800 W/m²
 - Distribución espectral AM1,5G
 - Temperatura ambiente: 20 °C

- Velocidad del viento: 1m/s
- E: irradiancia media, varía según el periodo en que se encuentre

6.7.2.1. Tensión de circuito abierto -Vco-

Se realizará la medición de la Vco de cada panel mientras están operando con las condiciones de temperatura de la célula diferentes a 25 °C. Por lo que, se usará el coeficiente de temperatura correspondiente a Vco, el cual es un dato indicado por el fabricante, en la ecuación siguiente:

$$V_{co} = V_{co}(25^{\circ}C) + \beta * (T_{panel} - 25^{\circ}C)$$

Dónde:

- Vco: tensión de circuito abierto en el panel con una temperatura especificada.
- Vco (25°): tensión de circuito abierto en el panel al encontrarse en condiciones estándar de medición.
- β : coeficiente de temperatura (indicado por el fabricante).

6.7.2.2. Corriente de corto circuito -Isc-

Para la corriente Isc se realiza la medición en cada panel (en su salida), cuando estos se encuentran operando a temperaturas de celda diferentes a las nominales (25 °C). Para estimar la variación de esta corriente de corto circuito dependiente de la temperatura, se emplea el coeficiente de temperatura correspondiente a Isc (proporcionado por el fabricante, como se describe a continuación:

$$Isc = Isc (25^{\circ}C) + \alpha * (T_{panel} - 25^{\circ}C)$$

Donde:

- Isc: corriente de corto circuito de un panel a una temperatura específica
- Isc (25°): corriente de corto circuito en un panel en condiciones estándar
- α : coeficiente de temperatura de la corriente de corto circuito (dado por el fabricante). $\alpha = 0,05 \%$.

Para calcular el máximo número de paneles colocados en serie en cada ramal se realizará de la siguiente manera:

$$N_{max} = \frac{U_{max} MPP}{V_{co} a T_{mín}}$$

Dónde:

- Umax: es la máxima tensión obtenida en la entrada (sugerida por el fabricante).
- Vco: tensión de circuito abierto, con temperatura mínima,
- Nmax: es el número máximo de paneles conectados en serie en cada ramal.

6.7.2.3. Número de ramales en paralelo

Para estimar la cantidad de derivaciones necesarios, se toma la potencia pico del sistema de generación de un subcampo y se divide entre la potencia pico de un solo modulo.

$$N_{\text{paneles por ramal}} = \frac{P_{\text{pico del generador FV (subcampo)}}}{P_{\text{pico de un panel}}}$$

Y el número total de ramales del sistema queda como:

$$N_{\text{ramales}} = \frac{N_{\text{paneles}}}{N_{\text{paneles por ramal}}}$$

Para determinar el número de ramales que se podrán conectar en paralelo, es necesario cumplir de que la corriente máxima de cortocircuito de un ramal, dividida por la cantidad de ramales en paralelo, sea menor que la máxima corriente de entrada del inversor.

$$N_{\text{ramales}} * I_{\text{sc max}} \leq I_{\text{entrada max}}$$

Dónde:

- $I_{\text{sc máx}}$: corriente máxima de corto circuito de un panel fotovoltaico a la temperatura máxima.
- $I_{\text{entrada max}}$: corriente máxima de entrada permitida por el inversor.

6.7.3. Selección de los inversores

El inversor realiza la transferencia de energía desde una fuente de corriente continua a una fuente de corriente alterna, transformándola por medio de un diseño construido a partir de componentes electrónicos, denominados de potencia. Dos situaciones diferentes se pueden presentar con el uso de los inversores, dependiendo del uso o conexión que se haga de la corriente alterna de salida. En la primera situación, el sistema es autónomo y el inversor es responsable de la red eléctrica, suministrando energía a un grupo de cargas. En la segunda situación, el inversor se encuentra conectado a una red eléctrica pública, enviando la energía generada por el sistema a dicha red.

De acuerdo con Alonso et al. (2013):

Los principales parámetros de dimensionamiento del inversor son:

- Potencia máxima. Se define el factor de dimensión como:

$$F_{DI} = \frac{P_{MAX}}{P_G}$$

Debe ser mayor en climas más soleados, y menor en zonas de altas latitudes. Se busca que el inversor funcione en su zona de alta eficiencia, que se corresponde con las potencias altas.

- Eficiencia de conversión. Debe ser alta incluso a bajos valores de potencia.

- Compatibilidad eléctrica con el generador. El rango de tensiones de entrada debe estar entre las mínimas producidas (p.ej. durante una bajada repentina de la irradiancia estando el generador a alta temperatura) y máximas (valores altos de irradiancia y bajos de temperatura, p.ej. tras el amanecer en días fríos). Debe admitir las corrientes producidas durante picos de irradiancia, p.ej. durante el paso de nubes de transición, que pueden llegar a 1250 W/m^2 .
- Arranque y sobrecarga. Deben arrancar cuando el sistema fotovoltaico genere una potencia superior a las pérdidas de conversión. Ante las sobrecargas, debe ser capaz de desplazar la tensión de trabajo desde V_{mpp} hasta V_{co} , para bajar la potencia generada.
- Compatibilidad electromagnética y otras características. Bajo contenido en armónicos, resistencia a las alteraciones producidas en la red, baja emisión de radiofrecuencias y protección ante el funcionamiento en isla (inyección de potencia en condiciones de fallo de red). (p. 70)

Existe tres tipos de inversores según Perpiñán (2013), el primero es el inversor central, que se encuentra dedicado a todo el generador; el segundo es el inversor orientado a rama (string-inverter), que, como su nombre lo indica, está

dedicado a una sola rama del generador; y por último el Módulo-AC, un inversor dedicado a un módulo del generador.

6.7.3.1. Potencia pico de las instalaciones

Una de las tareas que realiza el sistema de control de un inversor conectado a la red es encontrar y seguir el Punto de Máxima Potencia (MPP), del generador. Dado que la ubicación exacta de este punto no es conocida de antemano, se utiliza un algoritmo de búsqueda para localizarlo. Es importante considerar que la posición del MPP varía con el tiempo debido a las condiciones de radiación y temperatura.

En general, el sistema de control recopila información sobre el rendimiento del sistema, como la tensión y la corriente en la salida del convertidor DC/DC, y utiliza un algoritmo específico para modificar el punto de máximo de operación, por ejemplo, ajustando la tensión de entrada del convertidor DC/DC mediante cambios en el patrón de conmutación del transistor.

6.7.4. Conductores

El cableado es el conjunto de elementos encargados de transportar o conducir la energía eléctrica, siendo el cobre el material más comúnmente utilizado debido a su excelente conductividad. También pueden fabricarse con aluminio, que, aunque su conductividad es menor, es más ligero y económico. Un cable está constituido por de varios componentes, el primero de ellos, el conductor, el cual es el encargado de transportar la corriente eléctrica y que puede estar construido por uno hilo o varios de ellos.

El siguiente componente es el aislamiento cuya función es cubrir al conductor para que la corriente eléctrica transite solamente por el conductor. La capa de relleno es un material también aislante que mantiene a los conductores en la forma circular de diseño. Por último, la cubierta está fabricada con materiales que provee protección mecánica al cable, y aislamiento de factores ambientales como la temperatura, el sol y la lluvia.

6.7.4.1. Conductores de corriente continua

Se recomienda el uso de conductores de cobre para instalaciones fotovoltaicas de baja tensión. Estos cables por ser de corriente continua y se diseñarán de forma unipolar bajo las condiciones más extremas para garantizar que la instalación sea segura.

Para el diseño de los cables, existen tres criterios:

- Criterio de máxima corriente admisible
- Caída de tensión
- Corriente de cortocircuito

El criterio más desfavorable determinará el diseño final del cable. El criterio de máxima corriente admisible representa el límite máximo de intensidad que puede circular por el conductor, considerando factores como la temperatura, resistividad del terreno, profundidad y agrupación.

Al considerar la caída de tensión como criterio de diseño de los conductores, se basan en las pérdidas producidas, debido a la corriente que transita por el cableado y su resistencia intrínseca. Estas pérdidas se evidencian en caídas de tensión, que deben ser contrarrestadas, en tal sentido, se han

establecido límites que no deben superarse. En tal sentido, la norma establece un límite máximo del 1,5 % para caída de tensión.

El criterio de corriente de cortocircuito implica calcular la corriente máxima de cortocircuito que el cable puede soportar durante un período de tiempo específico. En este caso, el cable debe ser capaz de resistir las altas temperaturas que se generan en esta situación.

6.7.4.2. Conductores de corriente alterna

Para el cálculo del tamaño de los conductores de media tensión, es necesario que se cumplan con los mismos tres criterios mencionados previamente para los conductores de baja tensión.

6.7.5. Protecciones eléctricas

Cuando considera conectar el sistema de generación fotovoltaico a la red eléctrica, es imperante considerar la seguridad de todo el personal involucrado en el proyecto tanto operarios, como los usuarios finales de esa energía, y, que, en funcionamiento normal, el sistema fotovoltaico no afecte negativamente a los componentes conectados a dicha red u otros equipos. Es por ello, que la implementación de unas protecciones adecuadas resulta necesaria en el sistema de generación para una operación correcta.

6.7.5.1. Protección contra sobre corrientes

Para proteger los circuitos de las sobre corrientes y sus efectos, es necesario interrumpir el circuito en un tiempo adecuado por lo que hay que dimensionar para las sobre corrientes previsibles. Hay dos tipos de protección:

- **Contra sobrecargas**
 - La protección contra sobrecargas se obtiene mediante un módulo de protección, que puede ser un interruptor automático con respuesta de una curva térmica de corte o mediante fusibles debidamente calibrados.

- **Contra cortocircuitos**
 - Para la protección contra cortocircuitos se implementan de la misma manera fusibles calibrados o interruptores automáticos capacitados para operación con sistemas de corte omnipolar.

6.7.5.2. Protecciones contra sobretensiones

Dentro del panel de protecciones, el segundo componente que se utiliza para la protección es el varistor, que actúa como un dispositivo de protección contra las sobretensiones provocadas por descargas atmosféricas. Se instalará un varistor en cada panel de protección con una capacidad de corte adecuada para garantizar la seguridad.

6.7.5.3. Protecciones de media o alta tensión

Las protecciones de media tensión, se dimensionan en el cuarto de control de la subestación de potencia de acuerdo con los parámetros específicos de la instalación. Las variables principales para considerar incluyen la potencia de corte, que debe estar relacionada con la corriente de cortocircuito máxima, la máxima corriente de la línea de media o alta tensión según sea el caso y el voltaje de diseño.

En muchas instalaciones fotovoltaicas, se busca optimizar el diseño de la inclinación para conseguir los valores más altos de producción durante los meses con menor radiación solar y, en general, maximizar la producción anual de energía. Para esto, en ocasiones se utilizan estructuras con varias posiciones de inclinación que permiten al usuario ajustar la orientación según la estación. La ubicación de los paneles dependerá del número de módulos, el espacio disponible y la integración con elementos preexistentes.

En instalaciones de mayor tamaño, que constan de varios grupos de paneles, es necesario un soporte robusto y bien cimentado. Es importante evitar que una fila de paneles proyecte sombra sobre la siguiente, especialmente en las primeras y últimas horas del día, tomando en consideración las diferentes trayectorias del sol durante el año.

7. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Energía renovable

1.1.1. Energía solar fotovoltaica

1.1.2. Energía hidroeléctrica

1.1.2.1. Embalse de la hidroeléctrica

1.2. Sistemas de generación fotovoltaicos

1.2.1. Componentes de un sistema fotovoltaico

1.2.2. Instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red

1.3. Sistemas de generación fotovoltaica flotantes

1.3.1. Características principales

1.3.2. Avances de la tecnología a nivel global

1.4. Dimensionamiento de los sistemas de generación fotovoltaicos

1.4.1. Parámetros de diseño

2. LIMITES PARA LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN

2.1. Irradiación solar

- 2.2. Espejo máximo y mínimo de agua del embalse
 - 2.3. Sistema eléctrico existente
3. CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO
- 3.1. Paneles solares
 - 3.1.1. Selección de tipo de paneles
 - 3.1.2. Configuración del sistema de generación
 - 3.1.2.1. Paneles en serie
 - 3.1.2.2. Paneles en paralelo
 - 3.2. Inversores
 - 3.2.1. Potencia pico de las instalaciones MPPT
 - 3.2.2. Cálculo del inversor
 - 3.2.3. Selección de los inversores
 - 3.3. Conductores
 - 3.3.1. Intensidad de corriente
 - 3.3.2. Caída de tensión
 - 3.3.3. Conductores de corriente continua
 - 3.3.4. Conductores de corriente alterna
 - 3.4. Protecciones
 - 3.4.1. Protecciones de corriente continua
 - 3.4.2. Protecciones de corriente alterna
 - 3.5. Puesta a tierra
4. DISEÑO DEL SISTEMA DE SOPORTE
- 4.1. Diseño de un sistema de flotación
 - 4.1.1. Flotadores
 - 4.1.2. Sistema de anclaje y amarres
 - 4.2. Diseño de un sistema de soporte terrestre

4.2.1. Estructura fija

5. INVESTIGACIÓN Y RECOPIACION DE PRECIOS DE MERCADO

5.1. Análisis de fabricantes del sector

5.1.1. Recopilación de principales compañías

5.2. Compilación de precios

6. ANALISIS TECNICO Y ECONOMICO

6.1. Análisis Económicos

6.1.1. Valor Presente Neto

6.1.2. Tasa Interna de Retorno

6.2. Evaluación de un sistema flotante y una terrestre

6.3. Beneficios Ambientales

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

8. METODOLOGIA

8.1. Diseño y tipo de investigación

El presente estudio se considera de tipo cuantitativo, dado que se pretende plantear el diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaica, instalando los paneles solares sobre un cuerpo de agua mediante un sistema de flotación, en este caso en un embalse de regulación de una hidroeléctrica,

La investigación también será de carácter descriptivo pues busca evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema de generación planteado, y como este, puede aportar a la estabilidad en la generación de la hidroeléctrica, en condiciones de escases de agua.

8.2. Fases del estudio

La investigación se desarrollará en diferentes fases, estas se describen a continuación:

8.2.1. Fase 1. Exploración bibliográfica

La primera fase contempla una consulta de artículos y publicaciones científicas que detallen y brinden el contexto necesario para diseños de sistemas de generación fotovoltaicos tanto terrestres como flotantes, y los diferentes enfoques desde los que hayan sido analizados tanto factor técnico, económico, ambiental, legal, entre otros.

La obtención y análisis de las diferentes fuentes, forma parte del proceso para ampliar la visión del estudio que coadyuve a determinar las variables adecuadas a fin de optimizar el diseño del generador para el ambiente en el que se pretende ubicar.

8.2.2. Fase 2. Determinación de los límites de la capacidad de generación

Se pretende estimar tanto los parámetros energéticos, y establecer los valores límites (máximos y mínimos), dentro de los cuales se podrán obtener los resultados deseados de la generación solar. Estos límites, por ejemplo, serán el espejo máximo de agua, con el embalse lleno, el espejo mínimo de agua con el embalse en su nivel mínimo, la potencia máxima de la subestación donde se inyectará la energía generada, la radiación solar del lugar, y demás variables que se identifiquen en la fase previa (prefactibilidad).

8.2.3. Fase 3. Diseño técnico del sistema de generación fotovoltaico

En lo que a cálculos respecta, en esta fase se realizará, considerando los resultados de la fase 2, el diseño del sistema de generación fotovoltaico y todos los componentes electrógenos que se requieran en el proceso de generación conversión y transporte de electricidad. Se considerarán varios diseños ya sea del tipo de panel, así como su inclinación, buscando el resultado óptimo en cuanto a eficiencia de los paneles solares.

8.2.4. Fase 4. Diseño técnico de sistema soporte

La fase 4 se dividirá en 2 secciones, según se describen a continuación:

8.2.4.1. Fase 4.1. Diseño técnico del sistema de flotación

Se realizará el diseño del sistema de flotes que soporten todas las camas del sistema de generación fotovoltaico sobre el agua, considerando aspectos como espacio para desplazamiento y mantenimiento de los paneles, ubicación de los conductores, anclas, entre otros.

8.2.4.2. Fase 4.2. Diseño técnico del sistema de soporte en tierra

Esta fase considera el diseño de las estructuras que soportan las camas de paneles solares en tierra (el mismo diseño de paneles solares calculado en la fase 3), con el objetivo de tener un punto de referencia, para el análisis económico del sistema fotovoltaico flotante.

8.2.5. Fase 5. Investigación y recopilación de valores de mercado

Esta fase, considera la recolección de información y precios de todos los componentes que intervienen en el sistema de generación fotovoltaico, incluyendo los costos del sistema de soporte acuático y terrestre, precios de transporte, importación, entre otros, insumos indispensables para la evaluación técnico-económica del diseño planteado en el presente estudio.

8.2.6. Fase 6. Análisis técnico-económico

En esta fase se evaluará la viabilidad técnica y financiera del sistema de generación planteado, considerando la funcionalidad, inversión, proyecciones de

generación, mantenimiento, infraestructura ya existente, inclusive los beneficios ambientales observables.

8.2.7. Fase 7. Presentación y discusión de resultados

Para esta última fase, se presentarán los resultados obtenidos con el fin de dar conclusiones de cada uno de los análisis y observaciones realizados en el estudio.

9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Durante el desarrollo de las diferentes fases del estudio se hará uso de varias herramientas y técnicas para el análisis de la información:

9.1. Recolección de información

La información cuantitativa se recopilará a partir de revisión de documentos públicos, verificación de sistemas geográficos, investigación en páginas web, comprobación de hojas de datos técnicos y se recolectará en tablas que agrupen y documenten los diferentes tipos de datos que se necesitarán para el diseño del sistema de generación fotovoltaico:

- Tabla para datos espaciales
- Tabla para datos eléctricos
- Tabla para datos energéticos
- Tabla para datos temporales (cronológicos)
- Tabla para datos económicos

9.2. Descripción y exploración de datos

En el proceso de análisis y descripción de los datos calculados se utilizarán gráficas de barras, de líneas, combinados, para evaluar las proyecciones de generación, las comparaciones y evolución de precios

Se utilizará el análisis del valor presente neto -VPN- y tasa interna de retorno -TIR- para proyectar los valores del retorno de la inversión.

9.3. Herramientas de cálculo

En lo que a herramientas de cálculo respecta se hará uso de software online como el Global Solar Atlas o el PVGIS para determinar el recurso solar con el que se cuenta en el área donde se ubica el embalse de la hidroeléctrica.

Softwares comerciales como el PVSyst para calcular el diseño del sistema de generación fotovoltaico y se hará uso de hoja de cálculo de Microsoft Excel para realizar los análisis económicos y proyecciones que se llevarán a cabo. También se utilizarán programas de georreferencia como el Google Earth o QGis para verificar las áreas del embalse o distancias entre ubicaciones.

11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO Y RECURSOS NECESARIOS

Se presenta el detalle de los recursos previstos para la realización de la presente investigación. Con este presupuesto se procederá a evaluar la factibilidad que tiene la ejecución del estudio.

Tabla 1.

Presupuesto de la investigación

Recursos	Observación	Costo unitario	Costo total
Equipos, materiales e insumos			
Impresiones, insumos de oficina		Q 75.00	Q 450.00
Energía e Internet		Q 158.33	Q 950.00
Computadora	Propia		Q -
Humano			
Investigador: Melzar Ismael de León Moro			
Asesor: M.A. Ing. Daniel Ángel Figueroa		Q 2,500.00	Q 2,500.00
Técnicos			
Software			
Office 365 (Excel, Word, Power Point)		Q 47.00	Q 276.00
PVSyst (Licencia)		Q 310.00	Q 310.00
Google Earth	software libre	Q -	Q -
PVGis	software libre	Q -	Q -
Global Solar Atlas	software libre	Q -	Q -
Qgis (open source)	software libre	Q -	Q -
Otros			
Visita de campo			
Viáticos y transporte		Q445.00	Q890.00
TOTAL			Q 5,376.00

Nota. Presupuesto de la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Al observar el monto proyectado de los gastos, mismos que se distribuyen en montos mensuales, se considera que el estudio es factible de ejecutar, los cuales serán absorbidos por el estudiante.

REFERENCIAS

- Abella, M. (2014). *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos*. [Tesis de maestría, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas]. Archivo digital. <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45301.pdf>
- Alonso, M., García, F., & Silva, J. (2013). *Energía solar fotovoltaica*. ONUDI.
- Becerra, F. (2018). *Diseño de una central fotovoltaica de 50 MW conectada a red en la provincia de Badajoz*. [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. Archivo digital. <https://idus.us.es/handle/11441/85994>
- Carricajo, R. (2021). *Proyecto de planta fotovoltaica flotante de 10 MWp en el embalse de Alange (provincia de Badajoz)*. [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. Archivo digital. <https://hdl.handle.net/11441/128796>
- Chavarría, J. (2010). *Diseño e Implementación de un Inversor Multinivel para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña]. Archivo digital. <http://hdl.handle.net/2099.1/9787>
- Cruz, A. (2021). *Instalación fotovoltaica flotante de autoconsumo con excedentes, no acogida a compensación: Diseño y legalización*. [Tesis de maestría, Universidad de Jaén]. Archivo digital. <https://hdl.handle.net/10953.1/16515>

- González, A. (2020). *Diseño y análisis de central fotovoltaica de 100 MW interconectada al SEP*. [Tesis de maestría, Universidad de Puebla]. Archivo digital. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/17025>
- Lagos, J. (2021). *Análisis Técnico, Económico y Medioambiental sobre Plantas Fotovoltaicas Flotantes y su Potencial Implementación*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital. <https://oa.upm.es/71460/>
- Martínez, A. (2021). *Instalación y explotación de una planta fotovoltaica flotante en el embalse de José María Oriol-Alcántara II vía ampliación de concesión demanial*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo digital. <https://oa.upm.es/67668/>
- Menéndez, A. (2018). *Diseño de una instalación fotovoltaica flotante para balsas de regadío*. [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. Archivo digital. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/71306/>
- Mogollón, A. (2022). *Implementación de hibridación múltiple PV+CSP+CCGT en una central termosolar*. [Tesis de Maestría, Universidad del País Vasco]. Archivo digital. <http://hdl.handle.net/10810/59766>
- Niño, D., & Rodríguez, J. (2021). *Incorporación de plantas fotovoltaicas flotantes en el embalse de la Hidroeléctrica de Urrá para el aprovechamiento areal y de infraestructura eléctrica*. [Tesis de especialización, Universidad de América]. Archivo digital. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8762>
- Perpiñán, O. (2013). *Energía solar fotovoltaica*. Creative Commons. <https://www.researchgate.net/publication/249012821>

Puebla, M. (2022). *Estudio técnico-económico de una instalación solar fotovoltaica flotante y su comparativa con una instalación fotovoltaica tradicional*. [Tesis de maestría, Universidad de Valladolid]. Archivo digital. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/56843>

Sánchez, G. (2021). *Diseño de una planta solar fotovoltaica de gran potencia*. [Tesis de maestría, Universidad Pontificia Comillas]. Archivo digital. <http://hdl.handle.net/11531/47069>

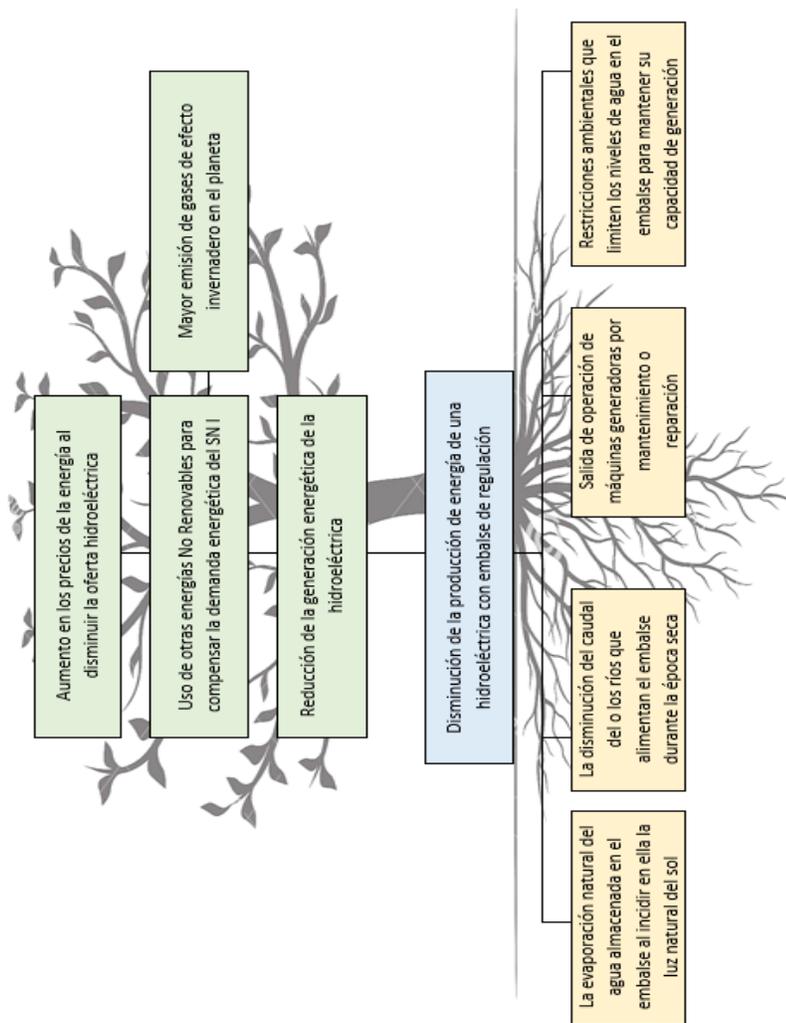
Vega-Carranza, K., Piedra-Segura, J., & Richmond-Navarro, G. (2019). Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos mediante una interfaz gráfica. *Tecnología en Marcha* 32(3), 66-78. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i3.4480>

World Bank Group. (2023). Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info/map>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Árbol de problemas



Nota. Árbol de problemas relacionados a la investigación. Elaboración propia.

Apéndice 2.

Matriz de coherencia

Planteamiento del problema	Objetivos	Fases metodológicas
Pregunta general	Objetivo General	
¿Cuál es la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de generación fotovoltaica flotante que permita optimizar la generación en una central hidroeléctrica en Guatemala?	Analizar la viabilidad técnica y económica de un sistema de generación fotovoltaico flotante para la optimización en la generación de en una central hidroeléctrica en Guatemala	
Preguntas específicas	Objetivos Específicos	
1. ¿Cuál es la capacidad de generación fotovoltaica que puede ser instalada en el embalse de regulación de la hidroeléctrica?	1. Estimar la capacidad de generación fotovoltaica que puede ser instalada en el embalse de regulación de la hidroeléctrica	Fase 1: Exploración bibliográfica Fase 2: Determinación de los límites de la capacidad de generación
2. ¿Cuál es el diseño técnico del sistema de generación fotovoltaica flotante a instalar?	2. Diseñar el sistema de generación fotovoltaico a instalar con base en la capacidad de generación estimada.	Fase 3: Diseño técnico del sistema de generación fotovoltaico Fase 4: Diseño técnico de sistema soporte Fase 4.1: Diseño técnico del sistema de flotación Fase 4.2 Diseño técnico del sistema de soporte en tierra
3. ¿Cuál es el balance económico del sistema fotovoltaico flotante en comparación con un sistema fotovoltaico convencional?	3. Analizar la viabilidad económica de implementar un sistema de generación fotovoltaico flotante en comparación con un sistema convencional	Fase 5: Investigación y recopilación de valores de mercado Fase 6: Análisis técnico económico Fase 7: Presentación y discusión de resultados

Nota. Matriz de coherencia del estudio. Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1.

Curriculum vitae del asesor

	Formación académica
	<p>Ingeniero Mecánico Electricista, Colegiado Activo 13,087</p> <p>2016-2017 Maestría en Negocios Energéticos Universidad Galileo</p> <p>2015-2016 Maestría de Ingeniería del Mantenimiento Universidad de San Carlos de Guatemala</p> <p>06/2016 Especialización en Mantenimiento Universidad de San Carlos de Guatemala USAC</p> <p>2005-2011 Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad de San Carlos de Guatemala USAC</p> <p>2005-2006 Escuela de idiomas y lenguas de la Universidad de San Carlos de Guatemala</p> <p>2002-2004 Bachiller Industrial y Perito en Computación. Instituto Tecnológico K'iche, Chichicastenango, El Quiché.</p> <p>1999-2001 Estudios de nivel Básico Instituto de Educación Básica con orientación Experimental Francisco Méndez Escobar, Joyabaj, Quiché.</p> <p>1993-1998 Estudios de Pre-primaria y Primaria Escuela Oficial Urbana Mixta Zacualpa, El Quiché.</p>
	Experiencia Laboral
	<p>10/2022- A la fecha Jefe Planta Hidroeléctrica Chixoy Realizando funciones de Jefatura de Planta</p> <p>01/2019-09-2022 Subjefe Planta Hidroeléctrica Chixoy Encargado de la Operación y Mantenimiento de la Planta Hidroeléctrica</p> <p>10/2019 Jefe Interino 11/2020 Planta Hidroeléctrica Chixoy 11/2021 01/2022 Realizando funciones de Jefatura de Planta</p> <p>11/2018 Jefe de Planta 01/2019 Sistema Hidroeléctrico Jurún Marinalá- Michatoyas Realizando funciones de Jefatura de Planta</p> <p>07/2017-10/2018 Subjefe Planta Hidroeléctrica Aguacapa Encargado de la Operación y Mantenimiento de la Planta Hidroeléctrica</p>

Continuación del anexo 1.

12/2015	Jefe Interino
01/2016	Planta Hidroeléctrica Aguacapa
06/2016	Realizando funciones de Jefatura de Planta
12/2017	
06/2018	
10/2018	
02/2013-	Supervisor de Mantenimiento
06/2017	Jefe de Sección II
	Planta Hidroeléctrica Aguacapa
	INDE- EGEE
	Realización de actividades de Supervisor de turno, programación, ejecución y realización de mantenimientos preventivos y correctivos, supervisión, diseño y cálculos de proyectos y términos de referencia, montaje y puesta en servicio de equipos
09/2012-	Asesor de Proyectos
01/2013	OHM
	Organización Eléctrica de Guatemala OEG.S.A.
	Enfocado en Motores Eléctricos, Diseños de media, Alta Tensión, CCM, Diseños Eléctricos, Mantenimientos S/E, etc.
11/2011-	Encargado de producción
06/2012	Transportes de Material y Equipos Figueroa & García
9/2010-	Prácticas Finales de Ingeniería
11/2010	EGEE Instituto Nacional de Electrificación INDE
	Planta Hidroeléctrica Jurún Marinalá.
	Aldea Agua Blanca, Escuintla.
	Enfocadas Principalmente en Motores Eléctricos, Diseños de Media Tensión, Revisión y Mantenimiento de S/E
	Practica Final.
09/2016 -	Catedrático Universidad Galileo
09-2022	en Instituto de Recursos Energéticos IRE
	En Técnico de Centrales Hidroeléctricas y
	Postgrados en Sostenibilidad, Ambiente y Energía Renovable
	Postgrado en Hidroenergía
01/2021 -	Catedrático Universidad de San Carlos de Guatemala
04-2022	Facultad de Ingeniería Campus Central
	Maestría en Ingeniería del Mantenimiento

Continuación del anexo 1.

Aplicaciones Personales	
04-2018	Certificación NFPA 70E Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo Ciudad de México
12-2017	Certificación NFPA 850 Práctica Recomendada para protección contra incendios para plantas de Generación Eléctrica y estaciones Transformadoras Ciudad de México
11-2014	Certificación NFPA 1600 Norma sobre Administración de Emergencias/desastres y programas para la continuidad del negocio Curso Impartido por FIRE TEST, representantes de National Fire Protection Association Ciudad de Guatemala
05/2014 (34 horas)	Taller para la Formación de Auditores Internos de Calidad ISO
02/2014 (24 horas)	Curso Formador de Formadores y Técnicas de Comunicación INDE, ciudad de Guatemala
02/2014 (24 horas)	Analista RCMII Curso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad Ciudad de México, México
11/2013	Certificado Termografía Nivel I
08/2013	Curso Planes de emergencia y Contingencia. Guayaquil, Ecuador.
04/2013- 07/2013	Diplomado de Seguridad e Higiene Industrial INTECAP, Guatemala
06/2013	Curso Vigilancia y seguridad de Presas. Impartido por CNEE, ciudad de Guatemala
12/2012	Curso PLC, Producción y Automatización Industrial, Intecap, Guatemala.
2010	Curso PLC KGWL, LABVIEW, Intecap Guatemala.
2007	Organizador de Congreso de Estudiantes de Ingeniería Mecánica Eléctrica. EME2007.
2003- 2004	Intelaf S. A. Pre-práctica y Practica Departamento de reparación y Programación de Pc's.

Nota. Currículum vitae del asesor de la investigación. Obtenido de D. Figueroa (2016). *Jefe de Planta Hidroeléctrica Chixoy.*

Anexo 2.

Carta de aprobación de protocolo del asesor

Guatemala, 07 de abril 2023

**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 del estudiante MELZAR ISMAEL DE LEÓN MORO, carné número 999008724, he procedido a la revisión del protocolo cuyo título es "DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO FLOTANTE EN EL EMBALSE DE REGULACIÓN DE UNA HIDROELÉCTRICA EN GUATEMALA", para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,


DANIEL ANGEL FIGUEROA GARCÍA
Mtro. En Ingeniería del Mantenimiento
Ing. Mecánico Electricista
Colegiado Activo 13,087
Asesor



Nota. Carta para dar la aprobación de protocolo. Obtenido de D. Figueroa (2023). *Jefe de Planta Hidroeléctrica Chixoy.*