



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA CUANTIFICAR LOS BENEFICIOS
MEDIOAMBIENTALES Y ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA
RENOVABLE MEDIANTE EL USO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL
DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

Jorge Mario Santa Cruz Sagastume

Asesorado por el MA. Ing. Axel Ernesto Siguí Gil

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA CUANTIFICAR LOS BENEFICIOS
MEDIOAMBIENTALES Y ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA
RENOVABLE MEDIANTE EL USO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL
DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE MARIO SANTA CRUZ SAGASTUME

ASESORADO POR EL MA. ING. AXEL ERNESTO SIGUÍ GIL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

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 Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
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 PARA CUANTIFICAR LOS BENEFICIOS
MEDIOAMBIENTALES Y ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA
RENOVABLE MEDIANTE EL USO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL
DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 14 de agosto de 2021.

Jorge Mario Santa Cruz Sagastume



EEPFI-PP-0017-2022
Guatemala, 12 de enero de 2022

Director
Williams G. Álvarez Mejía
Escuela De Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez

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: **BENEFICIOS MEDIOAMBIENTALES Y ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE MEDIANTE EL USO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Energía Aplicada - Energía Renovable y No Renovable - Fuentes de energía no fósil**, presentado por el estudiante **Jorge Mario Santa Cruz Sagastume** carné número **200611158**, 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"

Axel Ernesto Sigüí Gil
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 14867

Mtro. Axel Ernesto Sigüí Gil
Asesor(a)



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

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





EEP.EIQ.0017.2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Quimica 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: **BENEFICIOS MEDIOAMBIENTALES Y ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE MEDIANTE EL USO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Jorge Mario Santa Cruz Sagastume**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Williams G. Álvarez Mejía
Director
Escuela De Ingenieria Quimica

Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.325.2022

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 Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA CUANTIFICAR LOS BENEFICIOS MEDIOAMBIENTALES Y ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE MEDIANTE EL USO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL DEPARTAMENTO DE GUATEMALA**, presentado por: **Jorge Mario Santa Cruz Sagastume**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la fuerza creadora, fuente de amor y paz en mi vida y orientarme para obtener este triunfo.
- Mis padres** Silvia Sagastume, mi mamá, que ahora es mi ángel, que desde el cielo me envía su amor y me cuida, este triunfo es tuyo, a mi padre Jorge Santa Cruz por sus consejos, enseñanzas y apoyo que siempre me ha brindado en toda mi vida, este triunfo también es tuyo.
- Mi esposa** Alejandra Morales, por todo su amor, apoyo, compañía, motivación y animarme en momentos claves.
- Mi hija** Ana Valeria Santa Cruz, por ser el motor que me motiva a ser mejor persona y dibujarme una sonrisa cada día.
- Mi hijo** Julián Alberto Santa Cruz, quien será una nueva luz en mi vida, te estoy esperando con ansias.
- Mis hermanas** Wendy y Vivian Santa Cruz por motivarme, acompañarme en la vida y ser ejemplo para mí en culminar esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la *alma mater* que permitió nutrirme de conocimientos.

Facultad de Ingeniería

Por proporcionarme los conocimientos que me permitieron realizar este trabajo de graduación.

Mis amigos

Por todas las aventuras, alegrías, esfuerzos en conjunto y acompañarme durante la carrera.

Mi asesor

Ing. Axel Siguí por todo el apoyo, su tiempo y dedicación para el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
3.1. Descripción del problema	11
3.2. Formulación del problema	12
3.2.1. Pregunta central	12
3.2.2. Preguntas auxiliares	13
3.3. Delimitación del problema	13
3.4. Causas y consecuencias	14
4. JUSTIFICACIÓN	15
5. OBJETIVOS	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos	17
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	19

7.	MARCO TEÓRICO	21
7.1.	Radiación solar	21
7.1.1.	Irradiancia e irradiación solar	21
7.1.1.1.	Radiación directa.....	22
7.1.1.2.	Radiación difusa.....	22
7.1.1.3.	Radiación del albedo o reflejada	22
7.2.	Paneles solares Fotovoltaicos (FV).....	23
7.2.1.	Funcionamiento de un panel solar FV	23
7.2.1.1.	Partes de un panel solar FV	25
7.2.2.	Principales tipos de paneles solares FV.....	26
7.2.2.1.	Paneles solares FV policristalinos.....	27
7.2.3.	Paneles solares FV monocristalinos	29
7.2.3.1.	Tipos de paneles FV en el mercado guatemalteco.....	30
7.2.3.1.1.	Jinko solar.....	31
7.2.3.1.2.	Q Cells	32
7.2.3.1.3.	LONGi solar	34
7.2.4.	Ciclo de vida de un panel solar FV.....	35
7.2.4.1.	Minería materia prima y procesamiento del material	37
7.2.4.2.	Fabricación, ensamblaje, transporte e instalación	38
7.2.4.3.	Operación, remoción y disposición final.....	39
7.3.	Sistemas para la generación de energía eléctrica fotovoltaica.....	39
7.3.1.	Sistema fotovoltaico conectado a la red de distribución	40

7.3.1.1.	Ventajas y desventajas de un sistema Fotovoltaico conectado a la red	41
7.3.2.	Sistema autónomo	42
7.3.2.1.	Ventajas y desventajas de un sistema fotovoltaico autónomo.....	45
7.3.3.	Consideraciones en la instalación de paneles solares en un sistema conectado a la red de distribución.....	45
7.3.4.	Pasos para convertirse en un usuario autoprodutor y generador distribuido renovable utilizando paneles solares fotovoltaicos.....	48
7.4.	Generación de energía eléctrica fotovoltaica a nivel mundial..	51
7.4.1.	Participación de la energía eléctrica fotovoltaica en la matriz energética mundial	51
7.4.2.	Energía eléctrica fotovoltaica en Guatemala	52
7.5.	Generación de CO ₂ en Guatemala debido a la producción de energía eléctrica	54
7.6.	Plan de expansión del sistema de generación de energía en Guatemala	55
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	57
9.	METODOLOGÍA.....	63
9.1.	Tipo de estudio	63
9.2.	Unidades de análisis	63
9.3.	Variables.....	64
9.4.	Fases del estudio	65
9.4.1.	Fase 1: Exploración bibliográfica	65

9.4.2.	Fase 2: Utilización del mapa interactivo Global Solar Atlas para el cálculo del potencial de generación eléctrica por metro cuadrado de panel solar fotovoltaico	66
9.4.3.	Cálculo de los kilogramos equivalentes de CO ₂ que se pueden reducir por metro cuadrado de panel solar fotovoltaico implementado	70
9.4.4.	Cuantificar cuál es el tiempo necesario de operación para la recuperación de los kilogramos de CO ₂ generados en el ciclo de vida de los mismos	72
9.4.5.	Fase 5: Beneficio económico.	73
9.4.5.1.	Elaboración de flujo de caja	73
9.4.5.2.	Cálculo del VAN y la TIR	75
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	77
11.	CRONOGRAMA	79
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	81
12.1.	Recurso humano	81
12.2.	Recursos financieros	82
	REFERENCIAS	85
	APÉNDICES	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tipos de radiación que forman parte de la irradiancia	22
2.	Funcionamiento de la celda FV	25
3.	Elementos de panel solar FV	26
4.	Utilización de celdas fotovoltaicas de tecnología c-Si a nivel mundial.....	27
5.	Oblea de silicio policristalino	28
6.	Proceso de purificación del cuarzo para la obtención de las obleas de silicio monocristalino	30
7.	Panel solar monocristalino Jinko solar modelo JKM450M-72HLM.....	31
8.	Panel solar monocristalino Q Cells modelo Q PEAK DUO L-G.....	33
9.	Panel solar monocristalino LONGi Solar modelo LR4-72HPH 450M ...	34
10.	Diferentes procesos tomados en cuenta para el ciclo de vida de un sistema fotovoltaico.....	36
11.	Consumos energéticos por kilogramo de material procesado en la producción de obleas de silicio desde el material cuarzo.....	37
12.	Consumos energéticos dentro de los procesos de fabricación, ensamblaje, transporte e instalación en paneles fabricados en China y transportados e instalados en Centroamérica.....	38
13.	Componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red	40
14.	Generación eléctrica diaria en Guatemala por tipo de recurso	42
15.	Esquema de un sistema fotovoltaico autónomo con cargas únicamente de corriente directa	43

16.	Esquema de un sistema fotovoltaico autónomo con cargas únicamente de corriente alterna	44
17.	Esquema de un sistema fotovoltaico autónomo con cargas de corriente directa y alterna	44
18.	Esquema de la orientación e inclinación necesaria para el mayor aprovechamiento de la radiación solar	47
19.	Flujo de conexión usuario autoprodutor con excedentes de energía .	49
20.	Matriz eléctrica mundial por año	52
21.	Composición de la generación eléctrica de Guatemala año 2020	53
22.	Emisión de GEI según consumo de energía.....	54
23.	Potencial y plantas solares en Guatemala.....	56
24.	Como demarcar un área en el mapa interactivo Global Solar Atlas	66
25.	Información dada por mapa interactivo Global Solar Atlas en cabecera municipal de ciudad de Guatemala.....	67
26.	Recursos necesarios para el desarrollo de la investigación	82

TABLAS

I.	Especificaciones de panel jinko solar monocristalino	32
II.	Especificaciones de panel Q Cells monocristalino.....	33
III.	Especificaciones de panel LONGi Solar LR4-72HPH 450M.....	35
IV.	Formulario para informar al distribuidor sobre instalaciones de generación de energía renovable para convertirse en autoprodutor autorizado	50
V.	Proyectos de generación solar fotovoltaica, en operación en Guatemala	53
VI.	Variables de estudio	64
VII.	Promedio irradiancia directa normal por mes	68
VIII.	Características del panel solar fotovoltaico a referenciar.....	69

IX.	Potencial de generación mensual de energía eléctrica según irradiancia directa normal por mes y especificaciones de panel solar	74
X.	Coefficientes de emisión de CO ₂ e de la generación eléctrica por tipo de combustible	75
XI.	Cálculo de factor de emisión por generación de energía eléctrica (Kg CO ₂ eq / kWh)	79
XII.	Cálculo de consumo eléctrico en una vivienda	74
XIII.	Tabla para elaborar flujo de caja	75
XIV.	Cronograma de actividades.....	79
XV.	Consumo de energía eléctrica.....	83
XVI.	Otros gastos relacionados a la Investigación.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
HCl	Ácido Clorhídrico
DM	Cantidad de Día por Mes
C2C	Ciclo de vida desde la minería del cuarzo hasta el descarte del panel solar fotovoltaico
C2G	Ciclo de vida desde la minería del cuarzo hasta el reciclaje de los componentes del panel solar fotovoltaico
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Directa
CO₂	Dióxido de Carbono
USD	Dólar Americano
EM	Eficiencia de Módulo de panel fotovoltaico
EVA	Etileno vinilo octato
FV	Fotovoltaico
GW	Giga vatios
°	Grado
°C	Grados Celsius
gCO₂	Gramos de dióxido de carbono
gCO₂-eq	Gramos de dióxido de carbono equivalentes
h	Horas
=	Igual que
kg	Kilogramo
kW	Kilovatio

kWp	Kilovatio de potencia
kWh	Kilovatio hora
KV	Kilovoltio
>	Mayor que
MW	Megavatio
MWh	Megavatio hora
m	Metro
m²	Metro cuadrado
mc-Si	Monocristalino de silicio
N	Norte
O	Oeste
pc-Si	Policristalino de silicio
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
S	Sur
HSiCl₃	Triclorosilano
W	Vatio
Wh	Vatio hora

GLOSARIO

AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
BTS	Tarifa de Baja Tensión Simple.
BTSA	Tarifa de Baja Tensión Simple Autoprodutores.
CAGR	(Compound Annual Growth Rate) tasa de crecimiento anual compuesta.
Ciclo de vida	Es la suma de todos los procesos que conlleva un producto desde la obtención de las materias primas, el proceso de elaboración del producto, utilización y descarte, incluyendo todo el transporte en cada uno de los procesos.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala.
Energía eléctrica	Energía debida a un flujo de electrones a través de un conductor debido a un diferencial de potencial.
EPBT	Tiempo de recuperación de energía, relación entre la energía consumida en el ciclo de vida y el tiempo necesario de operación para recuperarla.

GEI	Gases de Efecto Invernadero.
GEPM	Potencial de Generación Eléctrica Promedio Mensual por metro cuadrado.
IDNH	Irradiancia Directa Normal por Hora.
NTGDR	Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable.
PIDNM	Promedio de Irradiancia Directa Normal por Mes.

RESUMEN

La utilización de paneles solares fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica ha ido en aumento constante a nivel mundial, lo que ha fomentado que a cada generación de paneles los procesos de obtención, transformación de sus materias primas como también su fabricación sea más eficiente, con lo que se tiene una reducción de precio como también reducción en la cantidad de CO₂ equivalente que se genera en el ciclo de vida de estos. La utilización de los paneles en viviendas, comercios, instituciones como en industrias conlleva beneficio a nivel mundial en la reducción de los gases de efecto invernadero, beneficios económicos para quien los implementa como también beneficio en la diversificación de la matriz de generación eléctrica del país.

Para fomentar el uso de este tipo de tecnologías en Guatemala ha creado diferentes leyes como normativas y planes para apoyar a la utilización de tecnologías para producir energía eléctrica por medio de recursos renovables, como la CNEE con su norma técnica NTGDR, sin embargo, aún hay muy pocos autoprodutores mediante el uso paneles solares fotovoltaicos.

El presente diseño de investigación busca sentar las bases para calcular los beneficios ambientales como la reducción del CO₂ equivalente, cuantificar el tiempo en que se recuperan los gases de efecto invernadero que se genera en el ciclo de vida del panel, como también calcular los beneficios económicos por medio de un flujo de caja, calculando el VAN y la TIR, con la implementación y operación de paneles solares fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en el departamento de Guatemala y así fomentar su uso en el territorio.

1. INTRODUCCIÓN

Guatemala adoptó oficialmente los objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas celebrada en septiembre de 2015 en donde uno de los propósitos está enfocado en la reducción del cambio climático, por lo que a nivel mundial se espera que la generación de emisiones de gases efecto invernadero sean inversamente proporcional a la generación de riqueza. Debido a esto es necesario que Guatemala se enfoque en la generación de energía eléctrica por medio de recursos renovables llevando así desarrollo y mejoramiento de vida para los habitantes del país como también colaborar a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

En el año 2019 el sector de generación de energía eléctrica en Guatemala generó el total de 5.43 millones de toneladas de CO₂ equivalentes según el balance energético realizado por el MEM en Guatemala, siendo este el segundo sector energético que más toneladas de CO₂ equivalentes produce después del sector de transporte, a pesar que la matriz energética de Guatemala su mayor porcentaje de generación proviene de recursos renovables, aún hay bastante oportunidad de mejora en la generación por medio de recursos renovables en la cual se encuentra la generación por medio del uso de paneles fotovoltaicos.

Guatemala como país ya posee iniciativas para incentivar la producción de energía eléctrica a través de recursos renovables, lo cual está incluido y enfatizado en el plan nacional de energía 2017-2032 que fue creado para poder cumplir con los objetivos establecidos en la Ley Marco de Cambio Climático conjuntamente con los ejes de los ejes de la Política Energética 2013-2027, la Política Nacional de Cambio Climático, el Plan Nacional de Desarrollo K'atun

2032 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, por lo que también es necesario que el ciudadano guatemalteco apoye y se involucre en estas iniciativas, así también que ejecuten acciones e implementaciones que apoyen a la reducción de los gases de efecto invernadero.

Conforme la generación de energía eléctrica, a través de recursos renovables, el aprovechamiento de la energía solar, por medio de paneles solares fotovoltaicos dentro de la matriz de generación de energía eléctrica en Guatemala, es muy baja y el país posee una ubicación privilegiada conforme el potencial de irradiación solar, ya que esta se recibe de manera estable a lo largo de todo el año debido a la latitud en donde se ubica.

Por tal razón, para fomentar su utilización, se cuantificarán algunos de los beneficios ambientales, como también el beneficio económico al utilizar paneles solares fotovoltaicos; con esto se espera aumentar la cantidad de usuarios autoprodutores, por medio del uso de esta tecnología y para la generación de energía eléctrica, usando, en el departamento de Guatemala, siendo el departamento del país más poblado, áreas superficiales que no se utilizan para actividades primordiales como la agricultura, los techos de viviendas, instituciones, comercios, entre otros.

La Investigación es de tipo cuantitativa-descriptiva y se llevará a cabo inicialmente a través de una revisión bibliográfica plasmada en los antecedentes como el marco teórico, utilizando un mapa interactivo para calcular la irradiancia normal directa que hay en el departamento de Guatemala, posteriormente calculando el potencial de generación de energía eléctrica tomando en cuenta especificaciones técnicas de un panel solar fotovoltaico que se pueda encontrar en el mercado guatemalteco.

Luego cuantificar los beneficios ambientales calculando los kilogramos equivalentes de CO₂ que se reducirían con esta implementación, en cuánto tiempo se recupera los kilogramos de CO₂ equivalente que se genera en el ciclo de vida del panel y los beneficios económicos calculando VAN, TIR y un flujo de caja que se obtiene al utilizar esta tecnología para la producción de energía eléctrica.

2. ANTECEDENTES

Actualmente se pueden encontrar diferentes trabajos de investigación que se enfocan en la implementación de paneles solares fotovoltaicos, tanto en viviendas, como en instituciones o comercios, en los cuales se estudian los beneficios económicos como también los ambientes que se generan. Además, existen estudios acerca del impacto ambiental del ciclo de vida y de la evolución de los paneles solares. A continuación, se describen algunos de estos estudios que aportan información importante:

Uno de los aportes más relevantes para la presente investigación fue el artículo científico en la revista en inglés Nature Communications con el nombre de *Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development*, de Louwen, (2016), en este artículo se describe la evolución de la generación de energía fotovoltaica por cuarenta años desde 1975 hasta el año 2015, como también basa sus resultados en la emisión de gases de efecto invernadero que se generan al utilizar esta energía que va de la mano con todo el ciclo de vida implicado en la implementación y utilización de paneles FV.

De los resultados descritos en el artículo tenemos el crecimiento de la capacidad instalada a nivel mundial de esta tecnología, la cual ha tenido un CAGR por sus siglas en inglés (*Compound Annual Growth Rate*) un crecimiento del 45 % anual que va de menos de 1 MW de potencia instalada en el año 1975 hasta uno de 180 GW de potencia instalada a finales del año 2014. Otro dato importante ha sido la evolución de los precios de instalación los cuales han ido

evolucionando con un precio de 100 USD por vatio de potencia instalado en 1975 hasta entre 0.64-0.67 USD por vatio de potencia instalado a finales del 2014.

Uno de los datos más importantes extraídos del artículo anterior ha sido el de cuántos gramos equivalente de CO₂ se generan a través de producir un kilo vatio hora de energía eléctrica (gCO₂-eq kWh⁻¹) utilizando paneles fotovoltaicos, el cual ha ido evolucionando a la par de la tecnología y se hace más eficiente la fabricación de los paneles. Los valores han disminuido de unos 409 gCO₂-eq kWh⁻¹ para los paneles mono-Si en 1986 en alrededor de unos 25 gCO₂-eq kWh⁻¹ para finales del año 2014 por lo que se puede concluir que a cada avance tecnológico en todo el ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos ha ido favoreciendo en la reducción del impacto ambiental que se ocasiona al utilizar este medio de generación eléctrica.

Chávez (2013), en su investigación titulada *Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de un sistema de autoconsumo eléctrico basado en paneles fotovoltaicos para una vivienda*, realizó un estudio acerca del consumo energético en una vivienda de clase media con ubicación en Veracruz México y realizó un análisis de la viabilidad para satisfacer la demanda de la vivienda por medio de un sistema FV autónomo. En esta investigación se documentaron los componentes básicos con que cuenta un sistema fotovoltaico los cuales son: módulo fotovoltaico, el regulador de carga, almacenamiento (para el caso de un sistema autónomo) y el inversor de corriente.

En la investigación se dio una clasificación de los sistemas fotovoltaicos: sistema autónomo, que necesita un banco de baterías para el almacenamiento de energía, teniendo la ventaja de poder suministrar energía eléctrica sin producción directa del sol y un sistema conectado a la red, en donde la energía eléctrica que se genera, se suministra directamente a las cargas conectadas al

sistema sin poderla almacenar e inyectando el excedente al suministro de energía comercial, posee la ventaja de no necesitar un banco de baterías para el almacenamiento.

Una de las principales conclusiones de este artículo fue que en un sistema autónomo de generación “el almacenamiento se vuelve el principal problema, fundamentalmente debido a que se requiere un número relativamente grande de baterías, las cuales requieren de condiciones específicas de mantenimiento” (Chávez, 2013, p. 72).

Es decir, que en una implementación de generación energía renovable utilizando paneles FV, el sistema más conveniente para implementar es el sistema conectado a la red, ya que no implica gasto energético y generación de CO₂ equivalente en la fabricación, logística, instalación, mantenimiento y descarte del módulo de baterías que son necesarias en un sistema autónomo.

De lo más relevante para esta investigación del trabajo titulado *Estudio de factibilidad para la implementación de paneles fotovoltaicos en el recinto Sabanilla* de Salazar (2017), es lo desarrollado en el apartado de recomendaciones de la tesis, lo cual habla acerca de la importancia de “capacitar a la ciudadanía en general sobre los beneficios que genera la utilización de energías renovables, teniendo presente que cada una de ellas se debe implementar de acuerdo a estudios anticipados” (p. 51).

En el estudio se realizó un análisis financiero utilizando el VAN, TIR y TMAR, en el que se obtuvo como conclusión, que la implementación de paneles fotovoltaicos es favorable económicamente en la región del Ecuador. Esta conclusión sustenta la presente investigación en que al implementar paneles solares fotovoltaicos se obtienen beneficios económicos.

En la publicación de la Revista de Ingeniería Energética de la Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría (CUJAE) en su artículo llamado *Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino*, de Rojas y Lizana (2018) de donde se obtuvieron hallazgos interesantes utilizando la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA), la cual emplea una metodología estructurada para cuantificar los diferentes flujos de energía, materiales empleados y las emisiones asociadas en todo el ciclo de vida de un bien o servicio en este caso de los paneles FV.

Luego utilizando toda esta información para calcular el tiempo de recuperación de la energía (EPBT por sus siglas en inglés) el cual relaciona toda la energía consumida en el ciclo de vida del sistema FV dividiéndola por la energía anual generada por el sistema FV, esto lo realizaron para paneles solares FV basados en silicio cristalino en sus variantes mono cristalino y policristalino.

En el estudio se obtuvo un resultado muy similar para ambas variantes respecto el EPBT en años para cinco diferentes localidades en Costa Rica, las cuales tomaron en cuenta todo el ciclo de vida del panel, desde su materia prima cuarzo, transformándolo a silicio de grado metalúrgico luego a oblea seguido por el proceso de oblea a Panel, tomando en cuenta también la fabricación del inversor y los soportes para el sistema fotovoltaico, la importación e instalación y finalmente su disposición final, tomando en cuenta lo anterior los resultados para las cinco localidades en ambas variantes mono cristalino y poli cristalino obtuvieron que el tiempo de recuperación de la energía era entre 2.7 a 3.0 años de operación del sistema FV.

Tomando en cuenta los resultados anteriores se puede concluir que implementar paneles solares FV es rentable energéticamente ya que la duración de la vida de un panel está estimada entre 25 a 30 años.

Otro importante hallazgo es el trabajo de tesis titulado *Viabilidad económica de la implementación de paneles fotovoltaicos como alternativa para la red de distribución eléctrica tradicional* realizado por Carmona y Vidal, (2016), mediante el cual se elaboró un análisis de la viabilidad económica al implementar paneles fotovoltaicos concluyendo que para los hogares de estrato 4 posee viabilidad implementar un sistema FV autónomo (incluyendo módulo de baterías); por otra parte, no es viable un sistema FV completo para estratos 5 y 6 para los cuales sería viable implementar un el sistema con conexión a la red debido a la mayor potencia requerida en estos estratos sociales en Colombia como también la variabilidad del costo de la factura eléctrica según estrato social.

Con este trabajo de investigación se tomará la necesidad de sectorizar los beneficios económicos que se pueden obtener al implementar paneles fotovoltaicos en el departamento de Guatemala realizando clasificaciones según la potencia demandada que va de la mano con la tarifa aplicable.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Descripción del problema

En el último año contabilizado (año 2020) la matriz de generación eléctrica en Guatemala fue de un 24.7 % proveniente de recursos no renovables (en su mayoría carbón mineral) y un 75.3 % proveniente de recursos renovables (en su mayoría proveniente de la hidroelectricidad) en donde se incluye que la participación de la energía solar únicamente aportó un 2.0 % del total generado en Guatemala.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala (CNEE) el 25 de agosto de 2014 con la Resolución CNEE 227-2014, le dio vida a la Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Auto Productores con Excedentes de Energía (NTGDR). Tomando el Artículo 36 de la norma (Artículo 36. Autorización para Usuarios Autoproductores con Excedentes de Energía) indica que los auto productores a través de recursos renovables se pueden conectar al sistema de distribución de energía eléctrica nacional aportando sus excedentes de energía al sistema y con esto reducir su consumo de energía de la red nacional, contribuyendo a la misma y como consecuencia a esta implementación reducir los gases de efecto invernadero que genera el país.

Con esta resolución y norma técnica creada genera una oportunidad para la producción de energía eléctrica mediante el uso de paneles solares para cualquier ciudadano guatemalteco.

Guatemala posee un buen potencial de generación de energía fotovoltaica, según el Global Solar Atlas del Banco mundial el país en general posee una salida de potencia fotovoltaica específica diaria entre 3.46 a 5.01 kWh/kWp, dentro las mejores zonas marcadas se encuentra el departamento de Guatemala, el cual cuenta con una población aproximada para el año 2020 de 5,103,685 habitantes siendo este el departamento más poblado del país.

Hablando en términos de utilización de la radiación solar para su conversión en energía eléctrica su aprovechamiento en el departamento aún es muy bajo, según el informe estadístico actualizado en abril del año 2021 de la CNEE de usuarios autoprodutores y generadores distribuidos renovables, en el departamento de Guatemala habían 3,079 usuarios auto productores inscritos quienes sumaban una capacidad total de unos 14.676 MW en su mayoría proveniente de biogás con unos 4.80 MW seguido por la hídrica con 3.96 MW y proveniente de Biomasa con 1.06 MW lo que representaba un 0.32 % de la capacidad total efectiva instalada en el país para el año 2021.

3.2. Formulación del problema

La formulación del problema de la investigación es el foco principal de la misma ya que con ella se estructura la idea inicial a partir de una pregunta central que a su vez es contestada por las preguntas auxiliares.

3.2.1. Pregunta central

Lo anterior lleva a plantear la pregunta principal de este estudio para incentivar a la generación de más autoprodutores y generadores distribuidos renovables a través de implementar paneles solares fotovoltaicos: ¿Cuáles son los beneficios ambientales y económicos en la implementación de energía

renovable mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos conectados a la red de distribución nacional de energía eléctrica en el departamento de Guatemala?

3.2.2. Preguntas auxiliares

Para responder la interrogante principal se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuánta energía eléctrica podría generar por metro cuadrado de panel implementado en el departamento de Guatemala?
- ¿Cuántos kilogramos equivalentes de CO₂ se pueden reducir por metro cuadrado de panel fotovoltaico implementado en el departamento de Guatemala?
- ¿Cuál es el tiempo de recuperación de los kilogramos de CO₂ equivalentes generados en el ciclo de vida del panel fotovoltaico al implementarlos en el departamento de Guatemala?
- ¿Cuál es el beneficio económico que se podría generar por implementar cada metro cuadrado de panel solar en el departamento de Guatemala?

3.3. Delimitación del problema

Por lo descrito en los párrafos anteriores se puede concluir que la energía solar fotovoltaica en el departamento de Guatemala aún no tiene un aprovechamiento considerable como también aún hay muy pocos autoprodutores y generadores distribuidos renovables, en donde puede participar todo ciudadano guatemalteco utilizando el área superficial disponible en los

techos, tanto en viviendas, como en comercios e instituciones implementando paneles solares fotovoltaicos conectándolos al sistema de distribución de energía eléctrica nacional.

3.4. Causas y consecuencias

Una de las causas del por qué no hay un aprovechamiento considerable de la radiación solar para la generación de energía eléctrica mediante el uso de paneles solares por parte de la población del departamento de Guatemala es debido a que la población desconoce el potencial de generación fotovoltaico que se tiene en el mismo, también se desconoce cuáles son los beneficios ambientales y económicos que se pudiera tener mediante a esta implementación tanto en viviendas, comercios, instituciones, entre otros.

El no aprovechar el recurso de la radiación solar por medio de estos paneles tiene consecuencias, como la emisión de CO₂ que se pudieran reducir al utilizar una tecnología renovable, estancamiento de la evolución de la matriz guatemalteca hacia producción de electricidad por medio de energías renovables, dificultad para cumplir con los objetivos establecidos en la Ley Marco de Cambio Climático, entre otros.

4. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica en las siguientes líneas de investigación: recursos energéticos y su potencial, aspectos técnicos, económicos y ambientales en el uso y aprovechamiento de recursos energéticos e impactos económicos y financieros en proyectos energéticos, las cuales forman parte del área energética de la Maestría en Energía y Ambiente. Con la investigación se estima incentivar la generación de más autoprodutores de energía renovable en el departamento de Guatemala, a través de la implementación de paneles solares fotovoltaicos conectados a la red de distribución nacional de energía eléctrica, se espera lograr cuantificando los diferentes beneficios ambientales y económicos que se obtienen al realizar esta implementación en el departamento.

Con este trabajo se obtendrá cual es el promedio del potencial de generación de energía eléctrica en kWh anual por metro cuadrado de panel solar implementado, en el departamento de Guatemala y el promedio mensual de cada cabecera municipal, tomando en cuenta las características técnicas del panel fotovoltaico más común que se puede encontrar en el mercado guatemalteco.

Se obtendrá también el dato de cuál es el potencial de reducción de CO₂ equivalente en kilogramos por año, que se reduciría por la implementación de paneles solares fotovoltaicos por metro cuadrado en el departamento, así como también, cuál es el tiempo de recuperación de los kilogramos de CO₂ equivalentes generados en el ciclo de vida del panel en años, para poder conocer el impacto positivo al ambiente que se podría generar con esta implementación.

Finalmente se obtendrán los valores de VAN, TIR y en cuanto tiempo se realiza el retorno de la inversión, según la cantidad de paneles solares implementados en metros cuadrados de un sistema típico conectado a la red de distribución nacional de energía eléctrica, tomando en cuenta los pliegos tarifarios aplicables más reciente.

Los productos obtenidos serán de utilidad para la población del departamento de Guatemala, pues dará evidencia que al implementar paneles solares fotovoltaicos conectados a la red de distribución nacional de energía eléctrica, se alcanzan beneficios para el ambiente reduciendo gases de efecto invernadero aprovechando el área superficial que se pudiera poseer en los techos de las viviendas, comercios, instituciones, entre otros, como también podrán evaluar el bien económico que conlleva esta implementación reduciendo el consumo de energía eléctrica de la red nacional y aportando energía eléctrica renovable al país.

También ayudará a toda la población de Guatemala y a nivel mundial en general, ya que se busca que mayor población pueda aprovechar el área superficial de los techos, esta área generalmente no es utilizada e implementando los paneles, impactará positivamente en la producción de energía eléctrica por medios renovables, esto reduce los gases de efecto invernadero ayudado a mitigar los efectos adversos que conlleva la acumulación de gases en la atmosfera del planeta, aprovechando el recurso ilimitado que se tiene a través de la radiación solar que nos llega día a día.

Otro beneficio que se espera es seguir fomentando la mejora tecnológica en la creación de estos, generando menos impacto ambiental en su ciclo de vida, también mejorando su eficiencia en la conversión de la radiación solar en energía eléctrica.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Cuantificar los beneficios ambientales y económicos que se obtienen al implementar paneles solares fotovoltaicos conectados al sistema de distribución de energía eléctrica nacional en el departamento de Guatemala.

5.2. Específicos

- Determinar cuánta energía eléctrica se podría generar al implementar cada metro cuadrado de panel solar fotovoltaico.
- Calcular cuántos kilogramos equivalentes de CO₂ se pueden reducir por implementar cada metro cuadrado de panel solar fotovoltaico.
- Cuantificar cuál es el tiempo necesario de operación del panel solar fotovoltaico para recuperar el CO₂ equivalente que se genera en el ciclo de vida de este.
- Determinar cuál es el beneficio económico que se podría generar por implementar cada metro cuadrado de panel solar fotovoltaico.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

A partir del presente estudio se cuantificarán algunos de los beneficios ambientales y económicos que se podrían obtener al implementar energía renovable mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos conectados a la red de distribución eléctrica nacional de Guatemala, exclusivamente en el departamento de Guatemala, los beneficios serán cuantificados según la salida de potencia fotovoltaica específica que se posee en el departamento Guatemala y cada cabecera municipal del departamento según el mapa interactivo del Global Solar Atlas del Banco mundial .

Mediante la investigación se podrá concluir, que la implementación de paneles solares fotovoltaicos conectándolos al sistema de distribución de energía eléctrica, conlleva beneficios ambientales reduciendo la cantidad de CO₂ equivalentes y económicos, así como el gasto de la factura de consumo de energía eléctrica de la red nacional. Cabe mencionar que no existe un estudio en Guatemala que describa los beneficios ambientales de la implementación de paneles solares que abarque todo el departamento de Guatemala que es en donde se concentra la mayor población del país.

La necesidad de cuantificar los beneficios ambientales y económicos que se obtienen al implementar dichos paneles es debido a que el incremento de la utilización de esta tecnología para producir energía eléctrica conlleva reducción de gases de efecto invernadero que son el principal factor que está aportando la humanidad para dirigirnos hacia un cambio climático acelerado.

Una de las desventajas de la generación de energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos es que necesitan grandes áreas superficiales que pudieran ser aprovechadas para actividades esenciales como por ejemplo la agricultura, por lo que es ideal utilizar extensiones pequeñas, como techos de las viviendas, industrias, bodegas, entre otros, los cuales no están destinados hacia una actividad.

Se estaría aprovechando esta área superficial que no tiene ningún beneficio extra en regiones urbanas con alta polución en el aire como lo sería en regiones rurales, como por ejemplo la recolección de lluvia en techos. En esta investigación se harán recomendaciones para la implementación de paneles solares fotovoltaicos para formar parte de los usuarios auto productores y generadores distribuidos renovables.

El presente estudio aportará la información necesaria para que la población del departamento de Guatemala tenga a la mano una fuente acerca de los beneficios de implementar esta tecnología renovable evaluando factores ambientales, técnicos y financieros.

Con esto se espera fomentar el uso de la misma y así ayudar a la diversificación de la matriz energética del país hacia el mayor aprovechamiento de los recursos renovables con los que cuenta siendo este uno de los focos principales dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente, aumentando la potencia instalada e incrementando el porcentaje de participación que actualmente posee la generación de energía eléctrica por medio de la fuente solar fotovoltaica, la que al día de hoy participa únicamente con el 2 % del total de generación de energía de Guatemala.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Radiación solar

La radiación solar es emitida por nuestro astro rey el sol en todas direcciones y esta energía es generada por el proceso físico de fusión en donde se lleva a cabo en general la conversión del elemento hidrógeno hacia el elemento helio y en este proceso se produce una enorme cantidad de energía que se emite a través del espacio.

La radiación solar llega a la tierra constantemente y su paso por la atmósfera la radiación es sometida a procesos de reflexión, atenuación y difusión esto sucede debido a la acción de diferentes iones, átomos, moléculas, gases disueltos y diferentes partículas en suspensión presentes en la atmosfera lo que afecta la cantidad aprovechable en la superficie de esta.

7.1.1. Irradiancia e irradiación solar

“La irradiancia solar está definida por la potencia de radiación solar por unidad de área que incide en una superficie y sus unidades en el S.I. son W/m^2 ” (Perpiñan, 2020, p.25). La irradiación solar es la integral de un intervalo de tiempo de la irradiancia por lo que está definida por la energía de radiación solar por unidad de área incidente en una superficie y sus unidades en el S.I., son Wh/m^2 . Para calcular la irradiancia solar que repercute en un área determinada de la corteza terrestre es necesario tomar en cuenta tres diferentes contribuciones denominadas como:

7.1.1.1. Radiación directa

La cual cuantifica la irradiancia que proviene en línea recta del sol.

7.1.1.2. Radiación difusa

Es la cual cuantifica la radiación procedente de toda el área del cielo disponible exceptuando el sol incluyendo toda la radiación dispersada por la atmósfera y esta va a ser variable conforme al tiempo.

7.1.1.3. Radiación del albedo o reflejada

Cuantifica la fracción de la radiación proveniente de la reflexión que se da en el suelo, esta fracción de las tres que menor irradiancia aporta al total y en algunas ocasiones se puede despreciar.

Figura 1. Tipos de radiación que forman parte de la irradiancia



Fuente: Alonso. (2020). *Radiación Solar*.

La suma de las tres diferentes radiaciones que llegan a la superficie se conoce como irradiancia global y esta dependerá de la latitud del lugar, la época del año, la altura del lugar y las condiciones meteorológicas. Guatemala según el MEM posee una radiación solar global promedio de 5.3 kWh/m² al día.

7.2. Paneles solares fotovoltaicos (FV)

La radiación solar que incide en la tierra es aprovechada mediante a tres maneras; la primera es un aprovechamiento químico mediante la fotosíntesis que constituye la base de la vida en general, la segunda forma el aprovechamiento térmico por medio de lo cual se calienta un medio ya sea líquido, gaseoso o sólido como lo es el calentamiento de la atmosfera formando las corrientes de viento por dar un ejemplo y la tercera forma de aprovechamiento de los fotones y transformando los mismos en electricidad por medio del fenómeno fotoeléctrico.

“Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico” (Santos, s.f. p. 1).

7.2.1. Funcionamiento de un panel solar FV

El objetivo de un panel solar fotovoltaico es convertir los fotones provenientes del sol en energía eléctrica, esto se realiza mediante el fenómeno fotoeléctrico mediante material semiconductor en el caso de los paneles solares generalmente es el silicio.

El silicio naturalmente posee cuatro electrones de valencia pero para producir las celdas fotovoltaicas de los paneles solares es necesario aumentar

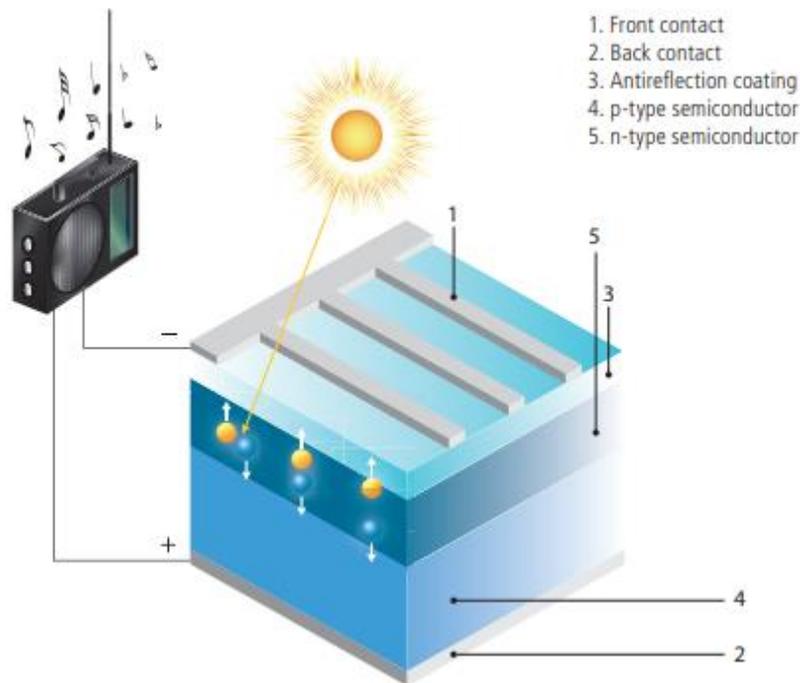
su conductividad y esto se logra a través de agregar controladamente impurezas en un lado de la celda utilizando átomos de fósforo con cinco electrones de valencia esto genera que el quinto electrón no quede bien acoplado a la red del cristal de Si o silicio lo que genera un exceso de portadores de carga negativa, a este semiconductor según Perpiñan (2020) se le denomina tipo n o n-donador.

Caso contrario cuando se utiliza impurezas en un lado de la celda de cristal de silicio utilizando átomos de boro con tres electrones de valencia genera que el silicio atraiga más a los electrones o tenga mayor afinidad en atraerlos y a este tipo de semiconductor se le denomina tipo p o p-donador.

Según European Commission (2009) debido a la interacción de estos dos tipos de semiconductores (tipo n y tipo p) se forma una unión entre los mismos generando una difusión de electrones desde la región de alta concentración de electrones del lado tipo n hacia el lado de baja concentración de electrones del lado tipo p generando un campo eléctrico formando un diodo que promueve que la corriente fluya en una sola dirección.

Los fotones provenientes del sol al incidir en la celda fotovoltaica formada por ambos tipos de semiconductores conectándolos a través de sus contactos óhmico metal-semiconductor a una carga externa se extrae una corriente eléctrica, como se puede ejemplificar en la siguiente figura.

Figura 2. **Funcionamiento de la celda FV**

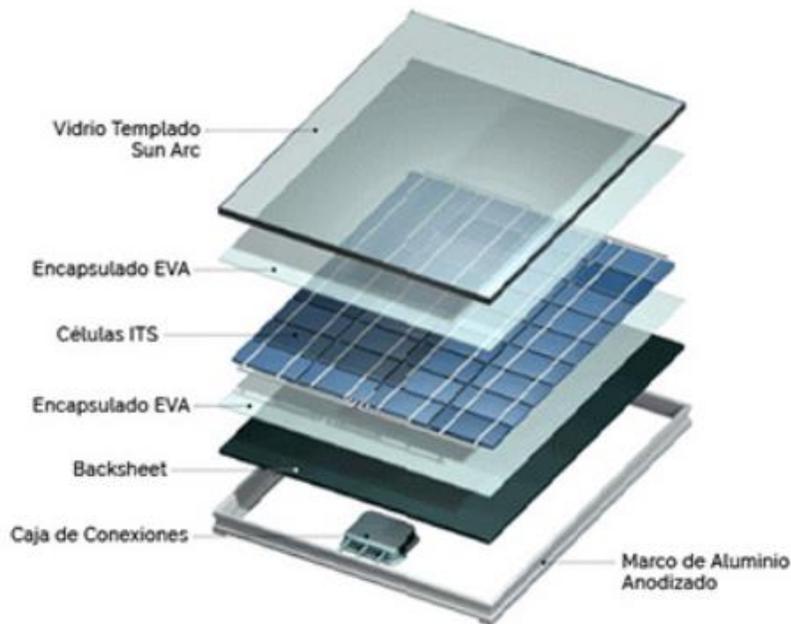


Fuente: European Commission. (2009). *Photovoltaic solar energy development and current research*.

7.2.1.1. **Partes de un panel solar FV**

Un panel solar FV está compuesto por diferentes elementos y materiales siendo el principal elemento la celda fotovoltaica la cual generalmente está recubierta entre dos delgadas láminas de etileno vinilo acetato o EVA, en la base del conjunto se ensambla con un polímero que es un termoplástico y en la parte que está expuesta a la radiación solar posee una capa de vidrio templado, todos los elementos anteriores se enmarcan en aluminio anodizado el cual resiste a las inclemencias climáticas y le da soporte al montaje e instalación.

Figura 3. **Elementos de panel solar FV**

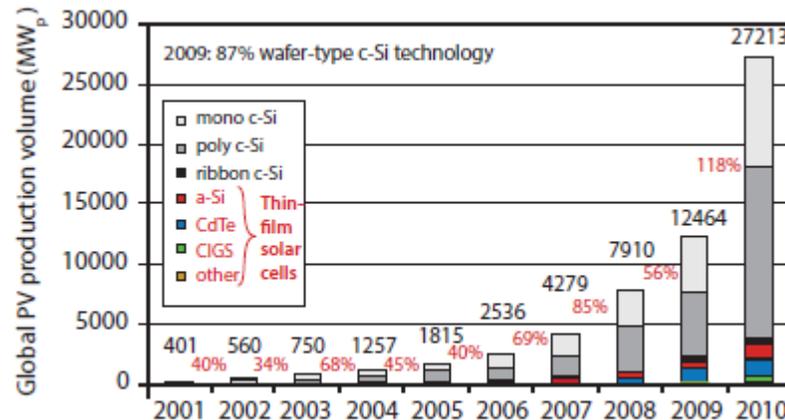


Fuente: Gecko Solar. (2021). *Equipo solar México*.

7.2.2. Principales tipos de paneles solares FV

Actualmente se pueden encontrar distintos tipos de paneles solares FV, en general las diferencias radican en el proceso de obtención de la celda FV como también el uso de este, según los tipos de celdas más utilizadas en la actualidad para la producción de paneles solares FV son los monocristalinos (mono c-Si) y los policristalinos (poly c-Si) En cada variedad tenemos diferentes eficiencias de conversión que se verificarán a continuación.

Figura 4. **Utilización de celdas fotovoltaicas de tecnología c-Si a nivel mundial**



Fuente: Jäger, K. (2014). *Solar energy, fundamentals, technology, and systems*.

7.2.2.1. Paneles solares FV policristalinos

El proceso de producción para la obtención de las celdas fotovoltaicas policristalinos y monocristalinos de silicio es muy similar, sin embargo, las de monocristalinos conllevan un proceso extra que se llama proceso de Chozralski.

Para la obtención de ambas celdas fotovoltaicas común mente llamadas obleas se parte del cuarzo el cual está conformado mayormente por óxido de Silicio (SiO_2) el cual es sometido a un proceso de purificación por medio de carbono para obtener el polvo de silicio el que seguidamente es procesado por medio del proceso de Siemens.

Según Jäger, (2014) este proceso se lleva a cabo en un reactor en donde el polvo de silicio es expuesto con ácido clorhídrico (HCl) en altas temperaturas formando triclorosilano (HSiCl_3) en estado gaseoso el cual se recupera en su

forma líquida utilizando un intercambiador de calor, este compuesto líquido se lleva a continuación a un proceso de destilación para remover impurezas con diferentes puntos de ebullición, luego es nuevamente recuperado con una mayor pureza en estado líquido.

Luego de obtener el triclorosilano purificado es nuevamente llevado a estado gaseoso dentro de un reactor que cuenta con una barra de silicio altamente purificada, en el reactor el compuesto se mezcla con hidrógeno gaseoso, lo cual genera que el este se descomponga y se obtenga silicio de alta pureza el cual se va depositando en la barra de silicio con la que cuenta el reactor, como resultado se va obteniendo el silicio en una alta pureza en la forma policristalino para la formación de los paneles, el cual se calienta para que en estado líquido se deposite en un molde con la forma deseada y forme las obleas en forma cuadrada que luego son cortadas para la fabricación de los paneles.

Figura 5. **Oblea de silicio policristalino**



Fuente: Energy Market Authority (2011). *Handbook for solar photovoltaic (PV) systems*.

Según Sugianto (2020) la eficiencia de los paneles construidos con silicio policristalino posee una eficiencia de conversión entre 13 % al 16 % generalmente, este porcentaje es menor que los paneles monocristalinos que describiremos a continuación.

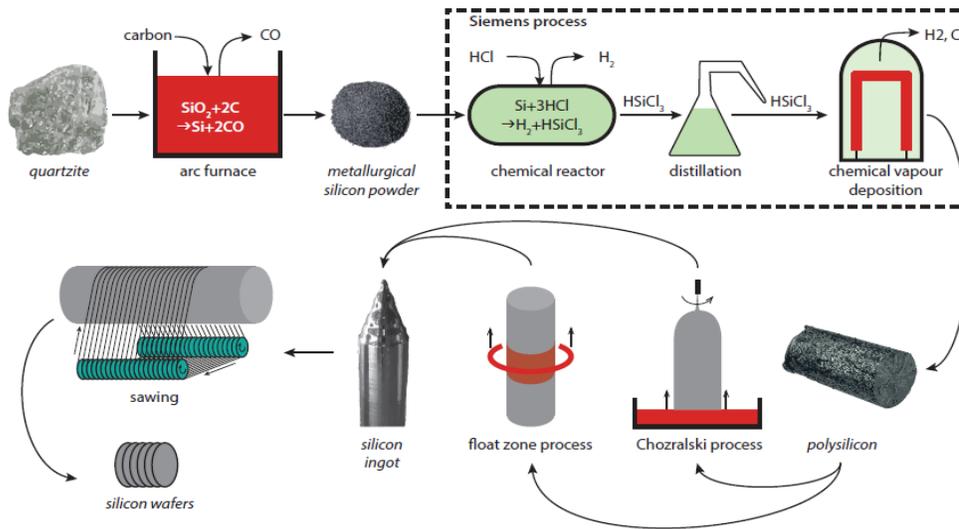
7.2.3. Paneles solares FV monocristalinos

Como describimos en la sección anterior el desarrollo de producción de las celdas fotovoltaicas monocristalinas conlleva un proceso adicional al silicio obtenido para las celdas fotovoltaicas policristalinas, el cual se denomina Czochralski, se realiza posterior al de obtener el silicio de alta pureza del proceso Siemens.

El proceso según Jäger, (2014) fue creado en 1916 por el científico polaco Jan Czochralski, este consiste en nuevamente fundir el silicio de alta pureza a una temperatura alrededor de 1,500° C agregando boro o fósforo para fabricar silicio dopado p o dopado n, este incluye un eje giratorio el cual posee un cristal de silicio con orientación deseada lo que genera que el silicio se vaya agregando al eje con la orientación de los cristales deseados al momento de irse solidificando formando una columna cilíndrica monocristalina, con lo que posteriormente se forman las obleas de silicio monocristalino.

A continuación, en la figura 6 se puede verificar los procesos involucrados en la purificación del cuarzo para la producción de obleas monocristalinas.

Figura 6. **Proceso de purificación del cuarzo para la obtención de las obleas de silicio monocristalino**



Fuente: Jäger, K. (2014). *Solar energy, fundamentals, technology, and Systems*.

7.2.3.1. Tipos de paneles FV en el mercado guatemalteco

En el mercado guatemalteco se han ido incrementando las empresas que suministran paneles solares fotovoltaicos lo que genera que se encuentren más opciones y se tenga beneficio en la reducción de precio para el usuario final, dentro de las empresas que se dedican a suministrar este tipo de equipo tenemos a EOS Power, Grupo Solares, Energía 502, Solarguat, Alternativas Inteligentes S.A., entre otros.

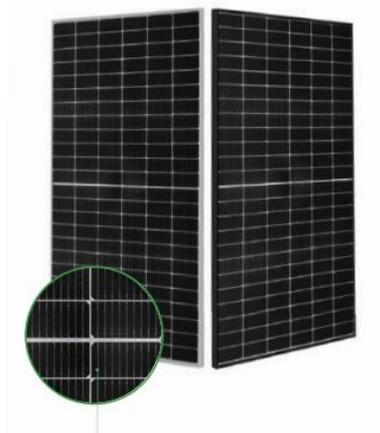
Las empresas mencionadas ofrecen en general, sistemas fotovoltaicos conectados al sistema de distribución de energía eléctrica, como también sistemas autónomos; dentro de su oferta poseen paneles solares en general del

tipo policristalino y monocristalino, sin embargo, se puede ver la tendencia que se están centrando más en el tipo monocristalino que en general poseen una mejor eficiencia que los policristalinos. Algunos de los principales fabricantes de paneles solares FV que ofertan tenemos:

7.2.3.1.1. Jinko solar

Jinko solar es una empresa de capital chino con sede en Shanghái la cual posee más de 15,000 empleados contando con 7 sitios de producción y que según Jinko Solar (2021) lleva fabricado 52 GW de potencia con un 12.8 % de participación del mercado de paneles solares y con un record de eficiencia de celda de 24.8 %. Uno de los panles de Jinko Solar que se puede encontrar en el mercado guatemalteco es el Tiger LM 72 HC 450 W monocristalino con serie de modelo JKM450M-72HLM.

Figura 7. **Panel solar monocristalino Jinko solar modelo JKM450M-72HLM**



Fuente: Jinko Solar (2021). *Module data sheets*.

El cual posee las siguientes especificaciones.

Tabla I. **Especificaciones de panel Jinko solar monocristalino**

Especificaciones de Fabricante Tiger LM 72HC serie de modelo (JKM450M-72HLM)	
Potencia máxima	450 W
Voltaje máximo	41.37 V
Corriente máxima	10.88 A
Eficiencia de Modulo	20.66%
Temperatura de operación	(-40 a 85) °C
Radiación estandar	1000 W/m ²
Degradación Aual por 25 años	0.55%

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Jinko Solar (2021). *Module data sheets*.

7.2.3.1.2. Q Cells

Hanwha Q Cells según Q Cells (2021) es una empresa fundada en Thalheim, Alemania, con sede actual en Seúl, Corea del Sur, la cual posee centros de producción en China, Malasya, Corea del Sur y Estados Unidos siendo la sexta empresa productora de celdas FV más grandes a nivel mundial alcanzando un total fabricado de 7.3 GW de potencia fabricados y posee más de 8,500 empleados según Q Cells (2021). Uno de los paneles de Q Cells que se puede encontrar en el mercado guatemalteco es el Q PEAK DUO L-G5 con celdas monocristalinas.

Figura 8. **Panel solar monocristalino Q Cells modelo Q PEAK DUO L-G**



Fuente: Q Cells (2021). *Module data sheets*.

El cual posee las siguientes especificaciones.

Tabla II. **Especificaciones de panel Q Cells monocristalino**

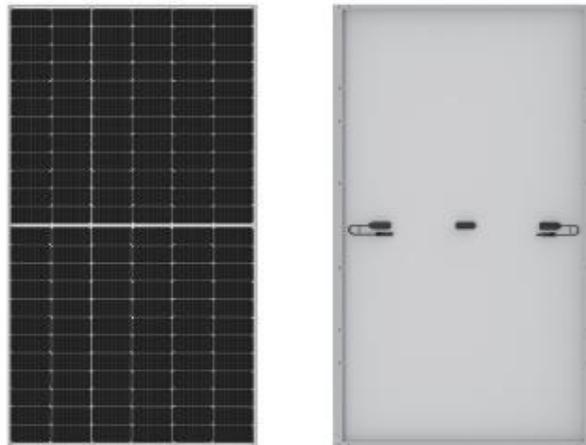
Especificaciones de Fabricante Q.PEAK DUO L-G	
Potencia máxima	380 W
Voltaje mínimo	47.95 V
Corriente mínima	9.57 A
Eficiencia mínima de Modulo	18.9 %
Temperatura de operación	(-40 a 85) °C
Radiación estandar	1000 W/m ²
Degradación Aual por 25 años	0.54%

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de.Q Cells (2021). *Module data sheet*.

7.2.3.1.3. LONGi Solar

LONGi Solar es una empresa China establecida en el año 2000 con sede en Xián, Shaanxi, China, la cual según LONGi Solar (2021) poseen un total de 58.15 GW de potencia fabricada y se ha enfocado en una relación de costo de energía optimizada con tecnologías monocristalinas, poseen un record de eficiencia del 24.06 %, un poco inferior a los de la marca Jinko Solar. Dentro de la oferta de la empresa LONGi Solar se puede encontrar el siguiente modelo en Guatemala:

Figura 9. **Panel solar monocristalino LONGi Solar modelo LR4-72HPH
450M**



Fuente: LONGi Solar (2021). *Hi M04 data sheets*.

El cual posee las siguientes especificaciones.

Tabla III. **Especificaciones de Panel LONGi Solar LR4-72HPH 450M**

Especificaciones de Fabricante de panel LONGi Solar LR4-72HPH 450M	
Potencia máxima	450 W
Voltaje mínimo	41.5 V
Corriente mínima	10.85 A
Eficiencia de Modulo	20.7 %
Temperatura de operación	(-40 a 85) °C
Radiación estandar	1000 W/m ²
Degradación Aual por 25 años	0.55%

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Q Cells (2021). *Module data sheets*

Con la información de los productos de las tres empresas mencionadas Jinko Solar, Q Cells y LONGi Solar que se puede encontrar en el mercado guatemalteco se puede concluir que la tendencia en el mercado está en la utilización de celdas monocristalinas las cuales poseen una eficiencia de alrededor del 20 % con algunas diferencias entre marcas, una degradación anual alrededor del 0.5 % por lo que no se puede verificar grandes diferencias entre marcas, debido a esto uno de los principales factores a tomar en cuenta debería de ser el respaldo en garantía que ofrece la empresa comercializadora.

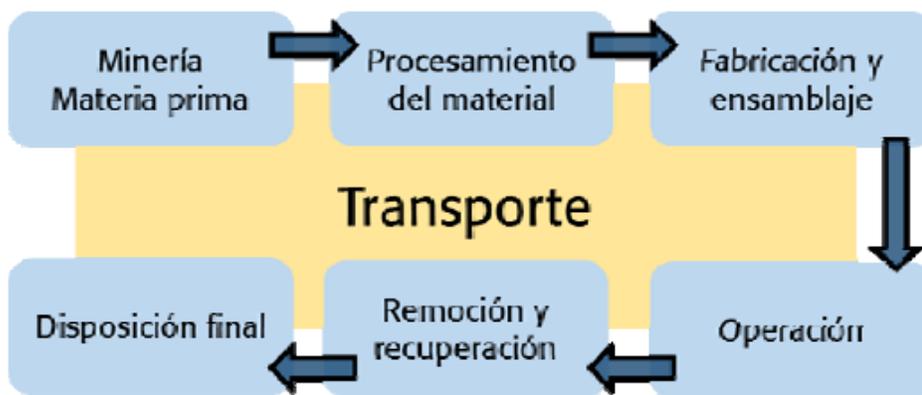
7.2.4. Ciclo de vida de un panel solar FV

El ciclo de vida de un panel solar FV inicia obteniendo las materias primas por ejemplo la minería para la obtención del cuarzo, el procesamiento o refinamiento del cuarzo, luego la fabricación y ensamblaje del producto, la operación del mismo y finalmente su disposición final, incluyendo el transporte

requerido para cada uno de los procesos, estos estudios se realizan generalmente para poder conocer el impacto al utilizar un producto, el cual es calculado generalmente en cantidad de CO₂ equivalente lo que va muy de la mano con la energía utilizada por cada proceso en el ciclo de vida.

Para realizar una descripción del ciclo de vida de los paneles solares FV según Rojas, I (2018) se puede hacer de dos maneras desde la cuna hasta la sepultura o C2G por sus siglas en inglés *cradle to grave*, se trata de verificar el ciclo de vida desde la minería del cuarzo hasta desechar el panel FV y desde la cuna hasta la cuna o C2C por sus siglas en inglés *cradle to cradle* que significa desde la minería del cuarzo hasta el reciclaje del panel, el cual aún no se ha estudiado a profundidad por lo que el más utilizado es el C2G.

Figura 10. **Diferentes procesos tomados en cuenta para el ciclo de vida de un sistema fotovoltaico**

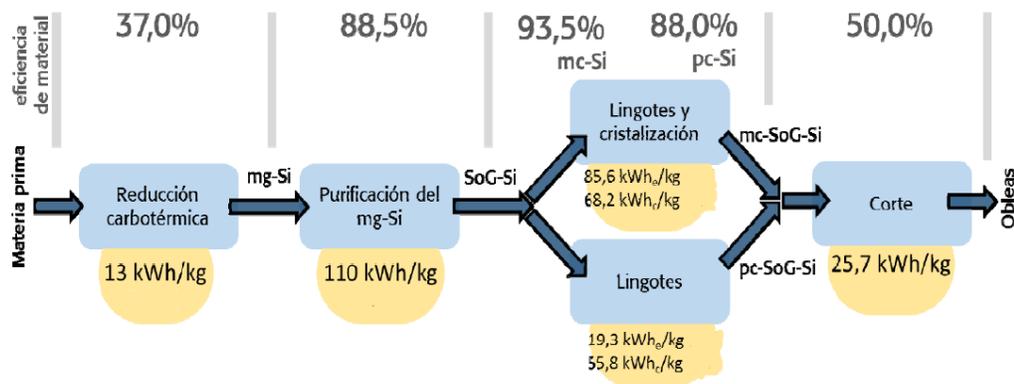


Fuente: Rojas, y Lizana, (2018). *Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino en Costa Rica.*

7.2.4.1. Minería materia prima y procesamiento del material

Como se describió en la sección de paneles solares FV policristalinos y monocristalinos el principal material para fabricar los mismos es el cuarzo que se obtiene mediante la minería, atraviesa por los diferentes procesos de purificación y es sometido a los diferentes procesos descritos en la sección 7.2.2.1. Para obtener las obleas de silicio todos estos procesos de purificación y tratamiento consumen altas cantidades de energía, se describen a continuación.

Figura 11. **Consumos energéticos por kilogramo de material procesado en la producción de obleas de silicio desde el material cuarzo**

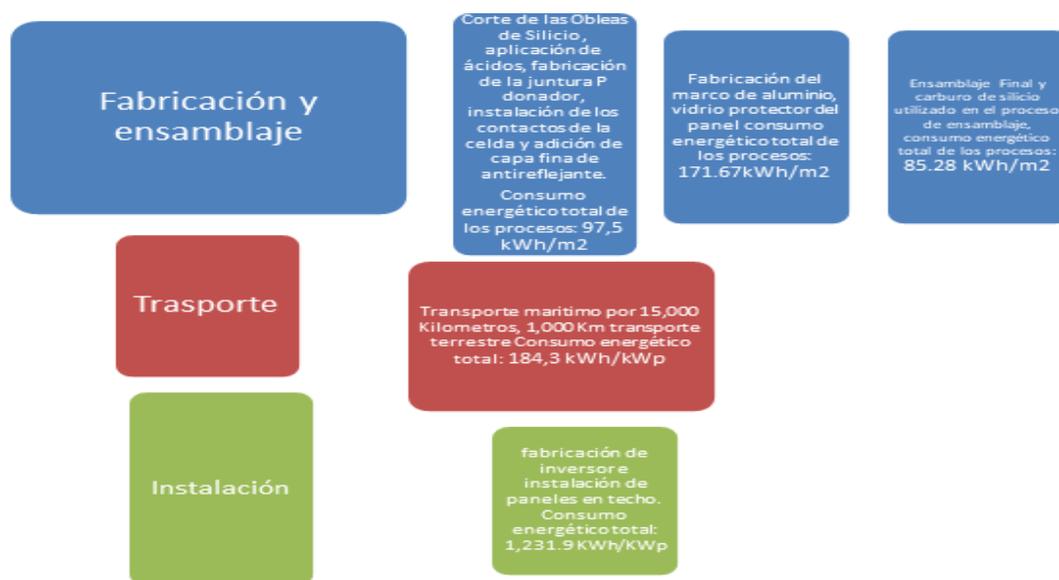


Fuente: Rojas, y Lizana, (2018). *Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino en Costa Rica.*

7.2.4.2. Fabricación, ensamblaje, transporte e instalación

El proceso de fabricación y ensamblaje de los paneles solares FV va desde el corte de las obleas de silicio hasta el transporte al lugar en donde se instalarán los paneles tomando en cuenta la fabricación del inversor de corriente eléctrica el cual transforma la corriente directa en alterna, a continuación se muestra un gráfico en donde se describen los diferentes procesos y el consumo energéticos en kWh por metro cuadrado para el proceso de fabricación y ensamblaje y kWh/kWp en el transporte e instalación.

Figura 12. **Consumos energéticos dentro de los procesos de fabricación, ensamblaje, transporte e instalación en paneles fabricados en China y transportados e instalados en Centroamérica**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Rojas, y Lizana. (2018). *Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino en Costa Rica.*

Rica.

Con la figura anterior se puede concluir que uno de los procesos que conlleva más energía es el de instalación debido a que se utilizan materiales como aluminio y acero que son materiales que consumen mucha energía para fabricarlos.

7.2.4.3. Operación, remoción y disposición final

La duración de la vida útil de un panel solar FV se estima en 25 años, luego que se cumple este intervalo de tiempo, según Rojas (2018) se procede a desmantelar el sistema fotovoltaico para su disposición final lo que conlleva un gasto energético de 69,4 kWh/m².

Por lo que se puede concluir que en cada etapa del proceso de utilización de paneles solares FV conlleva un gasto energético que se puede traducir a una cantidad de CO₂ equivalente por lo que aunque la producción de energía eléctrica a través de esta tecnología no es 100 % limpia toda la energía utilizada en el ciclo de vida de los mismos se recupera en unos años de operación teniendo la ventaja que la utilidad de estos sistemas es de 25 años por lo que es considerado como una fuente de producción de energía eléctrica renovable que debe estar incluida en toda matriz energética.

7.3. Sistemas para la generación de energía eléctrica fotovoltaica

Los sistemas utilizados mayormente para generación de energía eléctrica en hogares como en instituciones y comercios son el tipo de sistema FV autónomo el cual generalmente se destinan a un solo fin por ejemplo iluminación de un hogar y los sistemas conectados al sistema de distribución de energía eléctrica que en general está conectado a toda la distribución eléctrica del lugar por ejemplo la acometida eléctrica de un hogar que a su vez se encuentra

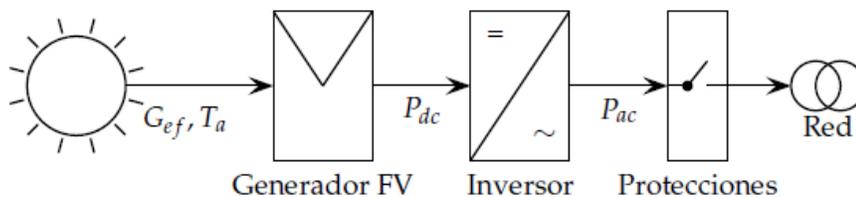
conectado a la red de distribución para enviar energía eléctrica cuando no se está consumiendo lo que genera que el consumo de la red de distribución disminuya, a continuación se ampliará la información de cada sistemas.

7.3.1. Sistema fotovoltaico conectado a la red de distribución

Un sistema conectado a la red de distribución contiene los siguientes elementos tales como paneles solares FV encargados en convertir los fotones provenientes del sol en energía eléctrica, el cual se conecta a un inversor de corriente que se encarga de transformar la corriente directa o DC a corriente alterna AC y un conjunto de protecciones eléctricas porque es necesario apagar el suministro de los paneles hacia la red de distribución cuando por ejemplo hay algún mantenimiento en alguna de las líneas de distribución de la red nacional, esto como protección a las personas como equipos dedicados en hacer el mantenimiento por dar un ejemplo.

También cuentan con un medidor bidireccional para contabilizar cuanta corriente eléctrica se consume de la red de distribución como también cuanta corriente se entrega al sistema de distribución. A continuación, se muestra un gráfico de los componentes que posee este sistema.

Figura 13. Componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red



Fuente: Perpián. (2020). *Energía solar fotovoltaica*.

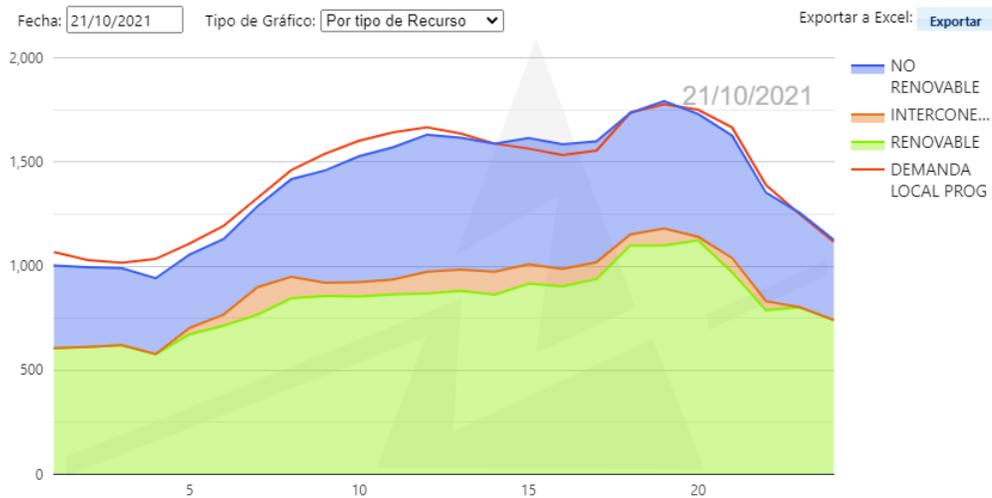
7.3.1.1. Ventajas y desventajas de un sistema fotovoltaico conectado a la red

La principal ventaja que se tiene en un sistema FV con conexión a la red es que no necesita banco para el almacenamiento de la energía, debido a que la energía se suministra directamente al sistema de distribución de energía eléctrica del lugar en donde se está implementando.

Por dar un ejemplo, en Guatemala, cumpliendo con las directrices descritas por la CNEE, se puede convertir en un usuario autoprodutor con excedentes de energía, teniendo una reducción en el consumo de energía eléctrica de la red nacional, otra de las ventajas es que ante situaciones de poca generación fotovoltaica que puede suceder por diferentes condiciones climáticas, se tiene también el suministro eléctrico nacional para tener un suministro estable.

Una de las desventajas de un sistema FV de generación con conexión a la red es que en las noches no se podría tener suministro eléctrico del sistema, por lo que por las noches dependerá del suministro eléctrico nacional, otra desventaja es que en las noches el consumo de energía en Guatemala genera más CO₂ equivalentes tomando en consideración que la demanda de energía eléctrica, en el país, es mayor por las noches, teniendo la generación por medios no renovables un incremento a partir de las 18 horas, como se puede verificar en la siguiente gráfica revisada para el día 21 de octubre del año 2021 tomando en cuenta que el comportamiento tiene la misma tendencia anual.

Figura 14. **Generación eléctrica diaria en Guatemala por tipo de recurso**



Fuente: Administrador del mercado mayorista: AMM. (2021). *Generación eléctrica diaria en Guatemala por tipo de recurso.*

7.3.2. Sistema autónomo

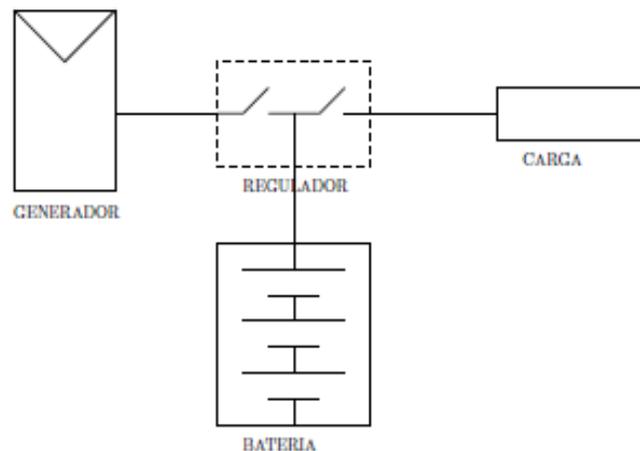
Un sistema fotovoltaico de generación eléctrica autónomo contiene elementos tales como un generador fotovoltaico que está conectado a su vez a un regulador pudiendo enviar la corriente eléctrica directa para la carga de banco de baterías o acumuladores como también a un inversor de corriente.

Este tipo de configuración es utilizado para cuando se tienen cargas alternas, también podría configurarse si el suministro dado por un sistema fotovoltaico solo se tenga destinado para iluminación de un lugar, se necesitaría un regulador en donde la corriente puede pasar directamente a la carga del banco de baterías pudiéndose instalar un sistema de iluminación alimentado por corriente eléctrica directa y no sería necesario un inversor de corriente.

Este tipo de sistema FV es utilizado generalmente en situaciones en donde no se cuenta con un sistema de distribución de energía cercano por ejemplo a una vivienda ubicada en áreas rurales sin suministro eléctrico nacional cercano, por lo que para poder tener el recurso eléctrico sería necesario contar con uno de estos sistemas autónomos en donde se podría contar con energía eléctrica todo el día.

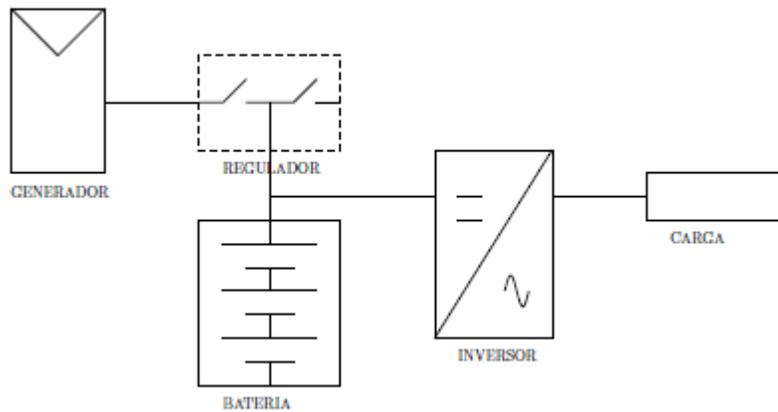
A continuación, se muestran tres diferentes gráficos de configuraciones más típicas de un sistema autónomo con sus componentes.

Figura 15. **Esquema de un sistema fotovoltaico autónomo con cargas únicamente de corriente directa**



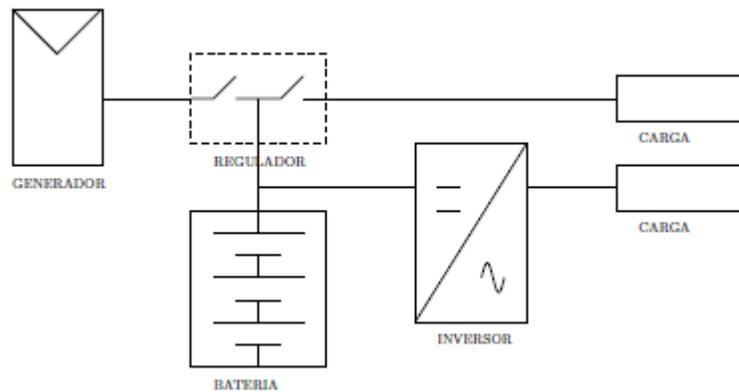
Fuente: Perpiñán. (2020). *Energía solar fotovoltaica*.

Figura 16. **Esquema de un sistema fotovoltaico autónomo con cargas únicamente de corriente alterna**



Fuente: Perpiñán (2020). *Energía solar fotovoltaica*.

Figura 17. **Esquema de un sistema fotovoltaico autónomo con cargas de corriente directa y alterna**



Fuente: Perpiñán (2020). *Energía solar fotovoltaica*.

7.3.2.1. Ventajas y desventajas de un sistema fotovoltaico autónomo

La principal ventaja que se tiene en un sistema FV autónomo, es que se tendría energía eléctrica disponible todo el día sin importar si hay generación o no por parte de los paneles FV haciéndolo un sistema más dinámico.

Las mayores desventajas que se tienen con un sistema autónomo provienen del mismo banco de baterías o acumuladores ya que tienen una vida útil aproximadamente de 5 años, por lo que se tienen que estar renovando, el banco necesita mantenimiento regular para su funcionamiento correcto y el mismo tiene impacto considerable en la generación de CO₂ equivalente en el ciclo de vida del sistema fotovoltaico.

7.3.3. Consideraciones en la instalación de paneles solares en un sistema conectado a la red de distribución

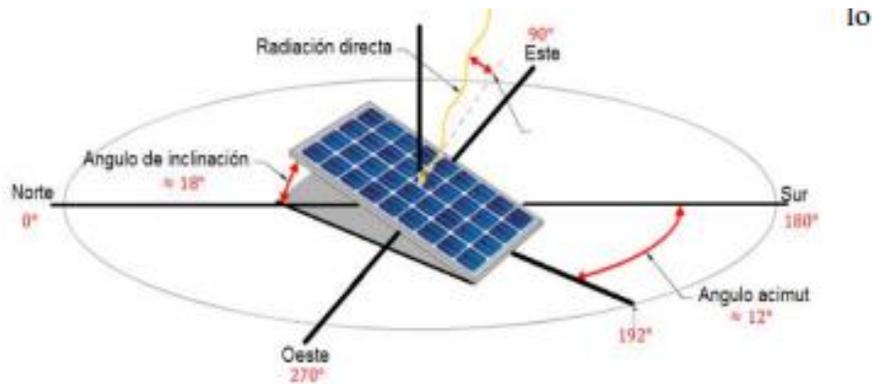
Para la implementación de un sistema FV conectado a la red de distribución se deben de tomar en consideración diferentes aspectos tales como:

- Potencial de radiación solar en el lugar: este aspecto va muy de la mano con el lugar en donde se van a instalar los paneles solares se puede utilizar mapas interactivos como el Solar Global Atlas del banco mundial para conocer los diferentes aspectos tales como irradiancia directa normal promedio diaria, promedio por hora según el mes, entre otros. Lo cual servirá para realizar el cálculo de cuántos paneles son necesarios para cubrir la necesidad que se tiene.

- La generación eléctrica mensual que se desea tener con el sistema: para esto se puede calcular el consumo en un hogar o una institución verificando facturas recientes de consumo, como también elaborando un inventario de las cargas eléctricas que se tienen.
- Instalación de los paneles solares en serie o en paralelo: el tipo de conexión a elegir dependerá de las especificaciones técnicas de los mismos tomando en cuenta la potencia y del inversor que se empleará.
- Inversor de corriente: los diferentes valores a considerar para la escogencia de un inversor de corriente son “la potencia nominal y máxima, la ventana de búsqueda del punto de máxima potencia, la corriente máxima de entrada, corriente nominal de salida, la eficiencia del inversor que se calcula con la potencia de entrada y la potencia de salida” (Perpiñán, 2020). También el umbral de arranque que es la potencia mínima para que el inversor inicie el proceso de conversión de corriente.
- La generación eléctrica mensual que se desea tener con el sistema: este aspecto dependerá del presupuesto que se cuenta para la inversión que conlleva la implementación del sistema FV como también cuanta energía se quiere producir por este medio.
- Orientación e inclinación de los paneles solares FV: un panel solar se instala en general con orientación hacia el sur tomando en consideración el ángulo de acimut y su inclinación optima conforme al plano, esto dependerá de la latitud del lugar y la época en donde se encuentre en funcionamiento el panel solar, la inclinación optima se puede calcular como también se puede verificar utilizando el mapa interactivo Global

Solar Atlas del banco mundial, a continuación, se muestra un ejemplo de orientación de panel.

Figura 18. **Esquema de la orientación e inclinación necesaria para el mayor aprovechamiento de la radiación solar**



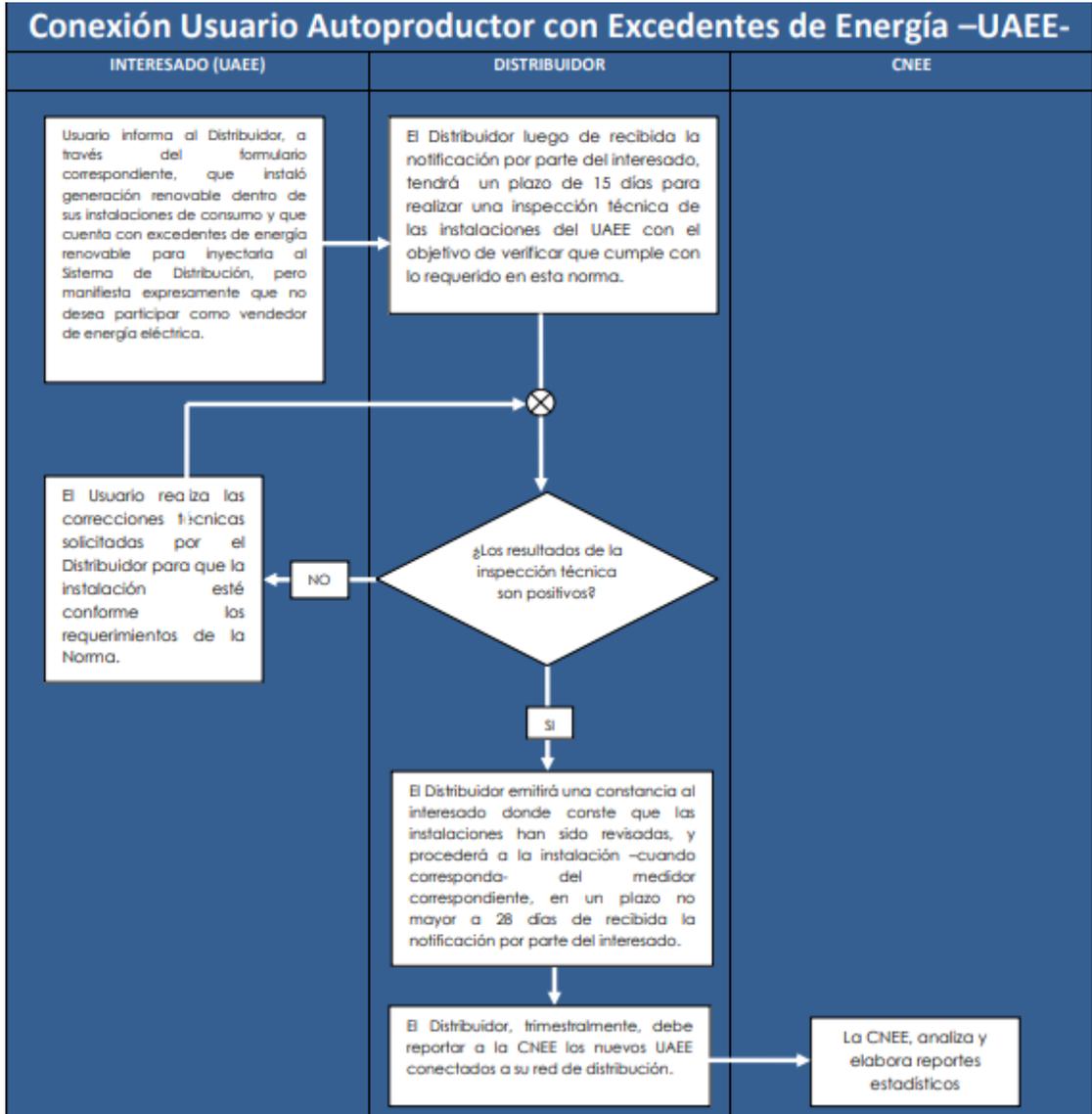
Fuente: Palacios, (2017). *Productividad de paneles solares monocristalinos*.

- Con cuánto espacio superficial se cuenta para la instalación de los paneles: un sistema solar FV para la generación de energía eléctrica es necesario tomar en cuenta el área superficial con la que se cuenta en este trabajo de investigación se promueve el uso de los techos para tener un aprovechamiento de áreas superficiales que no se emplean para alguna actividad en específico.
- Sombras que pudieran incidir en el área de instalación: se debe de tomar en cuenta todas las sombras que puedan incidir en las áreas efectivas del panel FV por lo que se debe de tomar en consideración arboles aledaños, edificaciones y la misma separación entre panel solar para que no se genere ninguna sombra que incida en el área efectiva.

7.3.4. Pasos para convertirse en un usuario autoprodutor y generador distribuido renovable utilizando paneles solares fotovoltaicos

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala CNEE en su resolución CNEE-227-2014 *Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía (NTGDR)*, tiene descrito los procedimientos para convertirse en un usuario autoprodutor. A continuación, se muestra un diagrama de flujo descrito en la norma técnica en donde se describen los pasos.

Figura 19. Flujo de conexión usuario autoprodutor con excedentes de energía



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2014). *Nórrma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía (NTGDR)*.

Como se puede verificar en el gráfico anterior el primer paso para convertirse en un autoprodutor a través del uso de paneles solares FV es la

instalación de un sistema FV tomando en cuenta todos los componentes necesarios para su adecuado funcionamiento, para luego comunicarle mediante el formulario descrito en la siguiente figura al distribuidor quien nos brinda el servicio de suministro de energía eléctrica.

Tabla IV. **Formulario para informar al distribuidor sobre las instalaciones de generación de energía renovable para convertirse en autoproductor autorizado**

**FORMULARIO PARA QUE EL USUARIO AUTOPRODUCTOR CON EXCEDENTES DE ENERGÍA
INFORME AL DISTRIBUIDOR SOBRE LAS INSTALACIONES DE GENERACIÓN DENTRO DE SUS
INSTALACIONES**

ESPACIO PARA SELLO DE EMPRESA CON FECHA
DE RECEPCIÓN DE LA SOLICITUD

1. Datos generales del usuario:

Nombre del usuario o representante legal: _____

Razón social de la entidad: _____

Dirección: _____

Municipio: _____ Departamento: _____

Teléfono: _____ Correo electrónico: _____

Número de identificación del usuario ante el Distribuidor:

EEGSA (correlativo): _____

DEOCSA (NIS): _____

DEORSA (NIS): _____

EEM: _____

2. Datos generales del proyecto:

2.1 Fuente de energía renovable (marque la(s) que corresponda(n):

Biomasa Eólica Geotérmica

Hidráulica Solar

2.2 Especificaciones técnicas:

Número de unidades generadoras _____ Potencia total instalada _____ kW

2.3 Medios de protección, control y desconexión automática: Sí No

Describir las características: _____

Manifiesto que NO deseo participar como vendedor de energía eléctrica y solicito realizar la inspección técnica correspondiente y el suministro e instalación del medidor bidireccional respectivo. (En el caso de Usuarios regulados, el suministro e instalación del medidor respectivo lo cubrirá el Distribuidor, mientras que los Grandes Usuarios son responsables de su sistema de medición)

Lugar y Fecha: _____ día _____ mes _____ año _____

DPI (CUI) _____ Firma: _____

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2014). *Formulario para que el usuario autoproduccion con excedentes de energía informe al distribuidor sobre las instalaciones de generación dentro de sus instalaciones.*

Como se puede verificar los pasos son sencillos en realizar y en general las empresas que brindan servicio de venta de sistemas FV asesoran a su cliente para que pueda cumplir con todos los requisitos ante la CNEE y el distribuidor para convertirse en un autoproducer mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos.

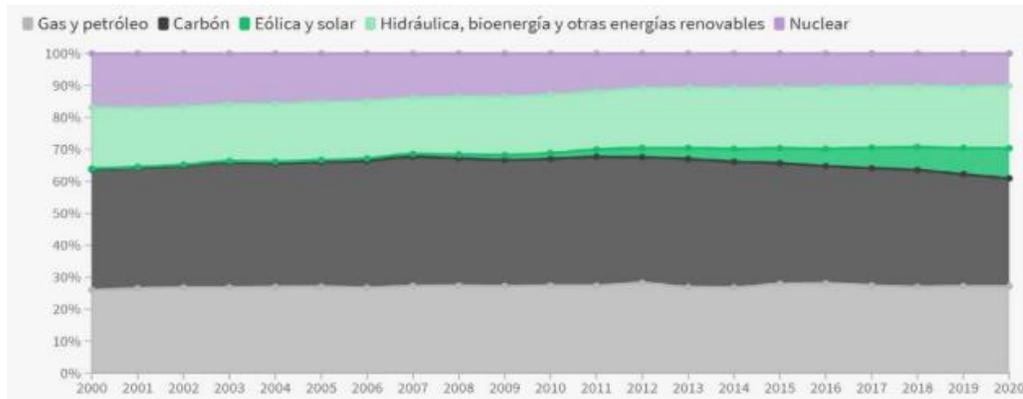
7.4. Generación de energía eléctrica fotovoltaica a nivel mundial

Según Louwen, (2016) la capacidad instalada de generación de energía eléctrica a mediante el uso de paneles solares FV creció de menos de 1MWp en 1975 hasta alrededor de 180 GWp a finales del 2014 con un crecimiento anual del 45 % y los mercados a inicios de los años noventa, con mayor potencia instalada, eran Japón e Italia, pero entre los años 2005 y 2014 Alemania estaba liderando el mercado de energía FV y el crecimiento de la utilización de esa fuente de energía ha sido gracias al apoyo y los incentivos que ha recibido por parte del gobierno de Alemania. Actualmente el país con mayor generación eléctrica por medio de paneles solares FV es China.

7.4.1. Participación de la energía eléctrica fotovoltaica en la matriz energética mundial

A nivel mundial la producción de energía eléctrica aún está dominada por recursos no renovables como el carbón, los derivados del petróleo y gas, sin embargo se puede verificar que la producción a partir de recursos renovables ha tenido un crecimiento constante y se ha tenido un descenso en el uso del carbón y energía nuclear, conforme el uso de petróleo y gas aún se ha mantenido constante sin mayor variación en la última década, a continuación se puede verificar los comportamientos en la siguiente gráfica.

Figura 20. **Matriz eléctrica mundial por año**

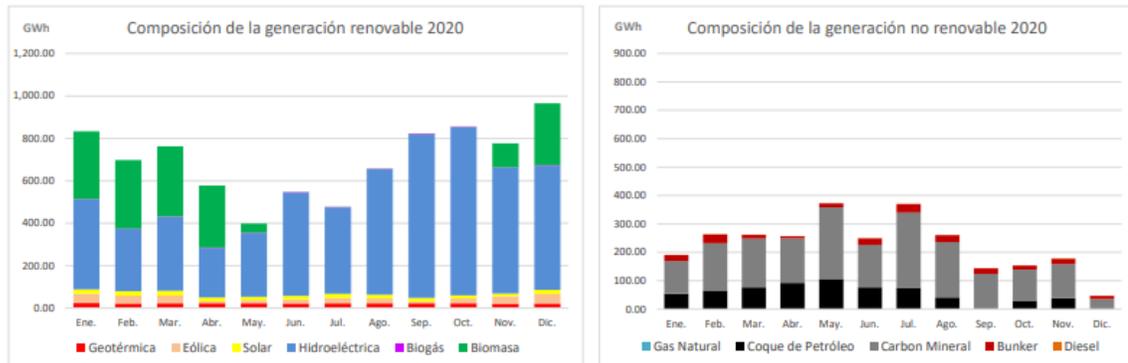


Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2014). *Formulario para que el usuario autoprodutor con excedentes de energía informe al distribuidor sobre las instalaciones de generación dentro de sus instalaciones.*

7.4.2. Energía eléctrica fotovoltaica en Guatemala

Guatemala posee riqueza en recursos naturales y la disponibilidad de estos diferentes recursos para la generación de energía eléctrica no es la excepción, sin embargo, no están siendo aprovechados para que la dependencia de recursos no renovables sea la mínima. Dentro de la capacidad instalada de generación eléctrica del país la potencia actual con la que se cuenta para la tecnología solar FV es de 91.5 MW lo que representa un 2.69 % según información tomada del informe anual del AMM. A continuación, se puede verificar con las siguientes gráficas la composición de la generación eléctrica de Guatemala para el año 2020 y los proyectos de generación eléctrica solar fotovoltaica instalados y en operación en Guatemala.

Figura 21. **Composición de la generación eléctrica de Guatemala año 2020**



Fuente: Administrador Mercado Mayorista (2020). *Informes Anuales Mercado mayorista*.

Tabla V. **Proyectos de generación solar fotovoltaica, en operación en Guatemala**

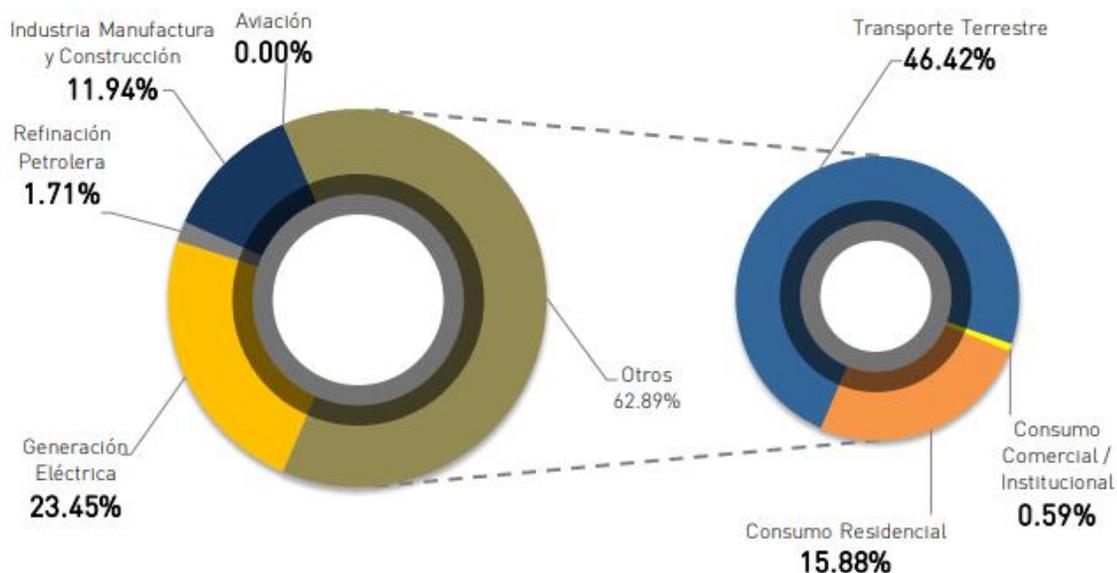
Proyecto	Ubicación	Capacidad efectiva, en MW
Central Solar Fotovoltaica SIBO	Estanzuela, Zacapa	5.0
Proyecto Planta Fotovoltaica de 50 MW (Horus I)	Chiquimulilla, Santa Rosa	50.0
Horus II	Chiquimulilla, Santa Rosa	30.0
Granja Solar La Avellana	Taxisco, Santa Rosa	1.0
Granja Solar Taxisco	Taxisco, Santa Rosa	1.5
Granja Solar El Jobo	Taxisco, Santa Rosa	1.0
Granja Solar Pedro de Alvarado	Moyuta, Jutiapa	1.5
Granja Solar Buena Vista	Jutiapa, Jutiapa	1.5
Total		91.5

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2018). *Energía Solar en Guatemala*.

7.5. Generación de CO₂ en Guatemala debido a la producción de energía eléctrica

Según el informe del MEM *Balance Energético 2019* el sector de generación de energía eléctrica produjo 5.43 millones de ton de GEI, lo que representa un 23.45 % de todos los GEI que genera Guatemala, siendo el segundo sector después del transporte terrestre el cual representa un 46.42 % del total. En Guatemala el factor de emisión de gases de efecto invernadero en por cada kWh consumido de la red nacional representa 0.3913 Kg de CO₂-eq, por lo que, la utilización de energía proveniente de recursos renovables se vuelve esencial para disminuir la generación de GEI que produce el país (Ministerio de Energía y Minas, 2020).

Figura 22. Emisión de GEI según consumo de energía



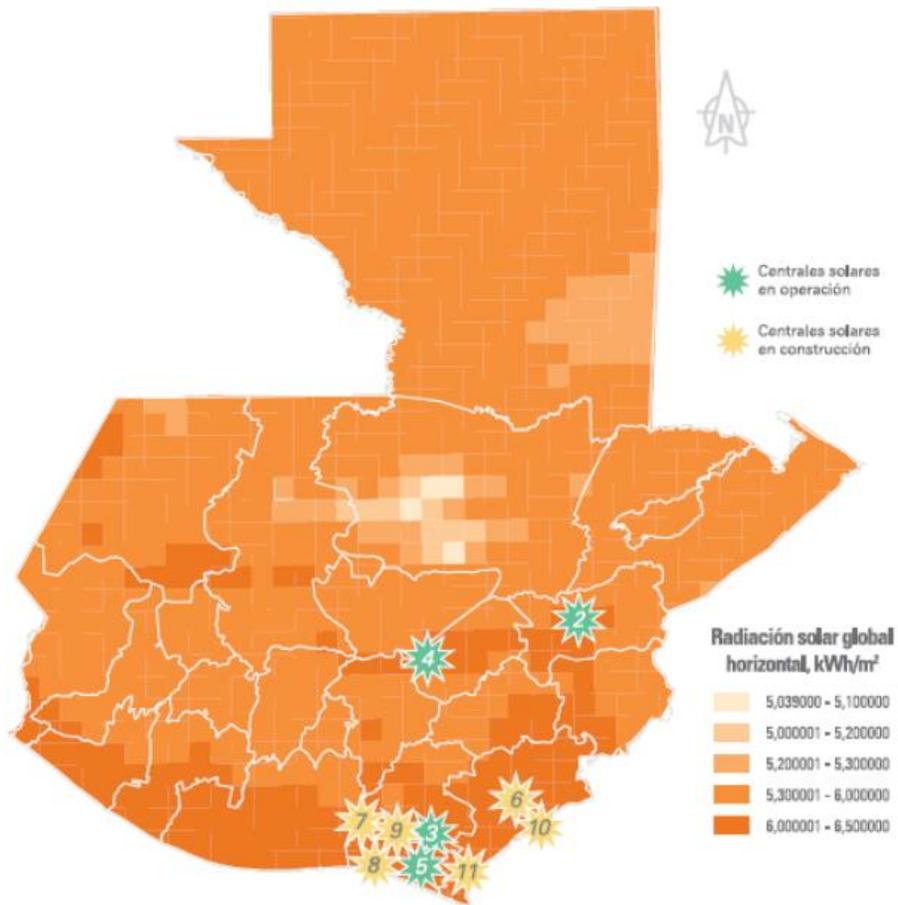
Fuente: Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Balance Energético 2019*.

7.6. Plan de expansión del sistema de generación de energía en Guatemala

Según el Ministerio de Energía y Minas (2020) *Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2020 – 2050* Guatemala ha tenido un incremento constante de la demanda de energía eléctrica y el país cuenta con gran potencial conforme a la generación de energía eléctrica por medio de recursos renovables y aún quedan recursos que no están siendo aprovechados en su totalidad, como la hídrica con 4.7 GW, 966 MW, según el recurso geotérmico y 204 MW en el eólico, conforme al recurso solar, es más complejo conocer cuál es el potencial total que se tiene como país sin embargo, la mayor parte del territorio de Guatemala posee entre 5.2 a 6.5 KWh/m² de potencial solar.

Una de las recomendaciones que se puede encontrar en el *Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2020 – 2050* bajo los escenarios de crecimiento de la demanda eléctrica media y baja considerando “un escenario hídrico seco es necesario invertir en nuevas centrales de generación, especialmente geotérmicas, solares, eólicas y de biogás” (Ministerio de Energía y Minas, 2020, p. 71).

Figura 23. **Potencial y plantas solares en Guatemala**



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2020 - 2050*.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Radiación solar

1.1.1. Irradiancia e irradiación solar

1.1.1.1. Radiación directa

1.1.1.2. Radiación difusa

1.1.1.3. Radiación del albedo o reflejada

1.2. Paneles solares fotovoltaicos (FV)

1.2.1. Funcionamiento de un panel solar FV

1.2.1.1. Partes de un panel solar FV

1.2.2. Principales tipos de paneles solares FV

1.2.2.1. Paneles solares FV policristalinos

1.2.2.2. Paneles solares FV monocristalinos

1.2.2.3. Tipos de paneles FV en el mercado guatemalteco

1.2.2.3.1. Jinko solar

1.2.2.3.2. Q Cells

- 1.2.2.3.3. LONGi solar
 - 1.2.3. Ciclo de vida de un panel solar FV
 - 1.2.3.1. Minería materia prima y procesamiento del material
 - 1.2.3.2. Fabricación y ensamblaje
 - 1.2.3.3. Operación, remoción y recuperación
 - 1.2.3.4. Disposición final
- 1.3. Sistemas para la generación de energía eléctrica fotovoltaica
 - 1.3.1. Sistema fotovoltaico conectado a la red de distribución
 - 1.3.1.1. Ventajas y desventajas de un sistema Fotovoltaico conectado a la red
 - 1.3.2. Sistema fotovoltaico autónomo
 - 1.3.2.1. Ventajas y desventajas de un sistema fotovoltaico autónomo
 - 1.3.3. Consideraciones en la instalación de paneles solares en un sistema conectado a la red de distribución
 - 1.3.4. Pasos para convertirse en un usuario autoproduccion y generador distribuido renovable utilizando paneles solares fotovoltaicos
- 1.4. Generación de energía eléctrica fotovoltaica a nivel mundial
 - 1.4.1. Participación de la energía eléctrica fotovoltaica en la matriz energética mundial
 - 1.4.2. Energía eléctrica fotovoltaica en Guatemala
- 1.5. Generación de CO₂ en Guatemala debido a la producción de energía eléctrica
- 1.6. Plan de expansión del sistema de generación de energía en Guatemala

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 2.1. Potencial de energía eléctrica generada por metro cuadrado de panel
 - 2.1.1. Potencial de generación de energía eléctrica por metro cuadrado
 - 2.1.2. Potencial de generación de energía eléctrica por metro cuadrado en cada cabecera municipal
 - 2.2. Kilogramos equivalentes de CO₂ reducidos por cada metro cuadrado de panel implementado
 - 2.2.1. Kilogramos de CO₂ equivalente producidos por cada KWh generado según matriz energética de Guatemala
 - 2.2.2. Determinación de cuantos KWh de energía se producen por metro cuadrado de panel
 - 2.2.3. Reducción de CO₂ al año por metro cuadrado de panel
 - 2.3. Tiempo necesario de operación del panel para recuperar los kilogramos de CO₂ equivalentes generados en su ciclo de vida
 - 2.3.1. Kilogramos de CO₂ equivalente generado por KW de potencia de panel instalado
 - 2.3.2. Determinación de cuantos KW de potencia posee un metro cuadrado de panel
 - 2.3.3. Determinación de cuánto tiempo de operación del panel es necesario para recuperar el CO₂ equivalente que se genera en su ciclo de vida
 - 2.4. Beneficio económico que se podría obtener por implementar cada metro cuadrado de panel
 - 2.4.1. Elaboración del flujo de caja
 - 2.4.2. Determinación de VAN

2.4.3. Determinación de TIR

3. RESULTADOS

- 3.1. Irradiación global directa en Guatemala
 - 3.1.1. Irradiación global directa promedio anual en el departamento de Guatemala
 - 3.1.2. Irradiación global directa promedio mensual por cabecera departamental
- 3.2. Potencial de generación de energía eléctrica por metro cuadrado de panel implementado
 - 3.2.1. Promedio diario, mensual y anual en el departamento de Guatemala
 - 3.2.2. Promedio mensual por cabecera municipal
- 3.3. Reducción de CO₂ equivalente por metro cuadrado de panel solar implementado
 - 3.3.1. Reducción de CO₂ promedio anual en el departamento de Guatemala
 - 3.3.2. Reducción de CO₂ promedio anual por cabecera municipal en el departamento
- 3.4. Beneficio económico que se podría generar por implementar cada metro cuadrado de panel fotovoltaico
 - 3.4.1. Flujo de caja por metro cuadrado de panel fotovoltaico implementado
 - 3.4.2. VAN por metro cuadrado de panel fotovoltaico implementado
 - 3.4.3. TIR por metro cuadrado de panel fotovoltaico implementado

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

La presente investigación es de tipo cuantitativa-descriptiva, la cual el proceso de solución se adopta a un diseño no experimental, considerando evaluar cuantitativamente cuáles son los beneficios ambientales y económicos al implementar paneles solares fotovoltaicos calculando el potencial de generación eléctrica utilizando el mapa interactivo Global Solar Atlas del banco mundial y las especificaciones técnicas según el fabricante del panel a referenciar.

Con esto se cuantificará la reducción de gramos de CO₂ equivalente que se generan al reducir el consumo eléctrico de la red nacional, también se estimará el tiempo de compensación del CO₂ equivalente generado en el ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos y también se utilizarán indicadores de rentabilidad como lo es el VAN y la TIR utilizando un flujo de caja para verificar el beneficio económico que se obtiene con esta implementación en el territorio del departamento de Guatemala. El alcance de esta investigación no comprobará una hipótesis.

9.2. Unidades de análisis

La población en estudio será el departamento de Guatemala el cual está dividido en 17 municipios y utilizando un muestreo intencional se estudiarán los diferentes valores de irradiancia solar directa que se tiene en cada cabecera municipal del departamento.

9.3. Variables

Las diferentes variables que se tienen en el estudio se describen a continuación:

Tabla VI. **Variables de estudio**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Generación de energía eléctrica por metro cuadrado	La generación de la energía eléctrica por metro cuadrado es generada por los paneles solares FV por medio de la conversión del fenómeno fotoeléctrico.	La generación de la energía eléctrica se calculará por medio de la irradiancia directa normal que se tiene en el sitio de estudio tomando en cuenta la eficiencia de conversión del panel y el resultado estará dado en KWh/m ²
Reducción de kilogramos equivalentes de CO ₂	Los kilogramos equivalentes de CO ₂ se utilizan para denotar la cantidad de gases de efecto invernadero que se genera por alguna actividad humana.	La reducción de gases de efecto invernadero se calcularán conforme cuantos kilogramos de CO ₂ equivalentes se generan por KWh de energía consumida y el resultado estará dado en kilogramos CO ₂ equivalentes
Tiempo de recuperación de los kilogramos CO ₂ equivalentes	El tiempo de recuperación de los kilogramos de CO ₂ equivalentes es una medida utilizada para denotar el tiempo en el cual se reduce el impacto generado por la utilización de una tecnología.	El tiempo de recuperación se calculará conforme cuantos gramos de CO ₂ equivalentes se generan en el ciclo de vida de los paneles solares FV y el resultado estará dado en años.

Continuación de tabla VI.

VAN y TIR	El valor actual neto y la TIR son indicadores económicos para evaluar viabilidad de proyectos.	El valor actual neto es calculado según ecuaciones que se describirán en esta sección y el cálculo de la TIR se realizará por medio del software Microsoft Excel® y los resultados estarán dados en valor moneda para el VAN y porcentaje para la TIR
-----------	--	---

Fuente: elaboración propia.

9.4. Fases del estudio

Se describirán a continuación cuatro fases del estudio.

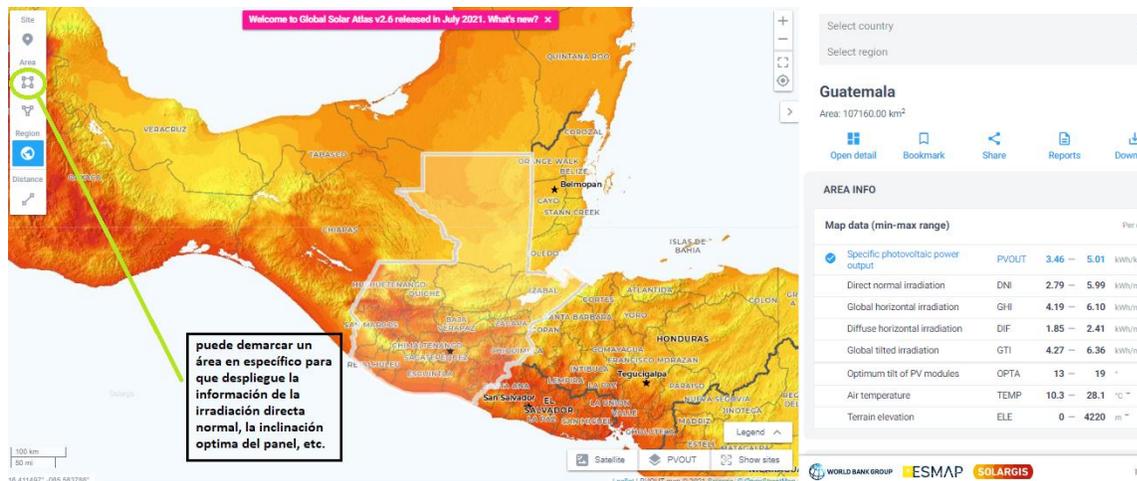
9.4.1. Fase 1: Exploración bibliográfica

En la primera fase se realizará una consulta de todas las bibliografías posibles relacionadas al tema, para enriquecer los conocimientos sobre los paneles solares fotovoltaicos como por ejemplo como convierten la radiación solar en energía eléctrica, diferentes tipos que hay en el mercado, cuanto CO2 equivalente se genera en el ciclo de vida, como se calcula el potencial de generación según la radiación solar que se tienen en un lugar específico, entre otros. También se consultará cual es la matriz actual de generación eléctrica de Guatemala, cual es el impacto de esta en generación de CO2 equivalente que genera el país por el consumo de esta y la situación actual a nivel mundial de la generación de energía eléctrica.

9.4.2. Fase 2: Utilización del mapa interactivo global solar atlas para el cálculo del potencial de generación eléctrica por metro cuadrado de panel solar fotovoltaico

Con base en la información investigada y utilizando el mapa interactivo Global Solar Atlas del banco mundial se utilizará para demarcar el área del departamento de Guatemala para que despliegue la información de la irradiación normal directa, la inclinación óptima, a la cual deben de instalarse los paneles y demás información.

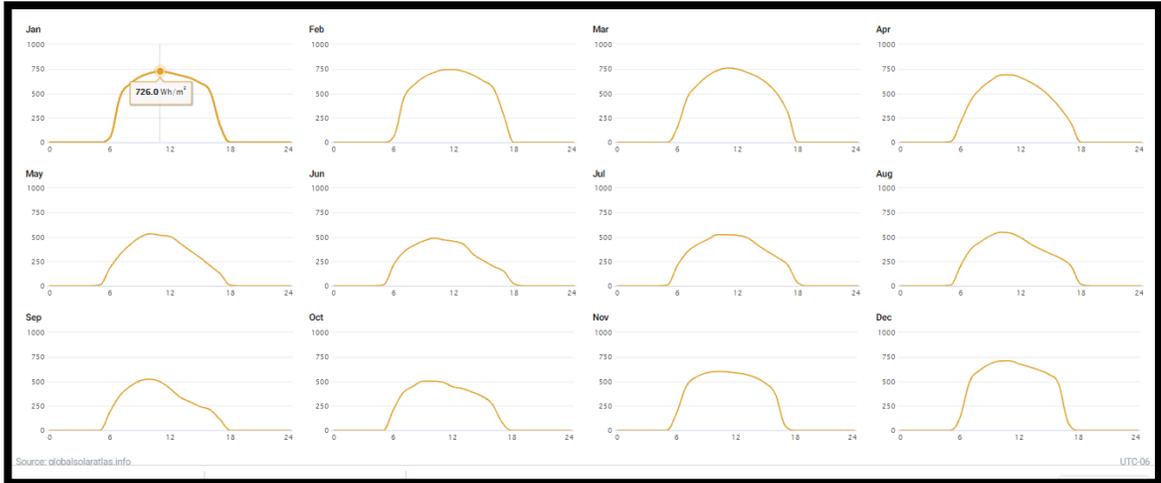
Figura 24. Como demarcar un área en el mapa interactivo Global Solar Atlas



Fuente: elaboración propia, utilizando Solargis.

Luego se utilizará para que despliegue la irradiación normal directa promedio por hora en cada mes para las cabeceras municipales en el departamento de Guatemala.

Figura 25. Información dada por mapa interactivo Global Solar Atlas en cabecera municipal de ciudad de Guatemala



Fuente: elaboración propia, utilizando Solargis.

Obteniendo la información anterior para cuantificar el potencial de generación por metro cuadrado de panel solar fotovoltaico se utilizará la siguiente ecuación y se llenará la siguiente tabla para documentar los resultados de irradiación directa normal para cada cabecera municipal del departamento de Guatemala por mes:

$$PIDNM = \left(\sum_0^{24} IDNH \right) * DM$$

Donde:

PIDNM = Promedio Irradiancia Directa Normal por Mes

IDNH= Irradiancia Directa Normal por Hora

DM = Cantidad de Días por Mes

Tabla VII. **Promedio irradiancia directa normal por mes**

Cabecera Municipal	Coordenadas utilizadas	Promedio Irradiancia por mes												Promedio Anual
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Guatemala														
Santa Catarina Pinula														
San José Pinula														
San José del Golfo														
Palencia														
Chinautla														
San Pedro Ayampuc														
Mixco														
San Pedro Sacatepequez														
San Juan Sacatepequez														
San Raymundo														
Churranchito														
Fraijanes														
Amatitlán														
Villa Nueva														
Villa Canales														
San Miguel Petapa														

Fuente: elaboración propia.

Luego de obtener la información del promedio de la irradiancia normal directa por mes es necesario tener la siguiente información técnica del panel solar fotovoltaico a utilizar como referencia, la información necesaria esta descrita en la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Características del panel solar fotovoltaico a referenciar**

Características panel solar fotovoltaico	
Característica	valor
Radiación Standard (w/m2)	
Eficiencia del módulo (%)	
área (m2)	
Potencia Máxima del Panel (w)	

Fuente: elaboración propia.

Para finalmente cuantificar el potencial de generación eléctrica promedio mensual por cabecera municipal y promedio del departamento de Guatemala utilizando la siguiente ecuación:

$$GEPM = \frac{PIDNM * EM}{100}$$

Donde:

GEPM = Potencial de Generación Eléctrica Promedio Mensual por metro cuadrado (kWh/m²)

PIDNM = Promedio Irradiancia Directa Normal por Mes (kWh/m²)

EM = Eficiencia del Módulo (%)

Tabla IX. **Potencial de generación mensual de energía eléctrica según irradiancia directa normal por mes y especificaciones de panel solar**

Potencial de generación eléctrica total mensual por metro cuadrado de panel solar fotovoltaico en Watts														
Cabecera Municipal	Coordenadas utilizadas	Ene	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total Anual
		Guatemala												
Santa Catarina Pinula														
San José Pinula														
San José del Golfo														
Palencia														
Chinautla														
San Pedro Ayampuc														
Mixco														
San Pedro Sacatepequez														
San Juan Sacatepequez														
San Raymundo														
Chuarrancho														
Fraijanes														
Amatitlán														
Villa Nueva														
Villa Canales														
San Miguel Petapa														

Fuente: elaboración propia.

9.4.3. **Cálculo de los kilogramos equivalentes de CO₂ que se pueden reducir por metro cuadrado de panel fotovoltaico implementado**

La segunda fase se cuantificarán cuántos kilogramos equivalentes de CO₂ se reducen por cada metro cuadrado implementado de panel solar fotovoltaico, esto en primera instancia se verificará la última matriz anual contabilizada en Guatemala tomando en cuenta cada tecnología de generación de energía eléctrica que posee el país y utilizando la siguiente tabla tomada del último

balance energético realizado por el MEM la cual se utilizará para calcular cuánto CO₂ equivalente se produjo por kWh de energía producida.

Tabla X. **Coefficientes de emisión de CO₂e de la generación eléctrica por tipo de combustible**

Generación por tipo de Combustible 2019	Factor de Emisión [Kg CO ₂ e / kWh]
Carbón Mineral	1.1682
Fuel Oil	0.6143
Bagazo de Caña	0.0260
Biogás	0.0007
Diesel Oil	4.7148
Leña	0.000
Hidroenergía	0.0000
Geoenergía	0.0000
Solar Fotovoltaica	0.0000
Eólica	0.0000

Fuente: Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Balance Energético 2019*.

Con la información anterior y tomando en cuenta la última matriz energética por tecnología contabilizada en Guatemala se cuantificará cuantos kilogramos de CO₂ equivalente se producen por kWh de energía producida en el país, luego se hará una relación conforme cuanto se produce de energía eléctrica por metro cuadrado de panel solar fotovoltaico implementado por año para calcular cuántos Kg de CO₂ equivalente se mitigan por año, este cálculo se utilizará para cuantificar el beneficio según ubicación en el promedio del departamento de Guatemala y según cada cabecera municipal del departamento.

Para calcular el factor de emisión tomando en cuenta toda la matriz de generación de energía eléctrica de Guatemala se utilizará la siguiente tabla:

Tabla XI. **Cálculo de factor de emisión por generación de energía eléctrica (Kg CO₂eq / kWh)**

Tipo de combustible	Factor de Emisión [Kg CO ₂ e / kWh]	Porcentaje de participación de matriz energética	Factor de Emisión Ponderado [Kg CO ₂ e / kWh]
Carbón Mineral	1.1682		
Fuel Oil	0.6143		
Bagazo de Caña	0.0260		
Biogás	0.0007		
Diesel Oil	4.7148		
Leña	0.0000		
Hidroenergía	0.0000		
Geoenergía	0.0000		
Solar Fotovoltaica	0.0000		
Eólica	0.0000		
		Factor de Emisión por generación de energía eléctrica [Kg CO₂e / kWh]	

Fuente: elaboración propia.

9.4.4. Cuantificar cuál es el tiempo necesario de operación de los paneles solares fotovoltaicos para la recuperación de los kilogramos de CO₂ generados en el ciclo de vida de estos

La tercera fase se cuantificará cuál es el tiempo en el cual se recuperan los Kg de CO₂ equivalentes generados en el ciclo de vida del panel para lo cual se tomará el valor según Louwen, (2016) que en estudios recientes, utilizando datos armonizados, se obtiene que la generación de CO₂ equivalentes producido

por el ciclo de vida de un sistema fotovoltaico con paneles solares fotovoltaicos monocristalinos, está dada por el valor de 25 gCO₂-eq/kWh.

Este dato está referido en condiciones estandarizadas tomando en cuenta las directrices metodológicas según Fthenakis, Vasilis (2011) calculado con una insolación de 1,700 kWh/m y una relación de rendimiento (PR) de 0.75, por lo que este valor es necesario darle tratamiento para convertirlo en gramos de CO₂ equivalentes por kilowatt de potencia instalado y esta potencia a su vez convertirla en metros cuadrados de panel solar fotovoltaico implementado según especificaciones técnicas del panel a referenciar.

9.4.5. Fase 5: Beneficio económico

En esta fase se utilizarán diferentes criterios de inversión para calcular el beneficio económico que se pudiera obtener por cada metro cuadrado de panel solar implementado.

9.4.5.1. Elaboración de flujo de caja

En la cuarta fase se tomará en cuenta la cotización de un proveedor de sistemas fotovoltaicos en Guatemala para la inversión inicial del sistema y se utilizará la generación como también el desgaste de los paneles según especificaciones del panel fotovoltaico utilizado en las fases anteriores, se consultará a su vez la página oficial de la CNEE para obtener los costos de energía eléctrica, según el pliego tarifario de tarifa baja tensión no social BTS y baja tensión autoprodutores BTSA. Con la información anterior se realizará un inventario de consumo de energía eléctrica para una familia de 4 miembros para realizar una ejemplificación real, la información anterior se recopilará en las siguientes tablas para crear el flujo de caja.

Tabla XII. **Cálculo de consumo eléctrico en una vivienda**

Consumo eléctrico en Vivienda					
Ambiente de vivienda	Aparato o equipo	Potencia del equipo (Kw)	Cantidad (unidades)	Horas de uso al día (hora)	Consumo por día (KWh)
				Total Consumo diario	
				Total Consumo mensual	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Tabla para elaborar flujo de caja**

Flujo de Caja									
Año	Gasto (Inversión (Q), Mantenimiento, etc.)	Justificación gasto	Consumo energético (KWh/año)	Valor del KWh (BTS)	Valor KWh (BTSA)	Generación Eléctrica de sistema (Kwh)	Gasto Anual sin implementación (Q)	Gasto Anual con Implementación (Q)	Diferencia (Q)
0									
1									
2									
3									
4									
5									
.									
.									
.									
.									
						Totales			

Fuente: elaboración propia.

9.4.5.2. Cálculo del VAN y la TIR

Para el cálculo del VAN y la TIR se tomará en referencia el flujo de caja anterior y se aplicarán fórmulas descritas por Solé (2011) para el cálculo del VAN y para el cálculo de la TIR se utilizará el programa Microsoft Excel®, también se tomará en cuenta la inflación del último año para el valor de la tasa de descuento.

$$VAN = \sum_n FC_t(1 + d)^n - I_0$$

Donde:

VAN= Valor Actual Neto

FC_t = Flujos netos de caja en los períodos desde t = 1 hasta t = n.

I₀ = Inversión inicial en el momento cero

d = Tasa de descuento o costo de capital

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Al obtener los datos del estudio se procederá a utilizar estadística descriptiva para la obtención de la media aritmética de los valores por cabecera municipal en el departamento de Guatemala y se utilizará matriz de datos para denotar los resultados. Para ello se utilizarán las siguientes herramientas:

- Gráficos de barras para ilustrar y comparar la irradiancia directa normal por cabecera municipal y promedio del departamento de Guatemala.
- Tablas de datos del potencial de generación eléctrica promedio mensual por metro cuadrado (kWh/m²) por cabecera municipal.
- Tablas de datos de los kilogramos equivalentes de CO₂ se pueden reducir por metro cuadrado de panel fotovoltaico por cabecera municipal.
- Tablas de datos del tiempo en el que se recupera del CO₂ equivalente generados en el ciclo de vida del panel fotovoltaico al implementarlo por cabecera municipal.
- Tablas de datos del valor del VAN y la TIR para un mismo sistema fotovoltaico implementado en cada una de las cabeceras municipales del departamento.

Las herramientas estadísticas por utilizar serán:

Medidas de tendencia central: debido a que se reunirán datos de las cabeceras municipales y el total del departamento de Guatemala, se realizarán los cálculos para determinar la media aritmética y sus desviaciones de cada cabecera municipal con la media aritmética del departamento de Guatemala.

11. CRONOGRAMA

Tabla XIV. Cronograma de actividades

d	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	21	18 abr '21			25 jul '21			31 oct '21		06 feb '22			15 may '22
					J	L	V	M	S	X	D	J	L	V	M		
1	Desarrollo de la idea y planteamiento del problema	22 días	lun 17/05/21	mar 15/06/21													
2	Tarea 1 Elaborar arbol de problemas.	2 días	lun 07/06/21	mar 08/06/21													
3	Tarea 2 Desarrollo del planteamiento del problema	6 días	mar 08/06/21	mar 15/06/21													
4	Desarrollo del Anteproyecto	26 días	jue 01/07/21	jue 05/08/21													
5	Desarrollo del Protocolo	52 días	sáb 21/08/21	dom 31/10/21													
6	Objetivo Especifico 1	44 días	mié 01/12/21	lun 31/01/22													
7	Tarea 1 exploración bibliográfica	33 días	mié 01/12/21	vie 14/01/22													
8	Tarea 2 utilización del mapa interactivo Global Solar Atlas para el cálculo del potencial de generación eléctrica por metro cuadrado de panel solar fotovoltaico	5 días	lun 17/01/22	vie 21/01/22													
9	Tarea 3 Calcular el promedio irradiancia directa normal por mes promedio del departamento y por cabecera municipal	5 días	lun 24/01/22	vie 28/01/22													
10	Objetivo Especifico 2	11 días	mar 01/02/22	mar 15/02/22													
11	Tarea 1 Buscar en la web del MEM el último informe del Balance energético nacional	5 días	mar 01/02/22	lun 07/02/22													
12	Tarea 2 Investigar en el balance energético el CO2 equivalente que se genera por KWh de energía eléctrica y buscar la generación total del último año por tecnología en el AMM	6 días	mar 08/02/22	mar 15/02/22													
13	Tarea 3 Calcular cuántos kilogramos equivalentes de CO2 se pueden reducir por metro cuadrado de panel fotovoltaico implementado tomando en cuenta el potencial de generación.	5 días	mar 15/02/22	dom 20/02/22													

Continuación de la tabla XIV.

14	Tarea 4 Revisar Resultado de cálculo con asesor.	6 días	lun 21/02/22	lun 28/02/22				■	
15	Objetivo Especifico 3	1 día	mar 15/03/22	mar 15/03/22				■	
16	Tarea 1 Buscar en las referencia Bibliográficas el valor de cuantos Kg de CO2 equivalentes por KWh de energía producida generan los paneles fotovoltaicos por el ciclo de vida de los	6 días	mar 01/03/22	mar 08/03/22				■	
17	Tarea 2 Transformar los Kg CO2 equivalentes por KWh hacia Kg de CO2 equivalentes por Wp de panel Fotovoltaico instalado y luego calcular el valor Wp hace m2 de Panel	6 días	mar 08/03/22	mar 15/03/22				■	
18	Tarea 3 Revisar el cálculo con asesor	2 días	dom 13/03/22	lun 14/03/22				■	
19	Objetivo Especifico 4	34 días	mié 16/03/22	lun 02/05/22				■	
20	Tarea 1 Revisar en el mercado dos proveedores de paneles solares y precio de los mismos.	12 días	mié 16/03/22	jue 31/03/22				■	
21	Tarea 2 Revisar los pliegos tarifarios aplicables al estudio.	3 días	vie 01/04/22	mar 05/04/22				■	
22	Tarea 3 Realizar flujo de caja con la inversión inicial y el ahorro energético según pliegos tarifarios	8 días	mié 06/04/22	vie 15/04/22				■	
23	Tarea 4 Calcular VAN y TIR con el tiempo de vida útil de los paneles tomando en cuenta mantenimiento necesario según proveedor.	8 días	vie 15/04/22	mar 26/04/22				■	
24	Tarea 5 Revisar resultados obtenidos con asesor	5 días	mar 26/04/22	lun 02/05/22				■	
25	Desarrollo de Resultados y discusión de resultados	22 días	dom 01/05/22	lun 30/05/22				■	

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizará en primera instancia con información de investigaciones previas enfocadas en el desarrollo como la implementación de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica, así como también la disponibilidad del mapa interactivo del Banco Mundial Global Solar Atlas que es una herramienta gratis para poder calcular el potencial de sistemas fotovoltaicos y con recursos propios del investigador. Siendo la investigación descriptiva, se tendrán en cuenta los siguientes recursos:

12.1. Recurso humano

Para realizar la investigación se cuentan con el conocimiento y experiencia tanto del asesor como el investigador y las diferentes investigaciones referenciadas para el correcto desarrollo de los objetivos.

Figura 26. **Recursos necesarios para el desarrollo de la investigación**



Fuente: elaboración propia.

12.2. Recursos financieros

A continuación, se denotan los recursos financieros necesarios para el desarrollo de la investigación los cuales serán proporcionados por el investigador y el asesor.

Tabla XV. Consumo de energía eléctrica

Recurso	Potencia (w)	Cantidad de Tiempo (h)	Total KWh	Precio KWh (EGGSA)	Costo
Consumo Eléctrico Laptop Investigador	300	270	81	1.321121	Q 107.01
Consumo Eléctrico Laptop Asesor	300	48	14.4	1.321121	Q 19.02
Consumo eléctrico Iluminación Investigador	4	270	1.08	1.321121	Q 1.43
Consumo Eléctrico Iluminación Asesor	4	48	0.192	1.321121	Q 0.25
TOTAL			96.672		Q 127.72

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Otros gastos relacionados a la Investigación**

Recurso		Precio unitario Recurso	Unidades necesarias		Total
Internet residencial investigador	Q	200.00	9	Q	1,800.00
Internet residencial asesor	Q	200.00	6	Q	1,200.00
Documentos impresos	Q	300.00	1	Q	300.00
Total				Q	3,300.00

Fuente: elaboración propia.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

REFERENCIAS

1. Alonso, J. (19 de agosto, 2020). *Radiación Solar* [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulo/radiación-solar>.
2. Administrador Mercado Mayorista (2020). *Informes Anuales Mercado Mayorista*. Guatemala: Autor.
3. Barberá Santos, D. (s.f.). *Introducción a la Energía Fotovoltaica*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70271/fichero+INTRODUCCI%C3%93N+A+LA+ENERG%C3%8DA+FOTOVOLT AICA%252FIntroducci%C3%B3n+a+la+Energ%C3ADA+Fotovoltaica.pd_dev.php/fedora/asset/eoi:45337/componente45335.pdf.
4. Carmona, O. y Vidal, A. (mayo, 2016). *Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de un sistema de autoconsumo eléctrico basado en paneles fotovoltaicos para una vivienda (Artículo Científico)*. Colombia: Institución Universitaria Salazar y Herrera. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5704160>.
5. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2014). *Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores Con Excedentes de Energía (NTGDR)*. Guatemala: Autor.

6. Diaz, L. y Urrea, Y. (2018). *Viabilidad económica de la implementación de paneles fotovoltaicos como alternativa para la red de distribución eléctrica tradicional* (Tesis de especialización). Universidad Libre Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/19208/CD%20EGA%101018%200005.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
7. Energy Market Authority (2011). *Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems*. Singapore: Autor.
8. European commission (2009). *Photovoltaic Solar Energy Development and current research*. Union Europea: Autor.
9. Fthenakis, V.; Raugei, M.; Frishknecht, R. y Kim, H. (2011). *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity*. USA: IEA International Energy Agency.
10. Gecko Solar. (2021). *Equipo solar México*. Gecko solar. Recuperado de <https://geckosolarmexico.mx/equipo-solar-mexico/>.
11. Herrarte, J. (julio, 2020). *Gestión Integral de Desechos de Paneles Fotovoltaicos de Silicio* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <https://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/>.
12. Jäger, K.; Olindo, I.; Smets, A. y Schropp, R. (2014). *Solar Energy Fundamental, technology and, Systems*. Delft, Netherlands: Delft University of Technology.

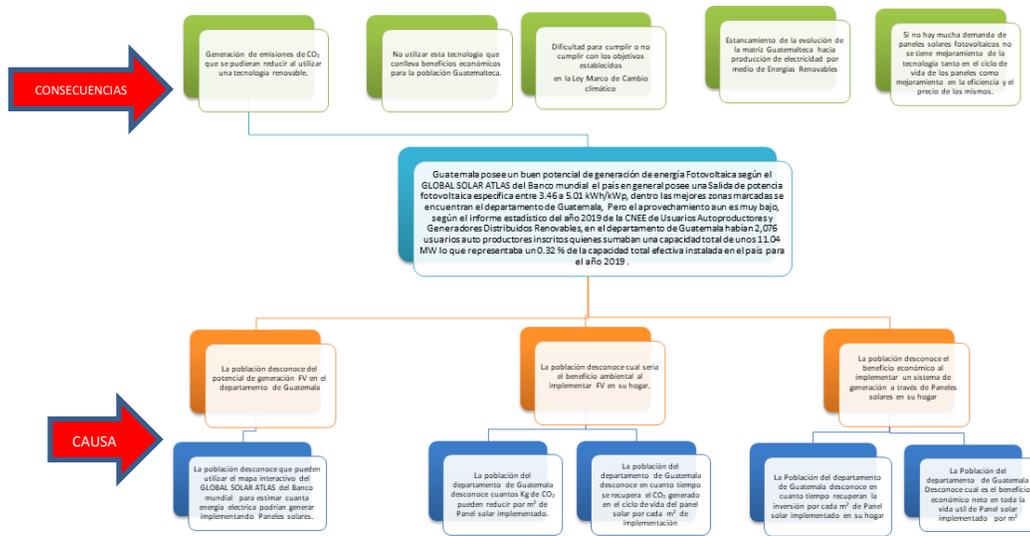
13. Jinko Solar (1 de octubre de 2021). *Why Jinko Solar?* [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://jinkosolar.eu/en/why-jinko.html>.<https://en.longi-solar/en/why-jinko.html>.
14. Jones, D. (marzo, 2021). *Global Electricity Review 2021 Global Trends*. EMBER. Recuperado de <https://www.ember.climate.org/wp-content/uploads/2021/03/Global-Electricity-Review-2021-traslation-spanish.pdf>.
15. LONGi Solar (1 de octubre de 2021). *About LONGi Solar*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://en.longi-solar.com/home/about/index.html>.
16. Louwen, A.; van Sark, W.; Faaij, A. y Schropp, R. (2016). *Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaics development*. Estados Unidos: Nature Communications, DOI: 10.1038/ncomms13728.
17. Ministerio de Energía y Minas (2019). *Balance energético 2019*. Guatemala: Autor.
18. Ministerio de Energía y Minas (2018). *Energía solar en Guatemala*. Guatemala: Autor.
19. Ministerio de Energía y Minas (2020). *Informe General 2020*. Guatemala: Autor.
20. Ministerio de Energía y Minas (2020). *Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2020 - 2050*. Guatemala: Autor.

21. Ministerio de Energía y Minas (2016). *Plan Nacional de Energía 2017-2032*. Guatemala: Autor.
22. Palacios, J. y Morales, A. (septiembre, 2017). Productividad de paneles solares monocristalinos. *Memorias del XXIII congreso Internacional anual de la SOMIM*, Cuernavaca, Morelos, México. Recuperado de https://somim.org.mx/memorias/memorias2017/articulos/A5_148.pdf.
23. Perpiñán Lamigueiro, O. (2 de noviembre, 2020). *Energía solar fotovoltaica*. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>.
24. Q Cells (1 de octubre de 2021). *Why Q Cells?* [Mensaje en un blog]. Recuperado de https://q-cells.com/en/main/about/why_qcells~why_qcells~.html.
25. Rojas, I. y Lizana, F. (mayo, 2018). Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino en Costa Rica. *Revista de Ingeniería Energética*, 39(3), 195-202.
26. Salazar, C. (junio, 2017). *Estudio de factibilidad para la implementación de paneles fotovoltaicos en el recinto Sabanilla – Cantón Daule* (Tesis de licenciatura). Universidad de Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/17917/1/TESIS%20PROPUESTA%20DE%20IMPLEMENTACION%20DE%20PANELES%20FOTOVOLTAICOS%20RECINTO%20SABANILLA%20final.pdf>.

27. Solé, R. (2011). Técnicas de Evaluación de Flujos de Inversión. Mitos y Realidades. *Ciencias Económicas* (29) 12-111.
28. Sugianto, P. (marzo, 2020). Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline. *INTEK Jurnal Penelitian*, 7(2), 92-100.

APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

PREGUNTA PRINCIPAL		OBJETIVO GENERAL		PLAN DE INVESTIGACIÓN	
PG	¿Cuáles son los beneficios ambientales y económicos en la implementación de energía renovable mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos conectados a la red de distribución nacional de energía eléctrica en el departamento de Guatemala?	OG	Cuantificar los beneficios ambientales y económicos que se obtienen al implementar paneles solares fotovoltaicos conectados al sistema de distribución de energía eléctrica nacional en el departamento de Guatemala	HG	A través de cumplir los objetivos específicos llevando a cabo el plan de investigación empleando el mapa interactivo del GLOBAL SOLAR ATLAS del Banco mundial para obtener el potencial de generación, la última matriz de generación eléctrica contabilizada, tomar de referencia estudio de cuanto CO2 equivalente se produce por kWh de generación en el ciclo de vida del panel fotovoltaico y herramientas financieras.
PREGUNTAS AUXILIARES		OBJETIVOS ESPECÍFICOS		PLAN DE INVESTIGACIÓN	
PE1	¿Cuánta energía eléctrica podría generar por metro cuadrado de panel implementado en el departamento de Guatemala?	OE1	Determinar cuánta energía eléctrica se podría generar al implementar cada metro cuadrado de panel solar fotovoltaico.	PI1	Utilizando el mapa interactivo del GLOBAL SOLAR ATLAS del Banco mundial , con ayuda de este mapa se puede calcular el potencial de generación en un área en específico mensualmente y anualmente. Con este mapa interactivo se obtendrá el Potencial de generación (kWh/kWp) del departamento de Guatemala

Continuación del apéndice 2.

PE2	¿Cuántos Kilogramos equivalentes de CO ₂ se pueden reducir por metro cuadrado de panel fotovoltaico implementado en el departamento de Guatemala?	OE2	Calcular cuántos kilogramos equivalentes de CO ₂ se pueden reducir por implementar cada metro cuadrado de panel solar fotovoltaico.	PI2	Tomando en cuenta la generación potencial que se tiene por metro cuadrado de panel, sabiendo cuanto se produce de energía eléctrica por año por metro cuadrado de panel implementado, se va a comparar conforme la última matriz anual contabilizada de generación eléctrica de Guatemala y cuanto CO ₂ se generaría por utilizar dicha cantidad de energía eléctrica del sistema eléctrico nacional tomando en cuenta los coeficientes de CO ₂ equivalente se generan por kWh de energía eléctrica producido por tecnología utilizada.
PE3	¿Cuál es el tiempo de recuperación de los kilogramos de CO ₂ equivalentes generados en el ciclo de vida del panel fotovoltaico al implementarlos en el departamento de Guatemala?	OE3	Cuantificar cuál es el tiempo necesario de operación del panel solar fotovoltaico para recuperar el CO ₂ equivalente que se genera en el ciclo de vida del mismo.	PI3	Tomando como referencia el valor de cuanto CO ₂ equivalente se genera por kWh de energía producida de panel fotovoltaico y transformando ese valor a CO ₂ equivalente por Watt de potencia y cuanto equivale dicha potencia en un metro cuadrado de panel y comparando esta con la reducción de CO ₂ que se obtiene por año.
PE4	¿Cuál es el beneficio económico que se podría generar por implementar cada metro cuadrado de panel solar en el departamento de Guatemala?	OE4	Determinar cuál es el beneficio económico que se podría generar por implementar cada metro cuadrado de panel solar.	PI4	Se Utilizarán los pliegos tarifarios aplicables en el departamento de Guatemala y tomando en cuenta indicadores financieros como el VPN, TIR y un flujo de caja tomando en cuenta la inversión inicial.

Fuente: elaboración propia.

