

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TESIS

**“IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA
FOTOVOLTAICO DE 4.44 KW EN UNA RESIDENCIA CON
TARIFA 1B”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**PRESENTA:
LUIS ALBERTO DE LA TORRE GÓMEZ**

**DIRECTORES DE TESIS:
MTRO. ÓSCAR MARTÍNEZ AGUIRRE
DR. YANHSY HERNÁNDEZ PORTILLO**

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

05 DE NOVIEMBRE DEL 2025



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA GENERAL
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
03 de noviembre del 2025

C. Luis Alberto de la Torre Gómez

Pasante del Programa Educativo de: Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:
Implementación y Evaluación de un Sistema Fotovoltaico de 4.44 kW en una Residencia con
Tarifa 1B.

En la modalidad de: Tesis Profesional

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

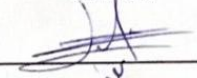
Revisores

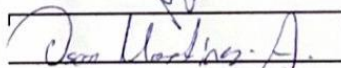
Dr. Luis Alberto Hernández Domínguez

Dra. Aracely López Grijalva

Mtro. Óscar Martínez Aguirre

Firmas:





Ccp. Expediente

DEDICATORIA

En primer lugar, es un honor para mí dedicar y expresar mi más profundo agradecimiento a mi abuelita cuyo amor y apoyo han sido fundamental en esta etapa de mi vida.

A mis padres, les debo todo lo que soy, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus sacrificios silenciosos que me permitieron llegar hasta este momento.

Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y la humildad.

Este logro no solo es mío, sino también de ustedes, que con su ejemplo me inspiraron a alcanzar mis metas y nunca rendirme ante las dificultades.

Con todo mi amor y gratitud, les dedico este trabajo como una muestra del profundo agradecimiento que tengo por todo lo que han hecho por mí.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores, por su orientación, paciencia y dedicación a lo largo de este proyecto. Sus conocimientos, consejos y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de esta tesis.

A la Universidad, por brindarme las herramientas, los recursos y el espacio académico que hicieron posible mi formación profesional. Gracias por fomentar en mí el pensamiento crítico, la responsabilidad y el deseo de superación.

A todos mis maestros, quienes con su experiencia, enseñanzas y apoyo contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico y personal. Cada clase, consejo y ejemplo dejaron una huella valiosa en mi vida profesional.

A mi novia, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante este proceso. Gracias por acompañarme en este camino.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Abstract.....	2
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	3
1.1. Introducción	3
1.2. Antecedentes.....	4
1.2.1. La Industria Solar en el Mundo	4
1.2.2 Sistemas Fotovoltaicos Industriales	4
1.2.3 Sistemas Fotovoltaicos Comerciales.....	5
1.2.4 Sistemas Fotovoltaicos Residenciales.....	7
1.2.5. Impacto Ambiental de la Energía Solar Fotovoltaica.....	8
1.2.6 Implementación de Sistemas Fotovoltaicos	8
1.3. Problemática.....	10
1.4. Hipótesis.....	11
1.5. Justificación	11
1.6. Objetivos	11
1.6.1. Objetivo General.....	11
1.6.2. Objetivos Específicos.....	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Introducción	13
2.2. El Sol.....	14
2.3. Energías Renovables y su Importancia	15
2.3.1. Energía Solar	15
2.3.2. Energía Eólica.....	15
2.3.3. Hidroeléctrica	15
2.3.4. Energía Geotérmica	15
2.3.5. Energía de la Biomasa	16
2.3.6. Energía Marina	17
2.3.7. Ventajas de las Energías Renovables	18
2.4. Tipos de Energía Solar y Funcionamiento.....	19
2.4.1. Energía Térmica	19

2.4.2. Energía Solar Fotovoltaica.....	19
2.5. Potencial de la Energía Solar en México	19
2.5.1. Radiación Solar en México	20
2.5.2 Zonificación Solar y Regiones con Mayor Potencial	21
2.6. Sistema Solar Fotovoltaico	22
2.6.1. Tipos de Módulos Fotovoltaicos y Conexiones	22
2.7. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos.....	24
2.7.1. Sistema Fotovoltaico Interconectado	24
2.7.2. Sistema Fotovoltaico Aislado	24
2.7.3. Sistema Fotovoltaico Híbrido.....	25
2.8. Componentes Principales de un Sistema Fotovoltaico	26
2.8.1. Módulos Fotovoltaicos	26
2.8.2. Estructuras de Soporte de los Módulos.....	26
2.8.3. Cables Eléctricos.....	26
2.8.4. Inversor	26
2.8.5. Protecciones.....	27
2.8.6. Medidor Bidireccional.....	27
2.8.7. Tierra Física.....	27
2.9. Factores a Considerar para la Instalación de un Sistema Fotovoltaico	27
2.10. Dimensionamiento Previo del Sistema	28
2.11. Selección de Componentes y Ubicación Óptima de los Módulos Fotovoltaicos.....	29
2.11.1. Módulos Fotovoltaicos Monocristalinos	29
2.11.2. Otros Materiales Relacionados	29
2.11.3. Ubicación Óptima de los Módulos Fotovoltaicos.....	29
2.11.4. Orientación	29
2.11.5. Ángulo	30
2.12. Factores de Sombreado y su Impacto en la Eficiencia del Sistema	30
2.12.1. Sombras Estáticas	30
2.12.2. Sombras Dinámicas.....	30
2.12.3. Sombras Parciales	31
2.12.4. Sombra de Suciedad o Materiales en el Módulo Fotovoltaico	31
2.12.5. Desajuste de Células.....	31

2.12.6. Efecto de “Hot Spots” (Puntos Calientes)	31
2.13. Beneficios de un Sistema Interconectado en el Sector Residencial	32
2.14. Tarifas Residenciales de CFE	32
2.15. Normativas para Instalaciones Fotovoltaicas en México	33
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	35
3.1. Introducción	35
3.2. Realizar una Visita al Sitio.....	35
3.3. Diseñar la Estructura de Soporte	36
3.4. Identificar la Orientación e Inclinación que puedan Afectar el Rendimiento del Sistema Fotovoltaico	37
3.5. Realizar el Montaje Físico del Sistema	38
3.6. Cableado y Protecciones Eléctricas	38
3.7. Efectuar la Conexión Eléctrica del Sistema a la Red.....	39
3.8. Instalar un Sistema de Monitoreo en el Inversor	39
3.9. Registrar Diariamente los Datos de Generación Eléctrica.....	39
3.10. Análisis Del Comportamiento Energético Del Sistema Fotovoltaico	39
3.11. Análisis Económico Del Sistema Fotovoltaico	40
3.12. Proyección del Ahorro Económico en la Vida Útil de un Sistema Fotovoltaico	40
3.13. Estimar la Reducción de Emisiones de Dióxido de Carbono Equivalente	40
CAPITULO 4. RESULTADOS	44
4.1. Introducción	44
4.2. Condiciones del Sitio y Configuración del Sistema Fotovoltaico	44
4.3. Estructura de Soporte del Sistema Fotovoltaico.....	45
4.4. Orientación e Inclinación de los Módulos Solares.....	47
4.5. Realizar el Montaje Físico del Sistema	48
4.6. Cableado y Protecciones Eléctricas	54
4.7. Efectuar la Conexión Eléctrica del Sistema a la Red.....	56
4.8. Instalar un Sistema de Monitoreo en el Inversor	57
4.9. Registrar Diariamente los Datos de Generación Eléctrica.....	57
4.10. Analizar el Comportamiento del Sistema Fotovoltaico	59
4.11. Análisis Económico del Sistema Fotovoltaico.....	62
4.12. Proyección del Ahorro Económico en la Vida Útil de un Sistema Fotovoltaico	63

4.13. Estimar la Reducción de Emisiones de CO₂e	65
CONCLUSIONES.....	68
REFERENCIAS	69
REFERENCIAS DE ILUSTRACIONES	74
REFERENCIAS DE TABLA.....	76

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Fotografía de dron del sistema fotovoltaico en el club campestre.....	6
Ilustración 2: Elaborado CRE, con información de CFE. Datos al primer semestre de 2016.....	7
Ilustración 3: Fotografía de una casa autosustentable.....	8
Ilustración 4: Sistema fotovoltaico instalado.....	9
Ilustración 5: Tabla de calibre de cable y sus dimensiones y propiedades.....	9
Ilustración 6: Casa de estudio con el sistema fotovoltaico instalado.....	10
Ilustración 7: Distribución de la Radiación Solar en la República Mexicana.....	20
Ilustración 8: Tipos de módulos fotovoltaicos.....	22
Ilustración 9: Conexiones de sistemas fotovoltaicos.....	23
Ilustración 10: Sistema solar interconectado a la red.....	24
Ilustración 11: Sistema aislado.....	25
Ilustración 12: Sistema híbrido.....	26
Ilustración 13: Diseño 3D con medidas de la estructura de soporte para los módulos fotovoltaico...47	47
Ilustración 14: Diseño 3D de los rieles y refuerzos en diagonal de la estructura.....	47
Ilustración 15: Corte de ángulos.....	48
Ilustración 16: Perforación de los ángulos.....	49
Ilustración 17: Medición del área de trabajo y perforación de la losa.....	49
Ilustración 18: Anclaje de los L-Foot y ángulos.....	50
Ilustración 19: Perforación de los soportes estructurales	50
Ilustración 20: Montaje de las uniones laterales a los soportes estructurales.....	51
Ilustración 21: Sujeción de los rieles a la estructura de soporte.....	51
Ilustración 22: Refuerzos diagonales.....	52

Ilustración 23: Sistema fotovoltaico.....	53
Ilustración 24: Base de la estructura.....	53
Ilustración 25: Protecciones en CD.....	54
Ilustración 26: Inversor y protección en CA.....	55
Ilustración 27: Tubería.....	55
Ilustración 28: Diagrama de flujo.....	56
Ilustración 29: Generación de kWh por día en el mes de mayo.....	57
Ilustración 30: Generación de kWh por día en el mes de junio.....	58
Ilustración 31: Generación de kWh por día en el mes de julio.....	58
Ilustración 32: Generación de kWh por día en el mes de agosto.....	59
Ilustración 33: Generación de kWh por día en el mes de septiembre.....	59
Ilustración 34: Generación de kWh en el mes de mayo.....	60
Ilustración 35: Generación de kWh en el mes de junio.....	60
Ilustración 36: Generación de kWh en el mes de julio.....	60
Ilustración 37: Generación de kWh en el mes de agosto.....	61
Ilustración 38: Generación de kWh en el mes de septiembre.....	61
Ilustración 39: Historial de facturación de CFE.....	62
Ilustración 40: Recibo de agosto de 2025	63
Ilustración 41: Gráfica del ahorro acumulado.....	64

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficios de un sistema interconectado en el sector residencial.....	32
--	----

Resumen

El presente proyecto titulado "Implementación y Evaluación de un Sistema Fotovoltaico de 4.44 kW en una Residencia con Tarifa 1B" tiene como objetivo la instalación de un sistema fotovoltaico compuesto por 8 módulos fotovoltaicos de 555 W en una residencia con tarifa 1B, con el fin de reducir los costos de facturación ante la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Actualmente, el consumo eléctrico de la vivienda genera un pago bimestral de entre \$3,500 y \$6,000. Sin embargo, con la implementación del sistema fotovoltaico, el costo se reducirá significativamente.

Es importante destacar que el dimensionamiento del sistema fue realizado previamente, por lo que esta investigación se enfocará exclusivamente en el proceso de implementación.

El enfoque principal de este trabajo se centra en el proceso de instalación del sistema fotovoltaico, detallando los procedimientos técnicos, el montaje estructural, la conexión eléctrica, las medidas de seguridad y los desafíos encontrados durante la implementación. Además, se analizarán los beneficios económicos y ambientales derivados del uso de energía solar en el sector residencial, promoviendo la adopción de tecnologías limpias y la independencia energética del usuario.

Este proyecto contribuye a la promoción del uso de energías limpias y a la disminución de la dependencia de fuentes convencionales de electricidad, evidenciando la viabilidad técnica y económica de la energía solar en hogares con altos consumos energéticos.

Abstract

This project, entitled “Implementation and Evaluation of a 4.44 kW Photovoltaic System in a Residence with Rate 1B,” aims to install a photovoltaic system composed of eight 555 W photovoltaic modules in a residence with Rate 1B, in order to reduce electricity bills from the Federal Electricity Commission (CFE). Currently, the home's electricity consumption generates a bimonthly bill of between \$3,500 and \$6,000. However, with the implementation of the photovoltaic system, the cost will be significantly reduced.

It is important to note that the system sizing was carried out previously, so this research will focus exclusively on the implementation process.

The main focus of this work is on the photovoltaic system installation process, detailing the technical procedures, structural assembly, electrical connection, safety measures, and challenges encountered during implementation. Furthermore, the economic and environmental benefits of using solar energy in the residential sector will be analyzed, promoting the adoption of clean technologies and energy independence for users.

This project contributes to promoting the use of clean energy and reducing dependence on conventional electricity sources, demonstrating the technical and economic viability of solar energy in homes with high energy consumption.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

En el campo de la energía se examinan, analizan y explican las razones para ejecutar proyectos de inversión y se valora el aporte energético, económico y socio ambiental derivado del mismo. Como resultado se puede usar la información para obtener la aceptación de los participantes y financistas. El servicio eléctrico es uno de los recursos más utilizados en interés del desarrollo socioeconómico. Es un elemento de importancia vital para el desarrollo, sin embargo, su gestión inadecuada puede traer como consecuencia sinergias no deseadas para la economía, el ambiente y la sociedad, que ponen en entredicho la estabilidad de la vida en la Tierra

Se concluye la presente tesis con la adquisición de materiales y equipos y la instalación de los mismos presentando los resultados, conclusiones pertinentes y trabajo a futuro.

1.2. Antecedentes

1.2.1. La Industria Solar en el Mundo

A nivel mundial, el aprovechamiento de las energías renovables ha crecido de manera importante en los últimos años. La volatilidad de los precios de los combustibles convencionales, la lucha contra el cambio climático y la búsqueda de nuevas oportunidades de negocio son algunos de los factores que han impulsado este crecimiento. Se estima que en 2015 se alcanzó una capacidad instalada para la generación de electricidad a partir de energías renovables cercana a los 1,849 GW a nivel mundial. Por su parte, las inversiones en este sector también registran una tendencia al alza; en 2015 se invirtieron alrededor de 285,000 millones de dólares para mantener el crecimiento en la capacidad de generación de electricidad a partir de energías renovables [1].

La energía solar fotovoltaica es un área tecnológica que ha creado un mercado, pero que sigue en un desarrollo acelerado para mejorar su eficiencia y disminuir sus costos. Actualmente, las celdas de silicio cristalino dominan el mercado fotovoltaico, con una participación de 85% de las tecnologías que lo conforman. Se espera que este material continúe como líder en el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas por lo menos durante la siguiente década [2].

El aprovechamiento de la energía solar para generar electricidad a través de la tecnología fotovoltaica, puede dividirse en tres grandes rubros: proyectos de generación a gran escala, sistemas fotovoltaicos a mediana escalas y proyectos fotovoltaicos a baja escala [1].

1.2.2 Sistemas Fotovoltaicos Industriales

Los proyectos solares a gran escala se desarrollan principalmente para suministrar los requerimientos de energía por parte de empresas de generación como la CFE y por parte de grandes consumidores de energía. El desarrollo de estos proyectos requiere un mayor periodo de financiamiento.

Un sistema fotovoltaico industrial o sistema solar fotovoltaico industrial se refiere a un sistema con una potencia superior a los 100 kWp: una capacidad ideal para muchos

tipos de empresas con fines de autoconsumo, así como de producción y venta de energía eléctrica [3].

Un ejemplo de cómo se lleva a cabo un sistema fotovoltaico industrial es la Compañía Nacional de Chocolates, filial de Grupo Nutresa, tiene el techo de energía solar más grande de Antioquia en su fábrica en Rionegro. El sistema fotovoltaico, que cuenta con 8,000 módulos y 74 conversores y tiene capacidad para generar 2,132 kWp. De acuerdo con el periódico El Colombiano, "el sistema está diseñado para el autoconsumo en el proceso productivo de la empresa y se estima que, en la máxima radiación solar, genere entre 15 % y 20 % del total del consumo de la empresa" [4].

Así mismo Mexifrutas implementa un innovador proyecto de energía renovable en una planta ubicada en Arriaga, Chiapas. Este esfuerzo refleja la visión de integrar prácticas sostenibles que beneficien tanto a la empresa como al entorno en el que operan. El proyecto consiste en la instalación de 1,060 módulos fotovoltaicos, cubriendo un área de 2,862 metros cuadrados. Con una capacidad de generación de 620.10 kilovatios (kW), esta infraestructura les permitirá aprovechar al máximo la energía solar, una fuente renovable y sostenible [5].

1.2.3 Sistemas Fotovoltaicos Comerciales

En el actual panorama económico, las pequeñas y medianas empresas (Pymes) son fundamentales para el desarrollo y crecimiento de cualquier país. Estas empresas enfrentan constantes desafíos, especialmente en la gestión de costos operativos y en la adopción de prácticas sostenibles. Los módulos fotovoltaicos para los comercios, emergen como una solución eficaz para abordar estas necesidades [6].

Comercios como los siguientes que se mencionaran ya han iniciado su transición energética a una sostenible.

Lavandería B&B (Córdoba)

En Argentina en la Provincia de Córdoba, se encuentra la primera lavandería provincial en proveerse de energía solar para su funcionamiento. En la actualidad, por los lavarropas y lavadoras de B&B pasan más de 3 toneladas de ropa, sábanas,

cortinas, etc. por mes. En el 2020, la firma había incorporado una serie de 8 módulos fotovoltaicos, a los que fueron sumándose otros en los últimos años.

“Hoy en día, contamos con 20 módulos fotovoltaicos, de tecnología Perc, que aprovechan la totalidad de la luz del sol. Generan 10 mil W por mes y nosotros consumimos cerca de 9 mil, por lo que inyectamos a la red, entre 900 y mil watts mensualmente”, dice Diego Bastos, titular de la firma.

El empresario explica que, en caso de día nublado o lluvioso, automáticamente pasan a tomar la electricidad de EPEC, la compañía provincial de electricidad provincial.

“Desde el comienzo nos ha interesado mucho el cuidado del medio ambiente. Y la inversión en módulos fotovoltaicos no solo tiene el beneficio del ahorro económico, sino también en materia de ecosustentabilidad. A lo largo de los años hemos adquirido máquinas con tecnología inverter, que ahorran agua y energía; hemos colocado trampas y filtros de jabón en cañerías, como primer tratamiento de efluentes. Somos ambientalmente responsables y contribuimos con nuestro granito de arena”, aseguró Bastos [7].

Club de Golf Campestre Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Sistema de 34.65 kWp compuesto de 110 módulos fotovoltaicos de 315 Wp y 2 Inversores marca Fronius modelo SYMO 15.0-3 [8].



Ilustración 1: Fotografía de dron del sistema fotovoltaico en el club campestre.

1.2.4 Sistemas Fotovoltaicos Residenciales

El crecimiento de estos proyectos se debe a la instalación de sistemas solares en el sector residencial, por parte de usuarios que cuentan con una tarifa de alto consumo (DAC), quienes, por su nivel de consumo, no son sujetos de los subsidios del gobierno federal; otro segmento que hasta ahora ha instalado este tipo de sistemas son los usuarios de tarifas eléctricas de media y baja tensión.

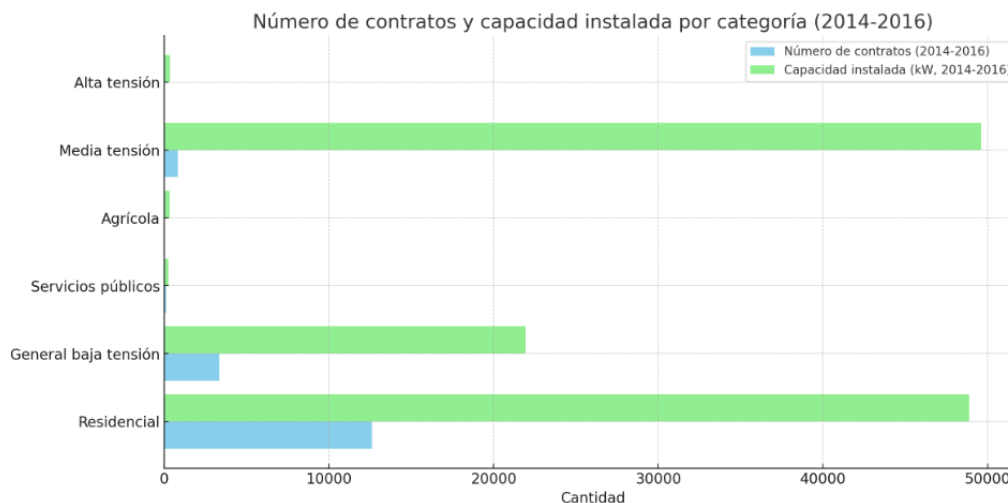


Ilustración 2: Elaborado CRE, con información de CFE. Datos al primer semestre de 2016.

Bajo los nuevos esquemas regulatorios, los pequeños generadores no sólo pueden satisfacer sus necesidades de energía, sino que pueden vender energía a la red, lo que permitirá desarrollar nuevos modelos de negocio y proyectos de mayor escala (hasta 500 kW), y dará mayor dinamismo a la cadena de valor de la industria. Además de los cambios en la regulación, se han agilizado los tiempos de respuesta para las solicitudes de interconexión a la red [9].

Una residencia ubicada en Valle de Bravo, México implementó un sistema solar fotovoltaico con las siguientes características:

Arquitectos: A-001 Taller de Arquitectura

20 módulos fotovoltaicos ubicados en la azotea son los encargados de mantener la temperatura cálida en los baños y la alberca [10].



Ilustración 3: Fotografía de una casa autosustentable.

1.2.5. Impacto Ambiental de la Energía Solar Fotovoltaica

El impacto ambiental de la energía solar ha emergido como una solución viable para enfrentar los desafíos ambientales y económicos del siglo XXI. México, gracias a su ubicación geográfica privilegiada y su alta radiación solar, se encuentra en una posición ideal para aprovechar esta tecnología.

La transición hacia la energía solar contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Al reemplazar fuentes de energía fósil, como el carbón y el petróleo, la energía solar ayuda a disminuir la huella de carbono del país. Según datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México podría reducir sus emisiones de CO_2 en millones de toneladas anualmente si se adoptaran masivamente tecnologías solares afectando significativamente el impacto ambiental [11].

1.2.6 Implementación de Sistemas Fotovoltaicos

Es un proyecto realizado por Soraya Navarro Rayas, José Antonio González y César López Andradese, implementaron un sistema fotovoltaico para la alimentación de un edificio de usos múltiples.

El sistema consto de 7 módulos fotovoltaicos de 245 W, evaluaron su sistema midiendo el voltaje total del arreglo fotovoltaico y la corriente eléctrica, siendo esta última la requerida para la correcta operación del inversor instalado.

Instalaron los rieles para formar la estructura que sostuvieron al sistema. La estructura era de aluminio y describieron sus características, posteriormente instalaron unos lastres para sujetar la estructura al piso, con el fin de evitar taladrar la bóveda del edificio debido a que no tiene el espesor indicado (mínimo 20 cm) según Greenergy [12].



Ilustración 4: Sistema fotovoltaico instalado.

Los autores William Rodrigo Cabrera Merchán e Israel Sebastián Villa García, en 2022, realizaron un proyecto de implementación de un sistema fotovoltaico que consta de 4 módulos fotovoltaicos de 275 W los cuales tuvieron una orientación de 12 grados, además colocaron la estructura de ángulos de aluminio de 2mm en un techo de teja, para los componentes eléctricos como el cableado usaron la siguiente tabla:

Calibre AWG-MCM	Seccion real (mm2)	Intensidad Admisible (Amperios)
14	2,081	30
12	3,309	40
10	5,261	55
8	8,366	70
6	13,3	100
4	21,15	130
3	26,,630	150
2	33,63	175
1	42,41	205

Ilustración 5: Tabla de calibre de cable y sus dimensiones y propiedades.

Y determinaron que el adecuado para su instalación fue el cable de cobre calibre 8, finalmente así fue como quedo la implementación de su sistema [13].



Ilustración 6. Casa de estudio con el sistema fotovoltaico instalado.

En 2024, Zuri Zaday Vazquez López, realizó un proyecto para un sistema fotovoltaico comercial interconectado a la red, en dicho proyecto uso módulos fotovoltaicos de la marca JA SOLAR con potencia de 555 W y un inversor Growatt con una potencia de 12,000 W, e implemento una estructura de aluminio.

Realizo evaluaciones mediante una aplicación y determino un beneficio ambiental importante, como la reducción de 13,726 CO_2 , 757 árboles y 5507 kg de carbón ahorrado.

Todos estos datos fueron obtenidos de la plataforma de monitoreo que viene integrada al inversor central que uso para su proyecto [14].

1.3. Problemática

La vivienda objeto de estudio presenta un consumo energético considerable, lo que se traduce en facturas elevadas que impactan el presupuesto familiar.

Si bien los sistemas fotovoltaicos representan una solución viable y sostenible para este tipo de situaciones, su efectividad depende tanto del dimensionamiento correcto como de una instalación adecuada que garantice su eficiencia y seguridad. La falta de conocimiento técnico o una mala ejecución pueden provocar que la inversión no genere los beneficios esperados, e incluso derive en riesgos eléctricos o pérdidas económicas.

1.4. Hipótesis

Si se realiza una correcta instalación e interconexión de un sistema fotovoltaico de 4.44 kW en una residencia con tarifa 1B, siguiendo el proceso que incluye la selección adecuada de materiales, estructura de soporte apropiada, ubicación óptima de los módulos fotovoltaicos, el cumplimiento de los procedimientos técnicos, de seguridad y las normativas vigentes aplicables (tanto eléctricas como de interconexión ante la CFE), entonces se garantizará un desempeño eficiente del sistema, permitiendo su funcionamiento seguro, legal y optimizado para la producción de energía.

1.5. Justificación

Ante el incremento en los costos de la energía eléctrica y considerando el alto potencial de generación solar en México, surge la necesidad de implementar soluciones sostenibles que contribuyan a la economía familiar. En este contexto, el presente proyecto propone la instalación de un sistema fotovoltaico en la vivienda en estudio, con el objetivo principal de reducir significativamente la facturación eléctrica.

Se plantea la instalación de 8 módulos fotovoltaicos de 555 W cada uno, cuya producción energética permitirá cubrir el consumo total del hogar, limitando el gasto mensual al pago por interconexión a la red eléctrica. Cabe destacar que la eficiencia del sistema dependerá no solo del dimensionamiento adecuado, sino también de una instalación correcta, que garantice tanto el rendimiento esperado como la seguridad operativa del sistema.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

- Implementar y evaluar un sistema fotovoltaico interconectado a la red con capacidad de 4.44 kW en una residencia con tarifa 1B, con el fin de reducir los costos de facturación ante la CFE y reducir las emisiones de CO_{2e} , asegurando una instalación eficiente y segura mediante la correcta selección de materiales, estructuras y procedimientos.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Implementar un sistema fotovoltaico interconectado a red con las especificaciones técnicas adecuadas para una eficiente producción de energía.
- Monitorear la energía producida por el sistema fotovoltaico.
- Evaluar los resultados generados por el sistema fotovoltaico y determinar el porcentaje de reducción en el consumo de energía, así como la reducción de la huella de carbono.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

El desarrollo de fuentes de energía renovable ha cobrado una gran importancia en los últimos años debido a la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales derivados de su uso. Entre estas fuentes, la energía solar fotovoltaica se ha posicionado como una de las opciones más viables y accesibles para la generación de electricidad, especialmente en el sector residencial.

México, debido a su ubicación geográfica privilegiada, cuenta con una de las mayores radiaciones solares a nivel mundial, lo que lo convierte en un país con un alto potencial para la implementación de sistemas fotovoltaicos.

En este capítulo se presentan los antecedentes teóricos que sustentan la instalación de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red. Se abordarán temas clave como las energías renovables y su importancia, el funcionamiento de la tecnología fotovoltaica y su evolución a lo largo del tiempo, así como el potencial de la energía solar en México. Además, se explicarán los factores fundamentales a considerar en la instalación de un sistema fotovoltaico, tales como el análisis del consumo eléctrico, la tarifa aplicable, el dimensionamiento previo del sistema y la selección de materiales adecuados para su implementación.

2.2. El Sol

El Sol es una de los mil millones de estrellas que existen en el Universo. Su gravedad es tan grande que mantiene a todos los cuerpos de Sistema Solar en constante movimiento alrededor de sus órbitas.

Esta enorme esfera de gas incandescente está formada principalmente de hidrógeno y helio. La energía que irradia proviene de su centro o núcleo en donde se transforma la materia en energía. Sucede gracias a que, en el núcleo del Sol, la presión es más de mil veces la de la atmósfera terrestre, la densidad es 160 veces la del agua y la temperatura es de alrededor de 16 millones de grados centígrados [15].

El Sol, de forma directa o indirecta, es el origen de todas las energías renovables. La energía del Sol se desplaza a través del espacio en forma de radiación electromagnética, llegando una parte de esta energía a la atmósfera. De esta energía que llega a la atmósfera, una parte es absorbida por la atmósfera y por el suelo, y otra parte es reflejada directamente al espacio desde el suelo. Es por esto por lo que menos de la mitad de la radiación solar llega efectivamente a la superficie terrestre, siendo esta parte la que podemos utilizar con fines energéticos en nuestro planeta.

2.2.1 Radiación Solar

- Radiación directa: Es la radiación que llega directamente del Sol; sin haber incidido con nada por el camino y, por tanto, sin haberse desviado ni cambiado de dirección. Esta radiación es la que produce las sombras. Es el tipo de radiación predominante en un día soleado.
- Radiación difusa: Es la radiación que llega después de haber incidido con cualquier elemento de la atmósfera (polvo, nubes, contaminantes, etc.), por lo que ha cambiado de dirección. Es el tipo de radiación predominante en un día nublado.
- Radiación reflejada o albedo: Es la radiación reflejada por la superficie terrestre; cobra importancia en las zonas con nieve, con agua (como cerca del mar o de una presa) o cualquier otra zona donde la reflexión sea importante [16].

2.3. Energías Renovables y su Importancia

Las energías renovables son fuentes de energía que se regeneran naturalmente con el tiempo y no se agotan. Son la parte más importante de la transición hacia un sistema energético que abandone los combustibles fósiles, contrarrestando así el calentamiento global. Son energías limpias que protegen la salud humana y el medioambiente.

Las principales fuentes de energía renovable son:

2.3.1. Energía Solar

La energía solar es aquella que se obtiene a partir del sol en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta). Mediante la instalación de módulos fotovoltaicos o colectores, se puede utilizar para obtener energía térmica (sistema fototérmico) o para generar electricidad (sistema fotovoltaico) [17].

2.3.2. Energía Eólica

La energía eólica es aquella que se obtiene a partir de la fuerza del viento. A través de un aerogenerador que transforma la energía cinética de las corrientes de aire en energía eléctrica. El proceso de extracción se realiza principalmente gracias al rotor, que transforma la energía cinética en energía mecánica, y al generador, que transforma dicha energía mecánica en eléctrica. Es una energía renovable y eficiente, clave para la transición energética y la descarbonización de la economía [18].

2.3.3. Hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica es aquella que se genera al transformar la fuerza del agua en energía eléctrica. Para aprovechar dicha fuerza, se construyen grandes infraestructuras hidráulicas capaces de extraer el máximo potencial de este recurso renovable y libre de emisiones [19].

2.3.4. Energía Geotérmica

Este recurso energético está presente en cualquier geografía, pero solo se puede aprovechar en localizaciones con unas condiciones físicas concretas. En las

ubicaciones más favorables se manifiesta de forma natural, algunos de los ejemplos de energía geotérmica son: las fuentes termales, géiseres o volcanes.

Esta fuente de energía primaria renovable es una pieza clave en el camino hacia la descarbonización, ya que puede cubrir una parte importante de la demanda de climatización y electricidad de edificios e industrias. Una planta geotérmica de unos 10 MW es capaz de producir anualmente la energía que necesitan más de 23,000 viviendas y su uso evitaría la emisión de unas 57,000 toneladas de CO_2 cada año [20].

2.3.5. Energía de la Biomasa

La biomasa se define como todas las sustancias derivadas de organismos vivos que pueden utilizarse como fuente de energía.

Los combustibles fósiles también proceden de seres vivos, pero se trata de organismos que vivieron en un pasado remoto y se han fosilizado con el paso del tiempo. En cambio, la biomasa procede de organismos muy recientes, como árboles recién talados o excrementos de animales.

Las biomásas pueden dividirse en tres categorías según su origen biológico.

- Biomasa vegetal: Incluye la madera y los residuos procedentes de actividades agrícolas, forestales y de jardinería. También se incluyen los cultivos energéticos, es decir, los destinados específicamente a fines energéticos.
- Biomasa animal: Se trata principalmente de deposiciones, como el excremento, pero también de residuos animales.
- Biomasa microbiana: Son las sustancias orgánicas presentes en el suelo, resultado de la descomposición llevada a cabo por hongos y bacterias. Además, los mismos microorganismos son en sí mismos una posible fuente de energía, que puede explotarse cada vez más gracias a la innovación tecnológica.

Las principales técnicas utilizadas para convertir la biomasa en energía o biomateriales son:

- Combustión directa: Sirve para generar electricidad y calor.
- Gasificación: Es una técnica para transformar la biomasa bruta en biogás que, a su vez, se utiliza para generar electricidad mediante combustión o se convierte en biocombustible para el transporte.
- Pirólisis: Consiste en la descomposición de la biomasa en componentes más simples (sólidos, líquidos y gaseosos), con los que se genera electricidad de forma más eficiente.
- Digestión anaeróbica: Se trata de un proceso biológico por el que determinados microorganismos degradan la biomasa. El resultado es, también en este caso, una mezcla de biogás que puede utilizarse para producir electricidad y calor [21].

2.3.6. Energía Marina

Es un conjunto de tecnologías que aprovechan la energía de los océanos. El mar tiene un gran potencial energético, que se manifiesta principalmente en las olas, las mareas, las corrientes y en la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo marino.

Esta forma de aprovechamiento energético presenta ventajas significativas al no producir efectos ambientales o paisajísticos relevantes, además de ofrecer una alta capacidad de pronóstico en cuanto a su disponibilidad. No obstante, el entorno marino agresivo, la intensidad del oleaje, los efectos corrosivos del agua salada y los desafíos técnicos para transportar la energía generada hasta las instalaciones terrestres implican elevados costos de inversión.

2.3.6.1. Tipos de energía marina

- Energía mareomotriz: Es un tipo de energía renovable que se obtiene del movimiento de las mareas.
- Energía undimotriz: Conocida también como energía de las olas. Es un tipo de energía que aprovecha el movimiento ondulatorio de las olas para generar electricidad.
- Energía maremotérmica: Esta energía renovable utiliza la diferencia de temperaturas entre aguas profundas y frías y las superficiales y cálidas de los

océanos y mares para mover maquinaria térmica y producir trabajo en forma de electricidad.

- **Energía azul o de gradiente salino:** Es una forma de energía renovable que se obtiene principalmente por osmosis. Se obtiene por la diferencia de concentración de sal entre agua dulce y salada concretamente en la desembocadura de los ríos donde se mezclan ambos tipos de agua. La diferencia de concentraciones salinas genera presión osmótica, la cual se utiliza para generar electricidad.
- **Energía hidrocínética o de corrientes marinas:** Se obtiene a partir de energía cinética producida por las corrientes marinas. Estas corrientes son aprovechadas por turbinas submarinas parecidas a los aerogeneradores, pero para operar bajo el agua. Al ser movidas por las corrientes, giran un eje conectado a un generador eléctrico, por lo que produce electricidad [22].

En cuanto a la energía de corrientes marinas, México tiene un gran potencial. Entre las más importantes que existen en nuestro país se encuentran la corriente oceánica, que ocurre en las costas de Quintana Roo; las corrientes de marea, en el Golfo de California, y la corriente de Cozumel, en el mar Caribe.

Esta energía está relacionada con la de tipo cinético, que aprovecha la velocidad, en este caso, del flujo del agua. La manera como se puede aprovechar este tipo de energía de corrientes marinas es a través de una turbina que se pone en movimiento y genera energía [23].

2.3.7. Ventajas de las Energías Renovables

La principal ventaja de las energías renovables es la prácticamente nula emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes que contribuyen al cambio climático. Además, ayudan a disminuir enfermedades relacionadas con la contaminación, reducen la necesidad de industrias extractivas en la medida que se evita el uso de combustibles fósiles, y pueden reducir la necesidad de proyectos hidroeléctricos de gran escala con los consecuentes efectos de inundación y erosión.

De igual forma las ventajas económicas son muy importantes dentro de las energías renovables, por ejemplo, la reducción de las tarifas en los servicios de luz y gas, la

generación de empleos directos, la generación de empleos indirectos y para los ayuntamientos en la reducción del costo de los servicios municipales de energía eléctrica (alumbrado público, bombeo de agua y edificios públicos).

También gracias a las energías renovables, como la energía solar, está la posibilidad de llevar energía eléctrica a comunidades remotas [24].

2.4. Tipos de Energía Solar y Funcionamiento

El efecto fotovoltaico es la conversión de la luz del sol en energía eléctrica. Esto se produce gracias a las propiedades del silicio, el cual recibe los choques de los fotones del sol y absorbe su energía liberando un electrón y creando un circuito eléctrico [25].

El efecto Joule es un fenómeno por el que los electrones en movimiento de una corriente eléctrica impactan contra el material a través del cual están siendo conducidos. La energía cinética que tienen los electrones se convierte entonces en energía térmica, calentando el material por el que circulan [26].

2.4.1. Energía Térmica

La energía solar térmica utiliza directamente la energía que se recibe del Sol para calentar un fluido caloportador. Esta energía es almacenada y transferida a otro fluido de trabajo, utilizándose en los puntos de consumo [27].

2.4.2. Energía Solar Fotovoltaica

Este tipo de energía solar funciona por medio de un sistema fotovoltaico. Se trata de una instalación que produce electricidad utilizando módulos fotovoltaicos, los cuales son capaces de transformar la radiación solar directamente en energía eléctrica. Los módulos fotovoltaicos contienen celdas fotovoltaicas que, al recibir la luz de forma directa, se ionizan y liberan electrones que al interactuar entre sí generan corriente eléctrica [28].

2.5. Potencial de la Energía Solar en México

México cuenta una irradiación solar media de 6,36 kWh/m² por día. Dada la extensión territorial del país y el nivel de irradiación, existe potencial de instalar más de 1,800 GW de capacidad de generación en zonas con factores de planta >20%,

cifra equivalente a 28 veces la capacidad total instalada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). En el territorio nacional se observan recursos con factores de planta, o ganancias, de entre 10 y 30%.

Más allá del potencial total, lo relevante radica en que el recurso más competitivo no se encuentra limitado a zonas específicas del país, sino que, está ampliamente repartido por la geografía nacional, lo que permite un aprovechamiento diversificado. Esto otorga una ventaja competitiva ante otras tecnologías renovables, ya que la planta se puede ubicar cerca de los puntos de consumo, evitando así los costos de interconexión y las pérdidas que ocurren al transferir la energía [29].

2.5.1. Radiación Solar en México

Considerando la capacidad energética del Sol, la cual perdurará durante millones de años, así como la privilegiada ubicación de México en el globo terráqueo, la cual permite que el territorio nacional destaque en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual (Figura 5), con índices que van de los 4.4 kWh/m² por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m² por día en el norte del país, resulta fundamental la adopción de políticas públicas que fomenten el aprovechamiento sustentable de la energía solar en nuestro país [30].

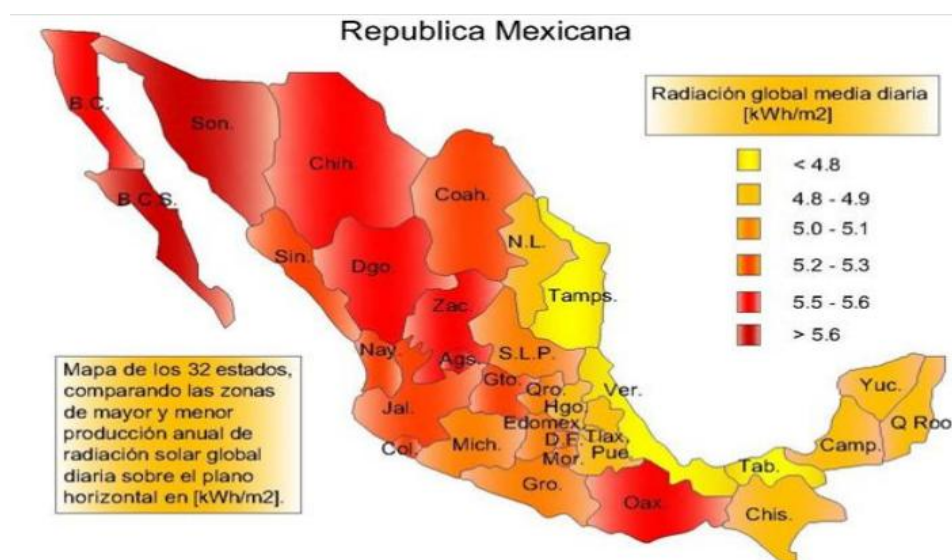


Ilustración 7: Distribución de la Radiación Solar en la República Mexicana.

2.5.2 Zonificación Solar y Regiones con Mayor Potencial

La zonificación solar en México es un proceso que permite identificar las áreas con mayor potencial para la generación de energía solar, considerando factores como la radiación solar, las condiciones geográficas, el clima y la infraestructura disponible. Este tipo de zonificación es clave para maximizar el aprovechamiento de la energía solar en el país y facilitar el desarrollo de proyectos de energía renovable.

México es uno de los países con mayor potencial para la generación de energía solar, debido a su ubicación geográfica y la gran cantidad de días soleados al año, especialmente en las zonas del norte y centro del país. La energía solar es una de las principales fuentes renovables promovidas por el gobierno mexicano en su transición hacia una matriz energética más limpia.

2.5.2.1. Elementos Clave de la Zonificación Solar

- **Radiación Solar:** La medición de la radiación solar en diferentes regiones del país es fundamental. Las zonas con mayor radiación suelen ser más adecuadas para la instalación de módulos fotovoltaicos y la generación de electricidad.
- **Factores Climáticos y Geográficos:** Además de la radiación, otros factores como la nubosidad, las precipitaciones y las variaciones estacionales afectan la eficiencia de los sistemas solares.
- **Infraestructura:** La proximidad a la red eléctrica y las condiciones de acceso en las diferentes zonas también son aspectos importantes en la zonificación solar. Las zonas rurales o alejadas pueden tener un acceso limitado, lo que complica el desarrollo de proyectos.

La zonificación solar en México es una herramienta esencial para maximizar el aprovechamiento de la energía solar, apoyar la transición energética y garantizar que los recursos se utilicen de la manera más eficiente y sostenible posible [31].

2.6. Sistema Solar Fotovoltaico

Este tipo de energía solar funciona por medio de un sistema fotovoltaico, se trata de una instalación que produce electricidad utilizando módulos fotovoltaicos, los cuales son capaces de transformar la radiación solar directamente en energía eléctrica. Estos contienen celdas fotovoltaicas que, al recibir la luz de forma directa, se ionizan y liberan electrones que al interactuar entre sí generan corriente eléctrica.

La energía fotovoltaica ha recibido un impulso en los últimos años con la llegada de las comunidades solares y el ahorro energético que suponen las nuevas instalaciones de autoconsumo solar. Además, la llamada energía agrovoltaje también está adquiriendo especial relevancia dentro del sector agrícola [32].

2.6.1. Tipos de Módulos Fotovoltaicos y Conexiones

Los módulos fotovoltaicos están constituidos por cristales de silicio. Se distinguen tres clases, de más a menos eficiencia o rendimiento y precio:

- Módulo de silicio monocristalino, Eficiencia del 12%.
- Módulo de silicio policristalino. Eficiencia del 10%.
- Módulo de silicio amorfo. Eficiencia entre el 5% y el 7%.

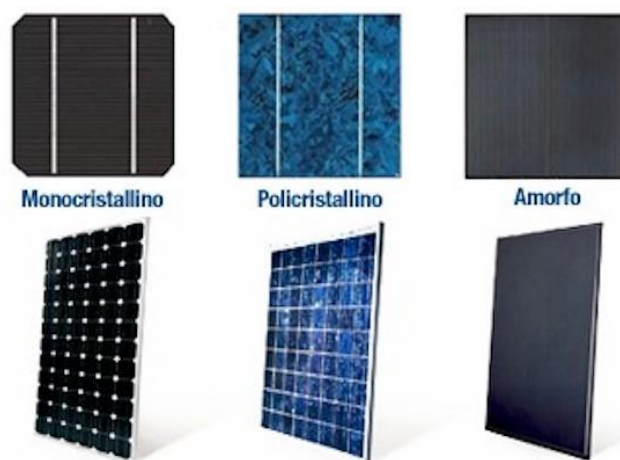


Ilustración 8: Tipos de módulos fotovoltaicos.

En la actualidad se fabrican módulos con eficiencia de hasta el 18%. En módulos fotovoltaicos de concentración se llega hasta 27% de eficiencia.

Los módulos tienen una eficiencia media de 12%, lo que suponen, 120 W/m^2 en condiciones óptimas de irradiación. Puede variar entre 100 W/m^2 en invierno y 250 W/m^2 en verano.

La vida útil de un módulo viene a ser de 30 años.

La radiación solar se transmite a través de fotones que, al incidir sobre la superficie del cristal de silicio, se genera una corriente eléctrica (intensidad de corriente) bajo una diferencia de potencial (tensión) [33].

La conexión de placas solares es el método mediante el cual se interconectan los módulos fotovoltaicos para formar un sistema fotovoltaico eficiente. Los tipos de conexión de placas solares son en serie, en paralelo o en serie-paralelo (mixta). La conexión en serie incrementa el voltaje, mientras que la conexión en paralelo aumenta la corriente. La conexión mixta optimiza voltaje y corriente según las necesidades del sistema fotovoltaico.

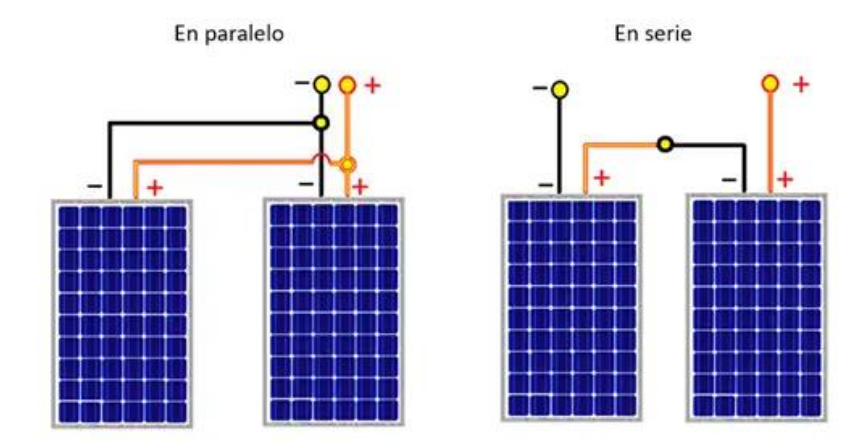


Ilustración 9: Conexiones de sistemas fotovoltaicos.

Los esquemas de instalación de placas solares muestran las conexiones a realizar. Estos esquemas incluyen sistemas conectados a la red (on-grid), sistemas fuera de la red (off-grid) y sistemas híbridos. Los sistemas en red permiten vender el exceso de energía, los aislados funcionan de manera autónoma con baterías, y los híbridos combinan ambas tecnologías para más flexibilidad [34].

2.7. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

2.7.1. Sistema Fotovoltaico Interconectado

Los sistemas de energía solar interconectados están compuestos por módulos fotovoltaicos que trabajan en paralelo con la red eléctrica convencional, estos permiten tener un flujo constante en la energía del hogar o empresa. Sin embargo, estos no aseguran un respaldo de energía.

Estar interconectado a un operador significa siempre disponer de energía en la vivienda o empresa, bien sea del sistema solar o del operador de red. Es importante resaltar que este tipo de sistemas no cuentan con almacenamiento, es decir, la energía se puede auto consumir o se puede entregar como un excedente a las redes del sistema interconectado nacional de energía [35].

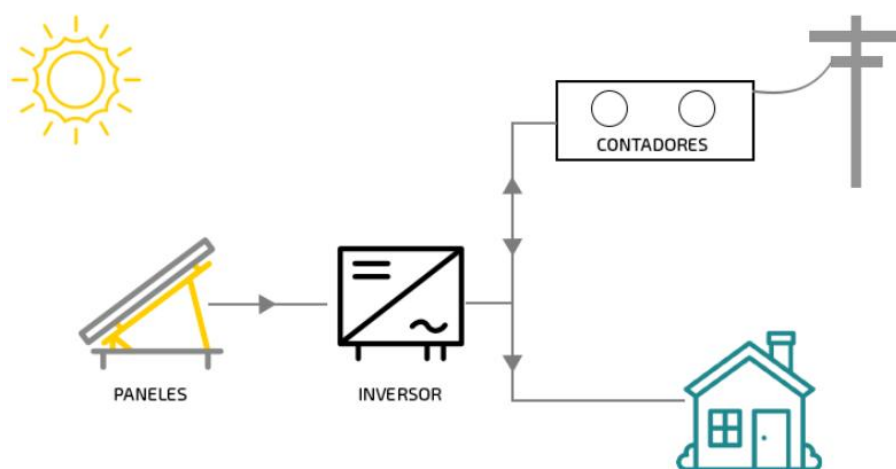


Ilustración 10: Sistema solar interconectado a la red.

2.7.2. Sistema Fotovoltaico Aislado

Un sistema solar aislado es un sistema de generación de corriente eléctrica que proporciona al usuario suficiente energía proveniente del sol para que este pueda realizar sus actividades cotidianas sin interrupción durante todo el día.

Este sistema tiene la característica de no estar conectado a la red eléctrica, por lo que solamente proporciona energía proveniente del sol.

Los rayos solares inciden sobre los módulos fotovoltaicos, que produce la captación de radiación solar y toma los fotones de este y el efecto fotovoltaico.

A partir de ello se encuentra el controlador de carga el cual tiene la función regula la carga eléctrica de las baterías, es decir de sobrecargas o bajas tensiones, lo cual puede llegar a dañarlas y reducir el tiempo de vida útil.

Las baterías, así como en cualquier otro sistema fotovoltaico permite el almacenamiento de la energía eléctrica que proporcionan los módulos fotovoltaicos, para que en las noches o días con poca producción sean utilizados.

Cuando la carga está por utilizarse pasa al inversor, que se encarga de transformar la energía continua de los módulos fotovoltaicos a corriente alterna que puede ser utilizada en el hogar o negocio [36].



Ilustración 11: Sistema aislado.

2.7.3. Sistema Fotovoltaico Híbrido

Un sistema híbrido combina las ventajas de los sistemas aislados e interconectados. Es un sistema interconectado a la red eléctrica con un respaldo de baterías. Así cuando la red eléctrica caiga, el banco de baterías les dará energía a las cargas esenciales. Este tipo de sistemas abren las puertas a la autosuficiencia energética con un respaldo de la red al energizar el sistema durante el día con la energía de los módulos fotovoltaicos y durante la noche con la energía de las baterías [37].

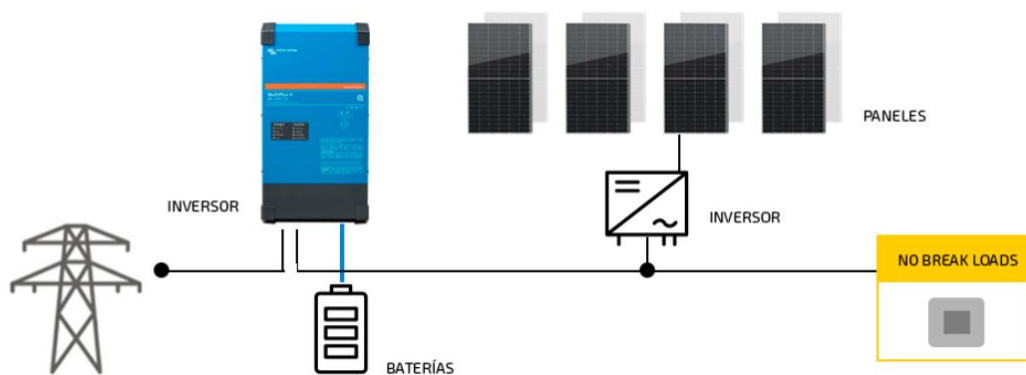


Ilustración 12: Sistema híbrido.

2.8. Componentes Principales de un Sistema Fotovoltaico

2.8.1. Módulos Fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico capta la energía que irradia el sol gracias al uso de componentes especiales llamados módulos fotovoltaicos, capaces de producir electricidad cuando les llega la luz solar.

2.8.2. Estructuras de Soporte de los Módulos

Estas estructuras sostienen los módulos fijándolos al techo. En el caso de las cubiertas planas, existen estructuras de soporte que también pueden modificar la orientación de los módulos fotovoltaicos, optimizando su exposición al inclinarlos hacia los rayos del sol.

2.8.3. Cables Eléctricos

Son los cables que llevan la energía del sistema a los usuarios [38].

2.8.4. Inversor

El inversor es un equipo electrónico, capaz de convertir la corriente eléctrica continua procedente de los módulos solares en corriente alterna, sincronizándose con los parámetros eléctricos; tales como frecuencia y tensión, de tal modo que pueda interactuar con la red eléctrica del suministrador.

El inversor; para ser interactivo con la red eléctrica, debe cumplir con las especificaciones y lineamientos que el suministrador imponga. Las limitantes y disposiciones por parte del proveedor de la energía eléctrica son respaldados por un

contrato de interconexión, el cual depende de la tipología que tomará el cliente para el manejo de su energía [39].

2.8.5. Protecciones

Algo que es de suma importancia, no solo en sistemas fotovoltaicos, sino en todas las instalaciones eléctricas, son las protecciones, ya que, con esto, no solo estas salvaguardando los equipos que conforman tu sistema y tu cableado, también aseguras al personal que realizará mantenimiento posteriormente y a la gente que se encuentre cerca de tu instalación [40].

2.8.6. Medidor Bidireccional

Un medidor bidireccional de la CFE es un dispositivo hecho para contabilizar la electricidad que consumes por parte de la red local y también para registrar la energía que produces con tu sistema fotovoltaico.

Adquirir este medidor es un requisito importante que debes cumplir si decides instalar módulos fotovoltaicos de manera interconectada, ya que te permite determinar adecuadamente cuánto debes pagar de luz a la CFE con base en tu consumo, ya sea a nivel doméstico, comercial o industrial [41].

2.8.7. Tierra Física

El soporte de los módulos fotovoltaicos tiene que estar perfectamente firme. Se realiza una toma de tierra, esta consiste en una pica de acero que se introduce en la tierra. Es decir que su función consiste en ayudar a que la carga generada de una tormenta eléctrica o un rayo de tormenta que impacte en el módulo fotovoltaico, pueda disminuir su energía [42].

2.9. Factores a Considerar para la Instalación de un Sistema Fotovoltaico

El montaje de módulos fotovoltaicos, conducciones eléctricas, aparatos de control y maniobra requieren una preparación o acondicionamiento mecánico que en muchos casos tendrá que realizar el ingeniero en energías renovables, para lo que necesitará estar preparado para realizar estas funciones como pueden ser algunas de las que se relacionan a continuación:

- Trazado y medida.
- Cotizaciones y estimados
- Corte de piezas y ensamblajes.
- Taladrado.
- Fijación y acomodo de módulos fotovoltaicos.
- Cableado y puesta de protecciones.
- Conexión a red eléctrica.
- Puesta a prueba y contratación de medidor bidireccional.
- Monitoreo [43].

2.10. Dimensionamiento Previo del Sistema

- Evaluación del consumo energético: Determina tu consumo en kWh.
- Consultar la radiación solar en el área: Usar datos específicos sobre radiación solar.
- Calcular la potencia total del sistema: Basado en el consumo energético y la radiación solar disponible.
- Determinar el número de módulos fotovoltaicos: Dividiendo la potencia total entre la potencia de los módulos seleccionados.
- Seleccionar el inversor adecuado: Debe ser capaz de manejar la potencia total del sistema.
- Considerar baterías (opcional): Si requiere almacenamiento de energía.
- Añadir un factor de pérdidas del sistema: Para compensar las ineficiencias.
- Evaluar los costos y mantenimiento: Considerar todos los costos involucrados [44].

2.11. Selección de Componentes y Ubicación Óptima de los Módulos Fotovoltaicos

La selección de materiales y la ubicación óptima de los módulos fotovoltaicos son factores cruciales para maximizar la eficiencia y el rendimiento de un sistema fotovoltaico.

2.11.1. Módulos Fotovoltaicos Monocristalinos

- Material: Silicio monocristalino.
- Ventajas: Alta eficiencia (alrededor de 18-22%) y mejor rendimiento en condiciones de baja luz.
- Costo: Más costosos debido al proceso de fabricación más complejo.
- Durabilidad: Larga vida útil (más de 25 años).
- Aplicación: Recomendados cuando el espacio para instalar los módulos fotovoltaicos es limitado, ya que son más eficientes.

2.11.2. Otros Materiales Relacionados

- Inversores: Los inversores convierten la corriente continua (CC) producida por los módulos fotovoltaicos en corriente alterna (CA), que es utilizada por la mayoría de los electrodomésticos. Existen inversores centrales, de cadena y microinversores, siendo estos últimos más eficientes cuando se tiene un sistema de módulos dispersos o con sombras parciales.

2.11.3. Ubicación Óptima de los Módulos Fotovoltaicos

La ubicación de los módulos fotovoltaicos solares afecta directamente su eficiencia y la cantidad de energía que pueden generar. Los factores más importantes a considerar son:

2.11.4. Orientación

La ubicación óptima para los módulos fotovoltaicos en el techo de las viviendas es la orientación sur. Un techo orientado al sur recibe la máxima cantidad de luz solar a lo largo del día. Con un techo orientado al sur, los módulos fotovoltaicos producirán la

mayor cantidad de energía en general, pero los techos orientados al este o al oeste también pueden funcionar bien y producirán energía durante gran parte del día.

Los tejados con orientación norte son la opción más desfavorable para la colocación de módulos fotovoltaicos, ya que reciben muy poca luz solar directa.

2.11.5. Ángulo

El ángulo óptimo dependerá de las características específicas de la propiedad y de la inclinación del tejado. Lo ideal es que los módulos apunten directamente al sol al mediodía durante el verano. Una buena regla general para maximizar la producción anual de energía es inclinar los módulos fotovoltaicos en un ángulo igual a su latitud. Por ejemplo, en un lugar con una latitud de 35 grados, una inclinación de 35 grados sería óptima. [45].

2.12. Factores de Sombreado y su Impacto en la Eficiencia del Sistema

Según un estudio de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), incluso una pequeña sombra que cubra solo una parte de un módulo fotovoltaico puede reducir su rendimiento en hasta un 50 por ciento. Esto se debe a que los módulos fotovoltaicos están diseñados para funcionar de manera óptima cuando reciben luz solar uniforme en toda su superficie.

2.12.1. Sombras Estáticas

Las sombras estáticas son causadas por objetos fijos como edificios, árboles o estructuras permanentes. Estas sombras son predecibles y, por lo tanto, más fáciles de manejar mediante una planificación cuidadosa de la ubicación y orientación de los módulos fotovoltaicos.

2.12.2. Sombras Dinámicas

Las sombras dinámicas son generadas por factores móviles como nubes, hojas de árboles en movimiento o el cambio de posición del sol a lo largo del día. Estas sombras son más difíciles de anticipar y controlar, lo que puede llevar a fluctuaciones en la generación de energía.

2.12.3. Sombras Parciales

Cuando solo una parte del módulo fotovoltaico está sombreada, el impacto puede ser menor que cuando el módulo entero está en la sombra, no obstante, debido a la forma en que los módulos fotovoltaicos están interconectados, incluso las sombras parciales pueden afectar significativamente el rendimiento del sistema [46].

2.12.4. Sombra de Suciedad o Materiales en el Módulo Fotovoltaico

La suciedad, como el polvo, las hojas u otros residuos actúan como una barrera que obstruye la luz solar y disminuye la eficiencia. Si no se limpia regularmente podría adherirse a la superficie, lo que podría ocasionar daños permanentes.

2.12.5. Desajuste de Células

Igualmente, el desajuste de células puede ser una de las razones para que aparezca un hot spot. Y esto es cuando células de diferente corriente son conectadas serie.

2.12.6. Efecto de “Hot Spots” (Puntos Calientes)

Los puntos calientes o hotspots son zonas del módulo fotovoltaico con una temperatura elevada, ocasionando que la eficiencia del módulo tenga una considerable disminución en tal área, una menor potencia de salida, además de la degradación de los materiales.

Pueden generar diversas consecuencias, siendo una de las más graves, un posible incendio.

Es necesario recalcar que los hot spots son inestables, es decir, que estos se irán intensificando hasta que el rendimiento total del módulo fotovoltaico se vea afectado, es decir que a mayor dilatación del punto caliente mayor daño a los módulos.

Los puntos calientes en módulos fotovoltaicos se producen cuando las células en vez de generar energía, la comienzan a consumir, haciendo que esta se disipe (debido al voltaje inverso) en forma de calor en un área localizada [47].

2.13. Beneficios de un Sistema Interconectado en el Sector Residencial

Tabla 1. Beneficios de un sistema interconectado en el sector residencial

Beneficios	Descripción
Reducción de costos	Disminución significativa de la factura eléctrica mediante autoconsumo y compensación por excedente de energía.
Sostenibilidad	Contribución a la reducción de emisiones de CO2 y mitigación del cambio climático.
Independencia energética	Reducción de la dependencia de la red eléctrica y protección ante aumentos en tarifas o interrupciones del suministro.
Rentabilidad a largo plazo	Retorno de inversión positivo y aumento del valor de la propiedad.
Bajos costos de mantenimiento	Requiere poco mantenimiento una vez instalado, lo que disminuye costos adicionales a lo largo de su vida útil.
Incentivos gubernamentales	Disponibilidad de subsidios, incentivos fiscales y financiamiento favorable para facilitar la instalación del sistema.
Beneficios para la red eléctrica	Ayuda a aliviar la carga de la red y contribuye a la estabilidad del sistema eléctrico.
Protección en cortes de energía	Con baterías de almacenamiento, el hogar puede operar de manera autónoma en caso de cortes de electricidad.
Tecnología y monitoreo remoto	Permite el monitoreo en tiempo real del sistema y la optimización del rendimiento, garantizando su eficiencia.

2.14. Tarifas Residenciales de CFE

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) en México ofrece diversas tarifas eléctricas que varían según el tipo de usuario, el nivel de consumo y la región geográfica. A continuación, se presentan las principales tarifas para el sector residencial:

Tarifas para el Sector Residencial:

Tarifa 1: Aplicable a usuarios con consumo mensual de hasta 75 kWh.

Tarifa 1A: Para consumos mensuales superiores a 75 kWh y hasta 150 kWh.

Tarifa 1B: Para consumos mensuales superiores a 150 kWh y hasta 300 kWh.

Tarifa 1C: Para consumos mensuales superiores a 300 kWh y hasta 500 kWh.

Tarifa 1D: Para consumos mensuales superiores a 500 kWh [48].

2.15. Normativas para Instalaciones Fotovoltaicas en México

La norma NOM-001 es una norma muy completa y específica por el Comité Consultivo Nacional. Es una norma de instalaciones eléctricas. Establece las especificaciones a seguir en instalaciones fotovoltaicas. El artículo 690 “sistemas solares fotovoltaicos”, nos habla de la instalación del equipo. Además, el artículo 705 “fuentes de generación de energía eléctrica interconectadas” dicta el marco para una instalación bidireccional con CFE [49].

- Especificación CFE G0100-04: Interconexión eléctrica de baja tensión de sistemas fotovoltaicos

Esta norma es directamente de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y define los requerimientos para diseñar e instalar sistemas fotovoltaicos interconectados. Esto garantiza la seguridad del personal, la calidad de la energía en la red, la integridad física y operacional de la red eléctrica y de los sistemas fotovoltaicos.

- NOM-009-STPS-2011: Condiciones de seguridad para realizar trabajos en altura

Esta Norma Oficial Mexicana (NOM) establece los requerimientos mínimos de seguridad para prever riesgos laborales por realizar trabajos en altura.

- NOM-017-STPS-2008: Equipo de protección personal – Selección, uso y manejo en los centros de trabajo

Esta Norma Oficial Mexicana (NOM) establece los requisitos mínimos para la selección, adquisición y proporción del equipo de protección personal a los trabajadores.

- NOM-029-STPS-2011: Mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo – Condiciones de seguridad

Esta Norma Oficial Mexicana (NOM) establece las condiciones de seguridad durante el mantenimiento de las instalaciones eléctricas para evitar accidentes.

- Acuerdo CENACE DOF: 15/12/2016 - Acuerdo por el que se emite el Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad menor a 0.5 MW

Este acuerdo del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) establece los lineamientos administrativos de infraestructurales para interconectar centrales eléctricas con una capacidad menor a 0.5 MW; esto, para garantizar las condiciones de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

- Resolución CRE RES/142/2017 - Resolución de la Comisión Reguladora de Energía por la que expide las disposiciones administrativas de carácter general, los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales, aplicables a las centrales eléctricas de generación distribuida y generación limpia distribuida.

Esta resolución de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) establece los lineamientos y especificaciones técnicas generales para la Generación Distribuida, define y autoriza el contrato de interconexión de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW, y determina los modelos de contraprestación aplicable por la energía eléctrica entregada [50].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En este capítulo se describe la metodología empleada que se llevó a cabo para el proyecto de Implementación y evaluación de un Sistema Fotovoltaico de 4.44 kW en una Residencia con Tarifa 1B ubicada en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El enfoque de esta metodología es práctico y se basa en una serie de pasos secuenciales que permiten garantizar el correcto funcionamiento del sistema, así como evaluar su impacto técnico, económico y ambiental.

3.2. Realizar una Visita al Sitio

De acuerdo a la guía para levantamiento de sitio de instalaciones fotovoltaicas del Centro de Capacitación Eléctrica y Energías Alternas (CCEEA), durante esta actividad se llevó a cabo una revisión del acceso al área de trabajo, considerando las condiciones de ingreso a la azotea o espacio designado, así como la facilidad para transportar materiales y equipos. Posteriormente se realizó un levantamiento físico de la superficie disponible, registrando medidas y orientación.

Se procedió a la identificación de sombras y obstáculos que pudieron afectar el desempeño de los módulos fotovoltaicos, como árboles, tinacos, antenas o edificaciones cercanas.

Se evaluó la infraestructura eléctrica existente, revisando la ubicación del medidor de la CFE, el centro de carga, el estado del cableado y el espacio disponible para la instalación del inversor, canalización de tubería y los elementos de interconexión.

También se calculó el área necesaria para el arreglo fotovoltaico.

Ecuación 1

$$Largo\ total = (L_p * N_f) + (S_p * (N_f - 1))$$

$$Ancho\ total = (A_p * N_r) + S_r$$

$$\text{Área total necesaria} = \text{Largo total} * \text{Ancho total}$$

Dónde:

L_p : Largo de un módulo

N_f : Numero de módulos por fila

S_p : Separacion entre módulos

A_p : Ancho de un módulo

N_r : Numero de filas de módulos

S_r : Separacion entre filas de módulos

3.3. Diseñar la Estructura de Soporte

Para el anclaje del sistema se emplearon componentes especializados como end clamp, mid clamp, L-foot, tornillos y taquetes expansivos de acero inoxidable, los cuales permitieron fijar los módulos fotovoltaicos a los rieles y garantizaron una correcta sujeción de la estructura a la losa. El uso de estos elementos fue fundamental para asegurar la durabilidad del sistema frente a la exposición constante a la intemperie.

En cuanto a la estructura que conformó los soportes estructurales y refuerzos, se seleccionó un material que se caracterizó por su ligereza, lo que facilitó su transportación, manipulación y adaptación durante el montaje. Asimismo, este material ofreció una adecuada relación resistencia-peso, permitiendo soportar vientos intensos y condiciones climáticas adversas sin comprometer la estabilidad del conjunto. Finalmente, se eligió por su resistencia a la intemperie, así como por su versatilidad para ser cortado y perforado, lo que permitió ajustarlo a las distintas necesidades de instalación del sistema fotovoltaico.

El diseño de la estructura fotovoltaica se llevó a cabo mediante un software de modelado 3D.

3.4. Identificar la Orientación e Inclinación que puedan Afectar el Rendimiento del Sistema Fotovoltaico

Se determinó la orientación de la estructura utilizando una brújula de una aplicación móvil, ya que este parámetro definió hacia qué punto cardinal se encontraba dirigida la superficie y permitió establecer la dirección óptima para la captación solar.

En México, la inclinación recomendada para la instalación de sistemas fotovoltaicos suele ubicarse en un rango de 10° a 30°, dependiendo de la latitud geográfica del estado donde se realice la instalación. Según Solarama, empresa especializada en energía solar y reconocida en el sector como una fuente confiable de información técnica, este rango permite optimizar la captación de radiación solar y, por lo tanto, maximizar la eficiencia energética del sistema.

Para determinar el ángulo de inclinación de los módulos fotovoltaicos, se utilizó la Ecuación 2, la cual se basa en los principios de la trigonometría aplicada a triángulos rectángulos. Esta relación permitió conocer el ángulo que forma la superficie inclinada de los módulos con respecto a la horizontal.

Ecuación 2

$$\Delta h = \text{Altura mayor} - \text{Altura menor}$$

$$m = \frac{\Delta h}{\text{Distancia horizontal}}$$

$$\theta = \arctan (m)$$

Esta fórmula proviene del análisis geométrico de un triángulo rectángulo, donde la pendiente m representa la razón entre el cateto opuesto Δh y el cateto adyacente (distancia horizontal). El uso de la función arctangente permite determinar el ángulo formado entre ambos lados, el cual corresponde al ángulo de inclinación del plano.

La ecuación se utilizó en este proyecto para conocer la inclinación real de la estructura donde fueron instalados los módulos fotovoltaicos. De esta forma, se garantizó que los módulos quedaran orientados de manera óptima para maximizar la

captación de radiación solar, considerando las condiciones del sitio y la latitud correspondiente.

3.5. Realizar el Montaje Físico del Sistema

Se realizó la instalación física de todos los componentes del sistema fotovoltaico iniciando con la fijación de la estructura de soporte al techo.

Se colocaron los módulos fotovoltaicos sobre la estructura, asegurándolos mediante herrajes fabricados en materiales resistentes a la corrosión y al clima, como acero inoxidable. Este procedimiento aseguró que los módulos permanecieran firmes a lo largo de la vida útil del sistema, reduciendo riesgos de desprendimiento o movimientos que pudieran dañar el cableado o la integridad de la instalación.

Durante todo el proceso de montaje se siguieron lineamientos técnicos establecidos en la norma NOM-001-SEDE-2012 que garantizaron que la instalación fuera segura, estable y duradera.

Es importante considerar que los módulos fotovoltaicos presentan un rango de operación que puede ir aproximadamente de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, aunque su rango óptimo para un mejor desempeño se sitúa entre $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual refuerza la importancia de la ventilación y separación estructural para evitar el sobrecalentamiento y mantener un rendimiento adecuado.

3.6. Cableado y Protecciones Eléctricas

En el sistema se instaló un interruptor termomagnético de dos polos, con capacidad para soportar corriente directa de hasta 800 V y calibrado a 20 A, el cual cumplió la función de protección contra sobrecargas y cortocircuitos. Asimismo, se incorporó un supresor de picos para corriente directa con capacidad de 600 V, destinado a resguardar al sistema frente a sobretensiones transitorias ocasionadas por descargas atmosféricas o variaciones en la red, garantizando de esta manera la integridad de los módulos fotovoltaicos y del inversor.

En el lado de corriente alterna se colocó un interruptor termomagnético de dos polos con calibración de 20 A, que brindó protección contra sobrecorrientes y cortocircuitos a la salida del inversor. Este se complementó con un supresor de picos para corriente

alterna con capacidad de 300 V, el cual permite absorber las sobretensiones transitorias y protege a los equipos eléctricos conectados a la instalación doméstica.

Finalmente, se instaló una clema a tierra de 20-10 AWG, ya que se usó cable THW calibre 10, la clema estuvo destinada exclusivamente a la protección de la estructura metálica de los módulos fotovoltaicos, con el fin de reducir riesgos por acumulación de cargas eléctricas en la superficie metálica.

3.7. Efectuar la Conexión Eléctrica del Sistema a la Red

Se instaló un centro de carga específico para el sistema fotovoltaico, el cual estuvo conformado por dispositivos de protección como interruptores termomagnéticos y supresores de picos, que permiten salvaguardar tanto a los equipos como a la instalación ante condiciones de sobrecorriente, cortocircuito o variaciones de voltaje.

Finalmente se efectuó la conexión del inversor a la red eléctrica interna del domicilio, habilitándolo para su interconexión con la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

3.8. Instalar un Sistema de Monitoreo en el Inversor

Este paso consistió en instalar un dispositivo o aplicación de monitoreo que permite visualizar en tiempo real la producción de energía.

El monitoreo fue clave para detectar fallos y verificar el rendimiento del sistema.

3.9. Registrar Diariamente los Datos de Generación Eléctrica

Durante 4 meses, se registraron los datos de generación que arrojó el sistema de monitoreo.

- Se recolectó información como kWh generados por día.

Estos datos sirvieron para el análisis de desempeño.

3.10. Análisis Del Comportamiento Energético Del Sistema Fotovoltaico

Con los datos recopilados, se generaron gráficas de rendimiento, donde se observó:

- La producción mensual.
- El comportamiento del sistema en diferentes condiciones climáticas.

3.11. Análisis Económico Del Sistema Fotovoltaico

Se hizo una comparación directa entre los recibos anteriores a la instalación del sistema y los recibos posteriores, considerando:

- Costo total facturado
- Cargos por interconexión o excedentes

Esto permitió verificar el impacto económico real del sistema.

Para determinar el porcentaje de ahorro obtenido al comparar el recibo de consumo eléctrico previo a la instalación del sistema fotovoltaico con el recibo posterior a su implementación, se empleó la siguiente ecuación.

Ecuación 3

$$\text{Porcentaje ahorrado} = \frac{\text{Pago a CFE sin paneles} - \text{Pago a CFE con paneles}}{\text{Pago a CFE sin paneles}} * 100$$

3.12. Proyección del Ahorro Económico en la Vida Útil de un Sistema Fotovoltaico

Se proyectó el ahorro acumulado a 25 años, considerando la vida útil del sistema.

Ecuación 4

$$\text{Ahorro total} = (C_0 - P) * \frac{(1 + g)^n - 1}{g}$$

Donde

C_0 = Pago anual actual a CFE

g = Incremento anual (0.09)

P = Pago anual con sistema fotovoltaico

n = Numero de años

3.13. Estimar la Reducción de Emisiones de Dióxido de Carbono Equivalente

- Cuántas toneladas de CO_{2e} se dejaron de emitir al ambiente.
- El impacto ambiental positivo generado por el sistema.

Fórmula para calcular el CO_{2e} evitado

Ecuación 5

$$CO_{2e} \text{ evitado} = \text{Energía generada (kWh)} * \text{Factor de emisión}$$

$$\text{Factor de emisión: } 0.4 \text{ kgCO}_{2e}/\text{kWh}$$

De acuerdo con el Aviso del Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2024, publicado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el factor oficial de emisión establecido para México es de $0.444 \text{ kgCO}_{2e}/\text{kWh}$, lo que significa que cada kilowatt-hora consumido de la red eléctrica nacional implica en promedio esa cantidad de emisiones indirectas de dióxido de carbono. Este factor deberá emplearse para la cuantificación de emisiones asociadas al consumo de electricidad en el país, constituyendo así un valor de referencia confiable y oficial para proyectos de energía renovable y reportes ambientales.

Se suele reportar en $\text{kgCO}_{2e}/\text{kWh}$, porque la combustión de combustibles fósiles no solo emite CO_2 , también emite CH_4 (metano) y N_2O (óxido nitroso) en pequeñas cantidades.

Fórmula para calcular el carbón evitado

Para determinar la cantidad de carbón que se dejó de utilizar como resultado de la evitación de emisiones de dióxido de carbono CO_{2e} , se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 6

$$\text{Carbón evitado} = \frac{CO_{2e} \text{ evitado}}{\text{Factor de emisión}}$$

$$\text{Factor de emisión: } 2.4 \text{ kgCO}_{2e}/\text{kg carbón}$$

Donde CO_{2e} representa la cantidad total de dióxido de carbono equivalente que se dejó de emitir gracias a la implementación de tecnologías más limpias o fuentes renovables.

De esta forma, al dividir el $CO_{2e} \text{ evitado}$ entre el factor de emisión, se obtuvo la masa de carbón que no fue necesaria quemar, lo que representa tanto un ahorro de

combustible fósil como una disminución directa de emisiones contaminantes a la atmósfera.

Según el artículo “How Does Using Energy Create Carbon Emissions?” del sitio web 360 Energy, se calcula que 1 kg de carbón bituminoso produce aproximadamente 2.42 kg de CO_{2e} .

El carbón bituminoso es el más utilizado a nivel mundial, se caracteriza por presentar un alto poder calorífico y un contenido moderado de humedad y cenizas, lo que lo convierte en una de las fuentes más utilizadas en centrales termoeléctricas para la producción de vapor y, posteriormente, energía eléctrica mediante turbinas.

Con la siguiente ecuación se pudo calcular el ahorro energético.

Ecuación 7

Ahorro energético

$$= (\text{Masa de carbon evitado})(\text{Poder calorifico inferior del carbon})$$

$$\text{Poder calorifico inferior del carbon: } 32,564 \text{ } \frac{kJ}{kg}$$

Los carbones bituminosos son el combustible más común en el sector energético, sus valores caloríficos oscilan entre 24,423 y 32,564 $\frac{kJ}{kg}$, para fines de esta tesis se usó el último valor.

El carbón evitado representa la cantidad de combustible fósil que no fue necesario utilizar gracias a la energía generada por el sistema fotovoltaico. Su relación con el ahorro energético se basa en el poder calorífico del carbón, ya que cada kilogramo de carbón contiene una cantidad determinada de energía. Por tanto, al evitar su combustión, se ahorra la energía que este liberaría al quemarse.

Fórmula para calcular la reducción de la deforestación

Ecuación 8

$$\text{Reducción de la deforestación} = \frac{CO_{2e} \text{ evitado}}{\text{Captura de } CO_{2e} \text{ por árbol}}$$

Captura de CO_{2e} por árbol: $10 \text{ kg } CO_{2e}/\text{árbol} \cdot \text{año}$

En el artículo “How much CO_{2e} does a tree absorb?”, del sitio web de EcoTree, dice que un árbol absorbe aproximadamente 25 kg de CO_{2e} al año en condiciones favorables, pero admiten que en promedio dicha cifra varía entre 10 y 40 kg CO_{2e} por año, dependiendo de especie, clima, edad, crecimiento, etc.

Para los fines de esta tesis, se tomó el valor conservador de $10 \text{ kg } CO_{2e}/\text{árbol} \cdot \text{año}$, con el fin de evitar sobreestimaciones debido a que existen muchas especies locales, a las condiciones de crecimiento, la altitud/clima, u o tras restricciones que hacen difícil alcanzar los valores máximos del rango.

Estas ecuaciones permitieron realizar los cálculos con los kWh generados desde el 16 de mayo de 2025 hasta el 30 de septiembre de 2025.

También se realizaron los cálculos con los kWh que el sistema generaría durante su vida útil, es decir, 25 años.

Ecuación 9

$$kWh \text{ generados durante vida util} = \frac{N_p * P_p}{1000} * HSP * (365 * N_a)$$

N_p : Numero de paneles

P_p : Potencia del panel

HSP : Horas solar pico

N_a : Numero de años a proyectar (25)

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de implementación del sistema fotovoltaico de 4.44 kW, compuesto por ocho módulos solares de 555 W instalados en una vivienda con tarifa 1B. Se detalla de manera ordenada y descriptiva cada una de las etapas del proceso, desde la preparación del sitio y el montaje de la estructura, hasta la interconexión eléctrica y la puesta en marcha del sistema.

Durante la instalación se identificaron ciertas limitaciones estructurales derivadas de las características físicas de la vivienda, las cuales representaron un desafío en el diseño y disposición de los módulos. No obstante, se lograron realizar las adecuaciones necesarias para garantizar una correcta orientación e inclinación, maximizando así el aprovechamiento de la radiación solar.

Asimismo, se analizan los resultados energéticos obtenidos, observando cómo la producción eléctrica del sistema varía según las condiciones climáticas y el mes del año, lo que permite comprender su comportamiento real a lo largo del tiempo. Finalmente, se presenta un análisis del beneficio ambiental generado desde la instalación del sistema, así como una proyección a 25 años, correspondiente a la vida útil estimada del conjunto fotovoltaico, evidenciando la contribución del proyecto a la reducción de emisiones contaminantes y a la promoción de un modelo energético más sustentable.

4.2. Condiciones del Sitio y Configuración del Sistema Fotovoltaico

Se realizó una visita al sitio con el propósito de evaluar las condiciones físicas de la losa y determinar la viabilidad de la instalación del sistema fotovoltaico. Durante la inspección se identificó que el acceso a la losa no presentaba complicaciones, lo cual facilitó el traslado de equipos y materiales.

En la superficie del sitio de instalación se identificaron cuatro compresores de aire acondicionado y un tinaco de gran altura, los cuales limitaban el área disponible para

el montaje del sistema fotovoltaico. El tinaco presentaba una altura de 1.45 m, por lo que el arreglo de módulos fotovoltaicos debía diseñarse con una altura mínima de 1.50 m y máxima de 1.80 m, con el propósito de evitar sombras sobre los módulos y garantizar una óptima captación de radiación solar.

Adicionalmente, trabajar a una altura superior a 1.80 m representaba un riesgo para el personal instalador, debido a que la losa de la vivienda no contaba con paredes perimetrales ni suficiente espacio de maniobra, lo que dificultaba el uso de escaleras largas y obligaba a recurrir a andamios o equipos de elevación, incrementando los riesgos laborales y los costos de ejecución. Asimismo, el uso de dichos equipos requería gestionar permisos con los vecinos colindantes, lo cual no resultaba viable dadas las condiciones del sitio.

Por otro lado, la distribución de los módulos fotovoltaicos también se vio condicionada por la ubicación del tinaco, el cual se encontraba casi en la zona central de la losa, reduciendo considerablemente el área útil disponible. Esta limitante imposibilitó la instalación lineal de los módulos, motivo por el cual se decidió dividir el sistema en dos hileras de cuatro módulos.

Considerando que cada módulo fotovoltaico posee 2.38 m de ancho y 1.13 m de largo, con una separación de 5 cm entre hileras y 2 cm entre módulos, se determinó un área total de 22.13 m^2 calculada mediante la Ecuación 1.

$$\text{Largo total} = (1.13 \text{ m} * 4) + (0.02 \text{ m} * 3) = 4.60 \text{ m}$$

$$\text{Ancho total} = (2.38 \text{ m} * 2) + 0.05 = 4.81 \text{ m}$$

$$\text{Área total necesaria} = 4.60 \text{ m} * 4.81 \text{ m} = 22.13 \text{ m}^2$$

4.3. Estructura de Soporte del Sistema Fotovoltaico

El diseño de la estructura de soporte se realizó considerando las condiciones del sitio. Debido a la presencia de un tinaco en el área de instalación, la estructura se proyectó con una altura máxima de 1.80 m en la parte más elevada y una altura mínima de 1.50 m en la parte más baja, con el objetivo de garantizar la inclinación adecuada para la captación de radiación solar.

La estructura quedó conformada por dos hileras lineales de cuatro módulos fotovoltaicos cada una, lo que permitió optimizar el espacio disponible.

Para su soporte se emplearon veinte soportes estructurales distribuidas en diferentes longitudes:

- Cinco de 1.80 m.
- Cinco de 1.71 m.
- Cinco de 1.60 m.
- Cinco de 1.50 m.

Además de:

- Cinco uniones laterales de 3.90 m cada uno.
- Dos refuerzos en diagonal de 2.15 m.
- Dos refuerzos en diagonal de 2.27 m.
- Dos refuerzos en diagonal de 1.87 m.
- Un refuerzo en diagonal de 2 m.
- Veinte L-Foot.
- Veinte taquetes expansivos.
- 84 tornillos de acero inoxidable.

Asimismo, para la sujeción de los módulos fotovoltaicos, se colocaron:

- Cuatro rieles de 4.70 m.
- Ocho end clamp.
- Doce mid clamp.

Finalmente, para la fabricación de los soportes estructurales, los refuerzos y las uniones laterales se emplearon tramos de ángulos de aluminio de $\frac{3}{16}$ " , lo que proporcionó rigidez, durabilidad y resistencia estructural al sistema de soporte, tal como se aprecia en las Ilustraciones 13 y 14.

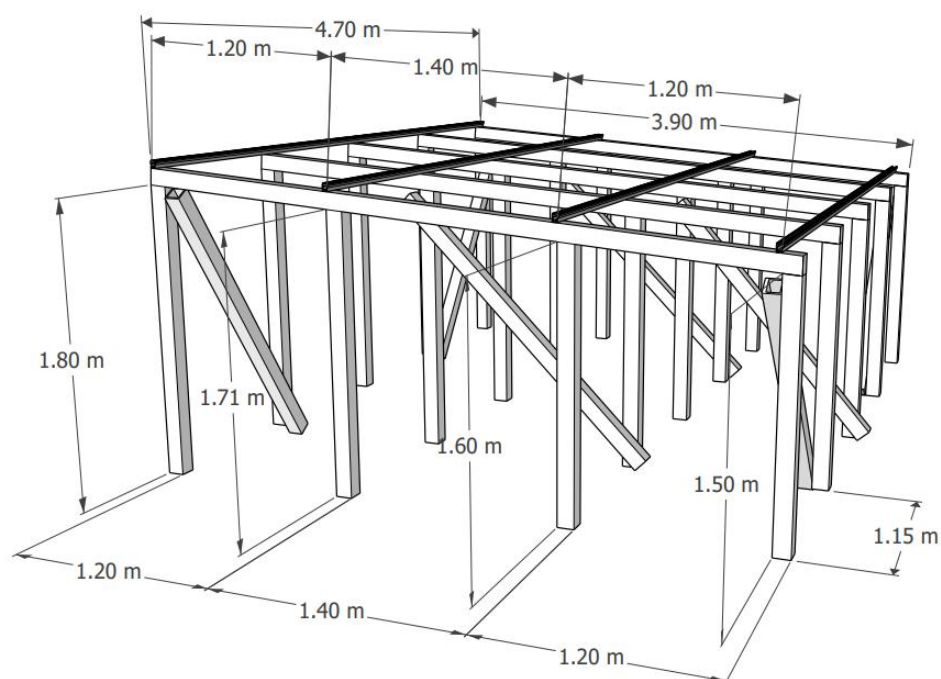


Ilustración 13: Diseño 3D con medidas de la estructura de soporte para los módulos fotovoltaicos.

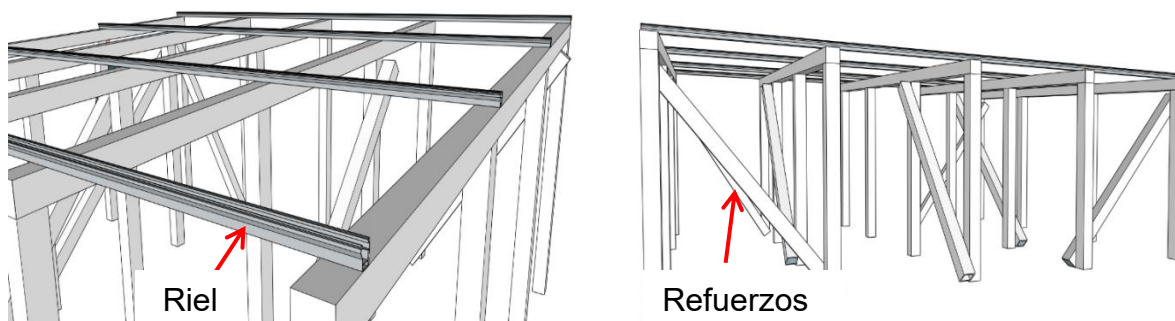


Ilustración 14: Diseño 3D de los rieles y refuerzos en diagonal de la estructura.

4.4. Orientación e Inclinación de los Módulos Solares

El sistema fotovoltaico fue orientado al sur, esta orientación se eligió considerando que, en México, la mayor eficiencia de un sistema fotovoltaico se logra cuando la radiación incide de manera perpendicular a la superficie de los módulos fotovoltaicos, siendo el sur la dirección más adecuada para maximizar la producción energética.

En cuanto a la inclinación, si bien se recomienda rangos entre 10° y 30° dependiendo de la latitud del sitio, en este caso particular fue necesario ajustar el ángulo por las condiciones físicas del lugar de instalación. Para el cálculo se aplicó la relación trigonométrica establecida en la metodología, tomando como referencia una altura mayor de 1.80 m y una altura menor de 1.50 m en la estructura de soporte, con una distancia horizontal de 3.90 m.

Para calcular la inclinación se usó la Ecuación 2.

$$\Delta h = 1.80 \text{ m} - 1.50 \text{ m}$$

$$m = \frac{0.30 \text{ m}}{3.90 \text{ m}} = 0.077$$

$$\theta = \arctan(0.077) = 4.4^\circ = 4.5^\circ$$

Este ángulo (4.5°), aunque es menor al rango ideal, es el resultado de la elección de la altura máxima y mínima de instalación (1.50 m y 1.80 m respectivamente), manteniendo un criterio de costo-beneficio, ya que esta proporcionaba una elevación suficiente para minimizar el efecto de sombras sin requerir estructuras más altas que incrementaran los costos, la complejidad del montaje y los riesgos durante la instalación.

4.5. Instalación del Sistema Fotovoltaico

El montaje de la estructura inició con el corte de los ángulos de aluminio utilizando un esmeril, siguiendo las medidas establecidas en el diseño, como se muestra en la Ilustración 15.



Ilustración 15: Corte de ángulos.

Posteriormente, se realizaron perforaciones con broca para metal, considerando las dimensiones de la ranura del L-Foot, con el fin de asegurar un ensamble preciso y resistente al momento de la fijación, como se observa en la Ilustración 16.



Ilustración 16: Perforación de los ángulos.

Se delimitó el área de instalación con tiralíneas y se procedió a la perforación de la losa de concreto con broca de $\frac{5}{16}$ ", como se observa en la Ilustración 17.



Ilustración 17: Medición del área de trabajo y perforación de la losa.

Las perforaciones se distribuyeron en una retícula de 5 x 4 puntos, con separación de 1.15 m a lo largo y 1.20 m, 1.40 m y 1.20 m a lo ancho. En cada orificio se colocaron taquetes expansivos de $\frac{5}{16}$ ", asegurados con L-Foot y sellados con anclaje químico para incrementar la resistencia y evitar filtraciones de agua.

La estructura se conformó con cuatro filas de soportes estructurales de diferente altura, que permitieron obtener la inclinación necesaria para los módulos fotovoltaicos. La primera fila se construyó con soportes estructurales de 1.80 m, la segunda de 1.71 m, la tercera de 1.60 m y la última de 1.50 m, estas fueron ancladas a las L-Foot, tal como se observa en la Ilustración 18.



Ilustración 18: Anclaje de los L-Foot y ángulos.

Sobre ellas se fijaron uniones laterales de 3.90 m mediante tornillería de acero inoxidable, garantizando rigidez y estabilidad, como se aprecia en las Ilustraciones 19 y 20.



Ilustración 19: Perforación de los soportes estructurales.



Ilustración 20: Montaje de las uniones laterales a los soportes estructurales.

A continuación, se instalaron cuatro rieles horizontales de 4.70 m, como se muestra en la Ilustración 21, distribuidos en el sentido transversal con separaciones de 1.20 m, 1.40 m y nuevamente 1.20 m, formando la base de soporte para los módulos fotovoltaicos.



Ilustración 21: Sujeción de los rieles a la estructura de soporte.

Para reforzar la estructura y evitar desplazamientos por acción del viento o vibraciones, se incorporaron siete refuerzos diagonales de 2 m de longitud, distribuidos estratégicamente en cada fila. Estos refuerzos se fijaron desde las esquinas superiores de los postes hasta los extremos inferiores de postes

adyacentes, logrando un sistema triangular que incrementó la rigidez estructural, tal como se observa en la Ilustración 22.



Ilustración 22: Refuerzos diagonales.

Con la estructura lista, se inició la instalación de los módulos fotovoltaicos. Primero se colocó un módulo fotovoltaico sobre el riel y se fijó con dos end clamp en su extremo; posteriormente, se añadieron dos mid clamp para unirlo al siguiente módulo.

Forma idéntica, dejando una separación de 5 cm entre ambas, tal como se aprecia en la Ilustración 23.

Esta separación se dejó con el propósito de permitir el flujo de aire entre las hileras, favoreciendo la ventilación natural y la disipación del calor generado por los módulos durante su operación. Mantener un espacio adecuado entre cada hilera de módulos fotovoltaicos contribuye a reducir la temperatura superficial de los módulos, lo que mejora su eficiencia de conversión energética y evita acumulaciones de calor que podrían afectar su rendimiento o su vida útil.



Ilustración 23: Sistema fotovoltaico.

Finalmente, se aplicó impermeabilizante en cada una de las bases de la estructura, como se aprecia en la Ilustración 24, con el propósito de evitar filtraciones de agua y prolongar la durabilidad de la instalación. De esta forma, la estructura quedó lista para garantizar el soporte mecánico seguro y confiable de los módulos fotovoltaicos.



Ilustración 24: Base de la estructura.

4.6. Configuración del Cableado y de Protecciones Eléctricas

Con los módulos fotovoltaicos ya montados, se realizó un arreglo de un solo MPPT con ocho módulos fotovoltaicos. Para este sistema se calculó cable de cobre tipo THW-LS, calibre 10 AWG, 600 V, el cual se canalizó hacia una caja de riel DIN de seis módulos. En esta se instaló un interruptor termomagnético de 20 A, dos polos, marca Suntree, en cuyas terminales se conectaron los conductores positivos y negativos correspondientes. Posteriormente, se integró un supresor de picos de 600 V, dos polos, marca Connera, que se enlazó con la entrada MPPT del inversor. La caja también contó con una clema a tierra para protección de la estructura; para ello, se unió la punta del conductor cable calibre 10 en color verde de puesta a tierra a la estructura y posteriormente a la clema, como se muestra en la Ilustración 25.



Ilustración 25: Protecciones en CD.

En la salida del inversor se dispusieron tres conductores: dos fases y una tierra física. Dichos conductores se conectaron a un centro de cargas para exterior de dos polos, el cual estaba equipado con un interruptor termomagnético Square D de 20 A y un supresor de picos marca Delta de 300 V, conectado a las terminales del interruptor, como en las Ilustración 26.



Ilustración 26: Inversor y protección en CA.

Para el tendido eléctrico se empleó tubería galvanizada de 3/4".

Se utilizaron los siguientes materiales, todos en medida 3/4":

- Ocho tramos de tubería de 3 m cada uno.
- Siete codos.
- Doce coples.
- Un condulet tipo oc.
- Dos conectores para conduit.
- Tres glándulas.
- Dos conectores rectos.
- 30 cm de licuatite.

La fijación de la tubería a la pared se realizó mediante taquetes y tornillos de 1/4".



Ilustración 27: Tubería.

Finalmente, al llegar al medidor se conectaron las dos fases en las terminales laterales. Para la puesta a tierra física se instaló una varilla independiente de la vivienda, la cual fue conectada mediante su respectiva terminal, garantizando así una conexión a tierra confiable.

4.7. Conexión del Sistema Fotovoltaico a la Red de CFE

Cuando la CFE realizó el cambio del medidor por uno bidireccional, se procedió a la puesta en marcha del sistema fotovoltaico.

Como primer paso, se midió el voltaje en el interruptor termomagnético Square D, comprobándose que operaba a 220 V, para posteriormente activarlo. Después, se verificó el voltaje en la pastilla de corriente directa marca Suntree, la cual también se energizó, y finalmente se activó el inversor, asegurando que todas las conexiones estuvieran correctas.

El inversor tardó aproximadamente tres minutos en sincronizarse con la red eléctrica. Durante este proceso, el indicador luminoso mostró un parpadeo en color rojo y posteriormente permaneció en color verde estático, lo que significó que la vinculación a la red se realizó de manera correcta. A partir de ese momento, el sistema comenzó a generar energía y el medidor inició el registro de los kilowatts hora producidos.

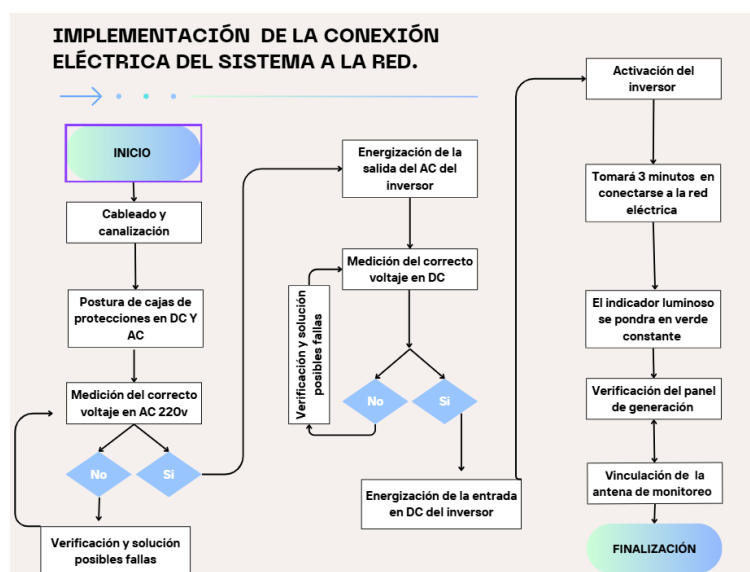


Ilustración 28: Diagrama de flujo.

4.8. Operación del Sistema de Monitoreo

El inversor Growatt cuenta con una antena para monitoreo y una App llamada ShinePhone que se descargó en un celular, se tuvo que enlazar a la red de wifi.

Se creó una cuenta para ingresar a la App y se escaneó el código QR de la antena del inversor para que en automático la App tuviera todos los datos necesarios del inversor y empezara a registrar los datos de generación del sistema fotovoltaico.

4.9. Resultados del Monitoreo Diario de la Producción de Energía

El sistema fotovoltaico inició su operación el 16 de mayo de 2025, fecha a partir de la cual comenzó el registro continuo de los datos de generación eléctrica, con el propósito de analizar el comportamiento energético del sistema y determinar tanto la generación máxima diaria como la generación promedio mensual, expresadas en kilowatt hora (kWh).

El periodo de evaluación comprendió desde el 16 de mayo hasta el 30 de septiembre de 2025, lapso durante el cual se recopilaron los valores registrados por el inversor y el sistema de monitoreo correspondiente. Esta información permitió realizar un análisis del desempeño real del sistema fotovoltaico, así como la verificación de su eficiencia energética en condiciones operativas reales.

Energía	391.4 kWh
Valor máximo	27.60 kWh
Valor promedio	24.46kWh

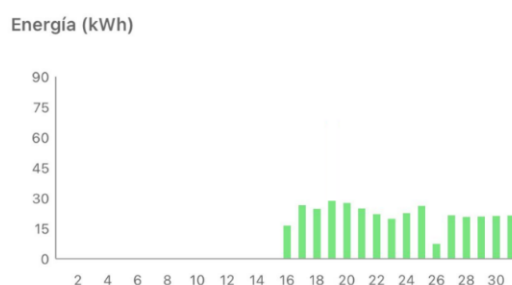


Ilustración 29: Generación de kWh por día en el mes de mayo.

Energía	603.1 kWh
Valor máximo	26.1kWh
Valor promedio	20.10kWh

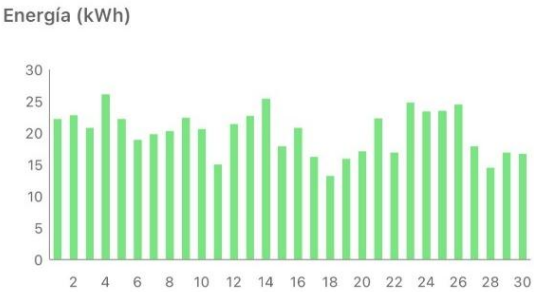


Ilustración 30: Generación de kWh por día en el mes de junio.

Energía	693.3 kWh
Valor máximo	27kWh
Valor promedio	22.36kWh

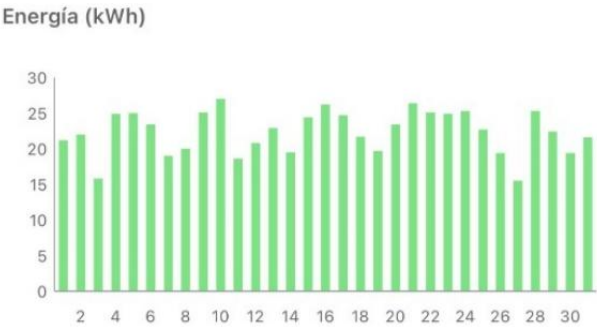


Ilustración 31: Generación de kWh por día en el mes de julio.

Energía	684.8 kWh
Valor máximo	26.9kWh
Valor promedio	22.09kWh

Energía (kWh)

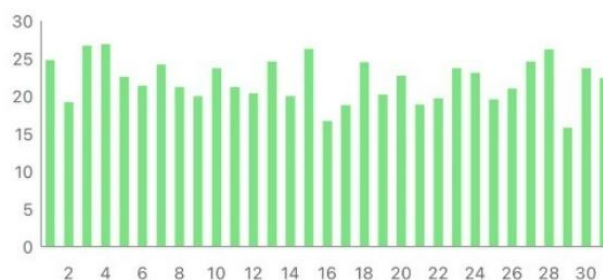


Ilustración 32: Generación de kWh por día en el mes de agosto.

Energía	599.9 kWh
Valor máximo	26.4kWh
Valor promedio	20.00kWh

Energía (kWh)

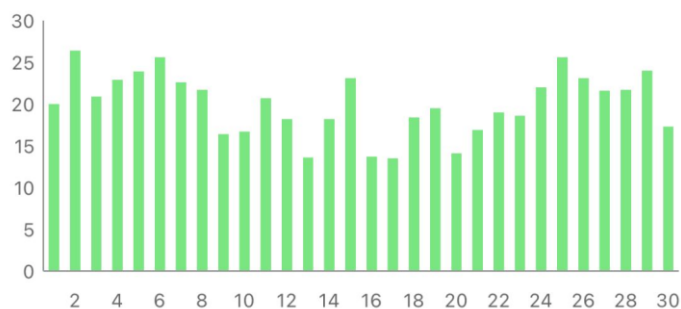


Ilustración 33: Generación de kWh por día en el mes de septiembre.

4.10. Evaluación del Desempeño Energético del Sistema Fotovoltaico

Se registró durante 4.5 meses la generación de kWh del sistema fotovoltaico, obteniendo los siguientes resultados:

Energía (kWh)

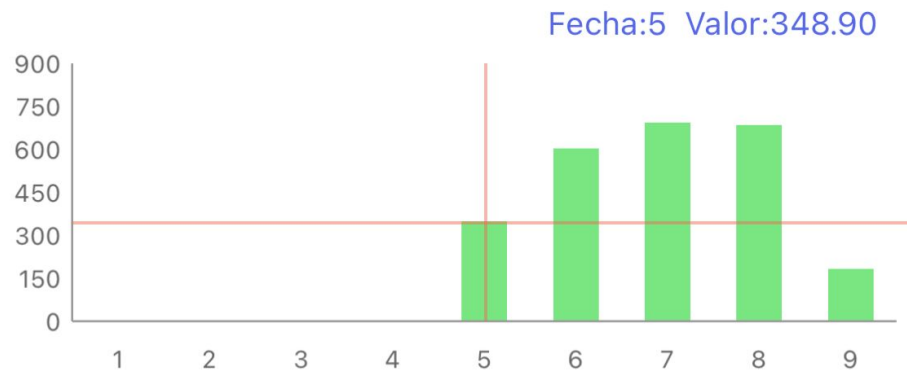


Ilustración 34: Generación de kWh en el mes de mayo (16)

Energía (kWh)

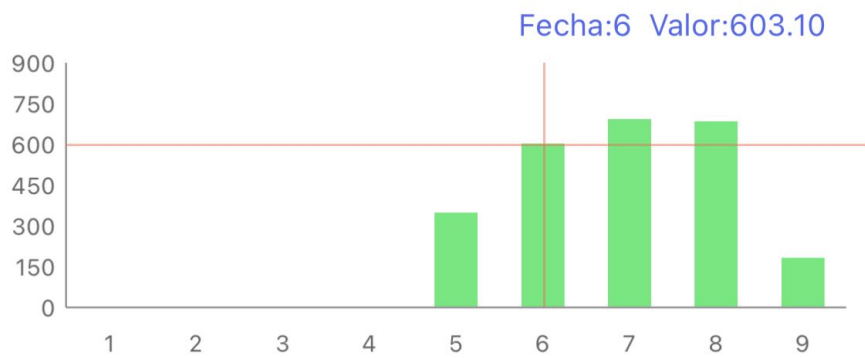


Ilustración 35: Generación de kWh en el mes de junio.

Energía (kWh)

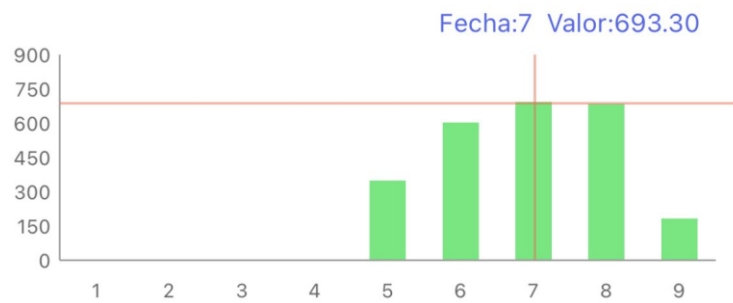


Ilustración 36: Generación de kWh en el mes de julio.



Ilustración 37: Generación de kWh en el mes de agosto.

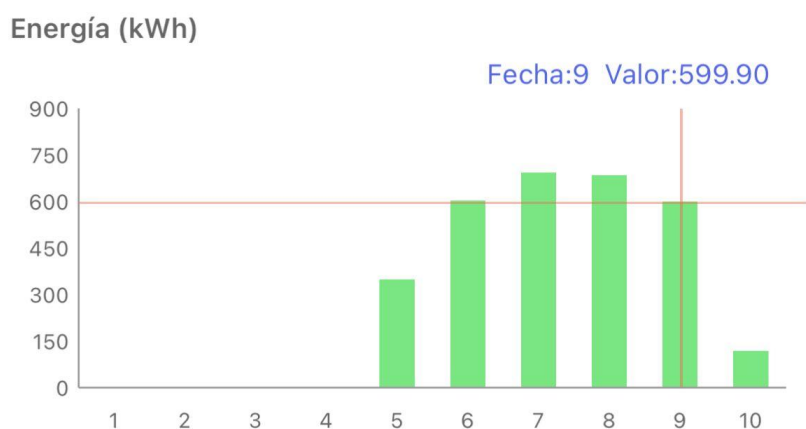


Ilustración 38: Generación de kWh en el mes de septiembre.

Dando un total de 3,048.5 kWh en un periodo de 138 días.

En junio, Tuxtla Gutiérrez presentó un aumento gradual en la nubosidad, con el porcentaje de tiempo con cielo nublado o mayormente nublado incrementándose de 85 % a 91 % durante el mes.

Esta elevada cobertura nubosa en junio, redujo la radiación solar incidente sobre los módulos fotovoltaicos, disminuyendo la generación de energía eléctrica en comparación con Julio y agosto, meses que presentaron menor nubosidad y, por lo tanto, mayores niveles de radiación solar disponible para el sistema.

Durante el mes de septiembre, la producción eléctrica experimentó una ligera disminución en comparación con junio, debido a que esta etapa del año corresponde al periodo más lluvioso en Tuxtla Gutiérrez, con un promedio aproximado de 21 días de lluvia. Además, la cobertura nubosa permaneció esencialmente constante durante todo el mes, limitando la cantidad de radiación solar directa disponible. Aun así, el sistema mantuvo un rendimiento estable, demostrando su capacidad de generación incluso bajo condiciones climáticas menos favorables.

4.11. Impacto Económico del Sistema Fotovoltaico Durante su Operación Inicial

Período	kWh	Importe	Pagos
del 07 ABR 25 al 06 JUN 25	770	\$1,955.00	\$1,955.00
del 06 FEB 25 al 07 ABR 25	1498	\$6,195.00	\$6,195.00
del 09 DIC 24 al 06 FEB 25	664	\$2,495.00	\$2,495.00
del 09 OCT 24 al 09 DIC 24	394	\$672.00	\$672.00
del 08 AGO 24 al 09 OCT 24	1132	\$3,468.00	\$3,468.00
del 06 JUN 24 al 08 AGO 24	693	\$1,560.00	\$1,560.00
del 08 ABR 24 al 06 JUN 24	1069	\$3,152.00	\$3,152.00

Ilustración 39: Historial de facturación de CFE.

Se observó cómo antes de la instalación del sistema fotovoltaico se hacían pagos hasta de 6,195 pesos mexicanos bimestrales, lo cual representaba una cantidad de dinero considerable para el usuario.

Del 08 de abril de 2024 al 07 de abril de 2025 el usuario pago a CFE la cantidad de 17,542 pesos.

En el periodo del 07 de abril de 2025 al 06 de junio de 2025 hubo una disminución del pago a 1,955 pesos mexicanos, debido a que el 16 de mayo de 2025 empezó a funcionar el sistema fotovoltaico, esta cantidad equivale a lo que el usuario consumió en 38 días de los 60 días que CFE toma como referencia para hacer la facturación.

Del 06 de junio de 2025 al 06 de agosto de 2025 hubo una disminución de pago del 99%, como se observa en la Ecuación 3, con respecto al último periodo facturado sin

el sistema fotovoltaico (06 de febrero de 2025 al 07 de abril del 2025), donde se pagó 6,195 pesos mexicanos.

$$\text{Porcentaje ahorrado} = \frac{6,195 - 57}{6,195} * 100 = 99\%$$



Ilustración 40: Recibo de agosto de 2025.

De esta forma se comprobó que el sistema diseñado si cubría el 100% de la demanda energética actual del usuario, reduciendo así el pago a la tarifa mínima por interconexión a CFE de 57 pesos bimestrales.

Si el usuario no incrementa su consumo en un año, estaría pagando 342 pesos anuales, ahorrando 17,200 pesos.

4.12. Proyección del Ahorro Acumulado y Retorno de Inversión

Según la literatura la vida útil de un sistema fotovoltaico es de 25 años aproximadamente con su respectivo mantenimiento cada 6 meses.

El ahorro acumulado en esos 25 años teniendo en cuenta que CFE sube un 9% anual a su tarifa se calculó con la Ecuación 4:

$$\text{Ahorro total} = (17,542 - 342) * \frac{1.09^{25} - 1}{0.09} = 1,456,855.41 \text{ pesos}$$



Ilustración 41: Gráfica del ahorro acumulado.

La gráfica muestra una proyección a 25 años entre la relación del ahorro y la inversión inicial. La línea roja representa la inversión inicial del proyecto, con un valor constante de \$60,000 MXN, la cual se mantiene fija a lo largo del tiempo. La línea azul refleja el ahorro acumulado generado por la reducción de los pagos de energía eléctrica a la CFE. Este ahorro crece de forma exponencial debido al incremento anual del costo de la electricidad, lo que hace que cada año el beneficio económico sea mayor.

El punto donde ambas curvas se cruzan, en el año 3.16, representa el retorno de inversión (ROI), es decir, el momento en que los ahorros generados igualan la inversión inicial. A partir de ese punto, el sistema comienza a generar beneficios netos, ya que los ahorros continúan acumulándose sin costos adicionales de inversión.

Cabe recalcar que los componentes del sistema fotovoltaico fueron cotizados en abril de 2025 y puede variar dependiendo del tipo de cambio reportado por el Diario Oficial de la Federación el día que se realice la cotización.

Finalmente, hacia el año 25, el ahorro acumulado supera 1.4 millones de pesos, lo que evidencia la alta rentabilidad a largo plazo del sistema y su contribución tanto económica como ambiental, al aprovechar energía limpia durante toda su vida útil.

4.13. Beneficios Ambientales Derivados del Sistema Fotovoltaico

Durante el periodo de evaluación (16 de mayo de 2025 a 30 de septiembre de 2025), el sistema fotovoltaico instalado produjo un total de 3,048.5 kWh de energía eléctrica. Esta generación de energía renovable tuvo un impacto ambiental positivo al sustituir la necesidad de generación mediante fuentes convencionales, lo cual permitió evitar la emisión de aproximadamente 1,219.4 $kgCO_{2e}$, calculada mediante la Ecuación 5.

$$CO_{2e} \text{ evitado} = 3,048.5 \text{ kWh} * 0.4 \frac{kgCO_{2e}}{kWh} = 1,219.4 \text{ kgCO}_{2e}$$

A su vez, los 1,219.4 $kgCO_{2e}$ evitados correspondieron al equivalente en emisiones que se producirían al quemar aproximadamente 508 kg de carbón bituminoso, como se aprecia en la Ecuación 6. Esta equivalencia permitió cuantificar no solo el beneficio en términos de gases de efecto invernadero evitados, sino también el ahorro directo de combustibles convencionales, lo que contribuyó a la disminución de contaminantes atmosféricos.

$$\text{Carbón evitado} = \frac{1,219.4 \text{ kgCO}_{2e}}{2.4 \text{ kgCO}_{2e}/\text{kg carbón}} = 508 \text{ kg carbón bituminoso}$$

Contemplando el poder calorífico del carbón bituminoso, los 508 kg son equivalentes a 16,542,512 kJ , representando un beneficio tanto ambiental como energético, como se muestra en la ecuación 7.

$$\text{Ahorro energético} = (508 \text{ kg}) \left(32,564 \frac{kJ}{kg} \right) = 16,542,512 \text{ kJ}$$

Finalmente, la cantidad total evitada por el sistema fotovoltaico durante su periodo de operación fue equivalente a la captura de carbono que realizarían aproximadamente 122 árboles plantados, como lo demuestra la Ecuación 8, lo cual contribuye significativamente a la mitigación de la huella de carbono del sitio donde se instaló el

sistema. Esta equivalencia con árboles plantados permite visualizar de manera tangible el impacto positivo que tuvo la producción de energía limpia sobre el entorno natural.

$$\text{Reducción de la deforestación} = \frac{1,219.4 \text{ kgCO}_{2e}}{10 \text{ kg CO}_{2e}/\text{árbol} \cdot \text{año}} = 121.94 = 122 \text{ árbol} \cdot \text{año}$$

El resultado obtenido se expresa en árbol·año, sin embargo, este valor representa únicamente una fracción del año (aproximadamente $\frac{1}{4}$ de año). En consecuencia, el resultado puede interpretarse como el número de árboles equivalentes necesarios para capturar la misma cantidad de CO₂ que fue evitada durante dicho periodo de cuatro meses.

Las ecuaciones presentadas anteriormente fueron calculadas a partir de la energía generada (kWh) durante un periodo de 138 días, correspondiente al tiempo de evaluación inicial del sistema fotovoltaico. Sin embargo, con el fin de obtener un análisis más completo y representativo, en esta sección se realizarán los cálculos considerando la vida útil del sistema, estimada en 25 años.

Para ello, se tomaron en cuenta los kWh que se proyecta generar a lo largo de dicho periodo, este enfoque permitirá evaluar el impacto ambiental positivo acumulado durante toda la vida operativa del sistema, reflejando de manera más precisa los beneficios obtenidos en términos de reducción de emisiones contaminantes y aprovechamiento sostenible de la energía solar.

$$\text{kWh generados durante vida útil} = \frac{8 * 555}{1000} * 4.5 * (365 * 25) = 182,317.5 \text{ kWh}$$

$$\text{CO}_{2e} \text{ evitado} = 182,317.5 \text{ kWh} * 0.4 \frac{\text{kgCO}_{2e}}{\text{kWh}} = 72,927 \text{ kgCO}_{2e}$$

$$\text{Carbón evitado} = \frac{72,927 \text{ kgCO}_{2e}}{2.4 \text{ kgCO}_{2e}/\text{kg carbón}} = 30,386.25 \text{ kg carbón}$$

$$\text{Ahorro energético} = (30,386.25 \text{ kg}) \left(32,564 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 989,497,845 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned}\text{Reducción de la deforestación} &= \frac{72,927 \text{ kgCO}_{2e}}{10 \text{ kg CO}_{2e}/\text{árbol} \cdot \text{año}} = 7,292.7 \\ &= 7,293 \text{ árboles equivalentes}\end{aligned}$$

La unidad resultante de la ecuación de Reducción de la deforestación se expresa en árboles equivalentes, esto se debe a que el periodo temporal ya está incorporado en el valor total de emisiones evitadas.

Los resultados obtenidos reflejan de manera integral el impacto ambiental positivo generado por la instalación del sistema fotovoltaico durante su vida útil de 25 años.

La energía eléctrica producida evitará la emisión de 72,927 kg de CO_{2e} , lo que equivale a 30,386 kg de carbón no quemado (989, 497,845 kJ). Además, la reducción de la deforestación es equivalente a 7,293 árboles, esto es evidencia del importante aporte del sistema en la mitigación del cambio climático y la preservación del medio ambiente. Esta cantidad de árboles representa aproximadamente entre 3.5 hectáreas (35,000 m^2) a 9 hectáreas (90,000 m^2) de cobertura forestal “Como referencia, Según el Municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas el parque Joyyo Mayu, cuenta con un área de 4 hectáreas (40,000 m^2)”, dependiendo de la densidad del ecosistema, lo que equivale a una superficie arbolada de entre 5 y 13 canchas de futbol profesional.

CONCLUSIONES

Se logró implementar y evaluar un sistema fotovoltaico interconectado a la red con una capacidad total de 4.44 kW, conformado por ocho módulos solares de 555 W cada uno. La instalación se llevó a cabo aplicando las especificaciones técnicas, materiales y estructuras adecuadas, garantizando la seguridad eléctrica, la eficiencia operativa y la correcta integración con la red de la CFE.

Como resultado, el sistema permitió reducir de manera significativa los costos de facturación eléctrica, registrando únicamente pagos bimestrales mínimos de interconexión entre 50 y 60 pesos, lo que representa un ahorro económico aproximado del 99 % respecto al consumo previo, que ascendía a 6,195 pesos. Además, al generar electricidad a partir de una fuente limpia y renovable como la energía solar, se logró una disminución en las emisiones de dióxido de carbono equivalente, $1,219.4 \text{ kgCO}_{2e}$ contribuyendo a la mitigación del cambio climático y promoviendo beneficios ambientales adicionales, tales como la conservación de recursos energéticos fósiles y la reducción de la huella de carbono asociada al consumo residencial de energía eléctrica.

Los resultados de esta proyección económica a 25 años demostraron la viabilidad técnica y financiera del sistema, evidenciando que la recuperación de la inversión se alcanza en un periodo relativamente corto y que, a largo plazo, el usuario obtiene beneficios económicos sostenidos y un impacto ambiental positivo.

REFERENCIAS

- [1] Secretaria de Energía (SENER), 2016. Balance Nacional de Energía 2016.
- [2] Massachussets Institute of Technology (MIT, Energy Initiative). The Future of Solar Energy. An Interdisciplinary MIT Study. Agosto, 2016. <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf>.
- [3] ¿Qué es un sistema fotovoltaico industrial? (s/f). Enel X. Recuperado el 22 de mayo de 2025, de <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-an-industrial-photovoltaic-system>.
- [4] Sostenibilidad – Compañía Nacional de Chocolates. Retrieved from <https://chocolates.com.co/sostenibilidad/>.
- [5] Mexifrutas impulsa la sustentabilidad con la instalación de paneles solares también en Arriaga, Chiapas | Mexifrutas. Retrieved from <https://mexifrutas.com/es/mexifrutas-impulsa-la-sustentabilidad-con-la-instalacion-de-paneles-solares-tambien-en-arriaga-chiapas/>.
- [6] Paneles Solares archivos -. Retrieved from <http://greendates.com.mx/category/paneles-solares/>.
- [7] La primera lavandería que funciona a energía solar está en B° Marqués. Retrieved from <https://expresionnorte.com.ar/la-primera-lavanderia-que-funciona-a-energia-solar-esta-en-b-marques/>.
- [8] Proyectos destacados – Consorcio Vilar – Paneles Solares Chiapas México. Retrieved from <https://consorciovilar.com/proyectos-destacados/>.
- [9] Espinoza Navarrete, E., Joscha Rosenbuch, & Martínez Fernández, M., Dr. (2018). LA INDUSTRIA SOLAR FOTOVOLTAICA y FOTOTÉRMICA EN MÉXICO (1.a ed.). Pro Mexico.
- https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_industria_solar_fv_y_ft_en_M_xico-compressed.pdf.

- [10] Casa Ocoxal / A-001 Taller de Arquitectura | ArchDaily México. Retrieved from <https://www.archdaily.mx/mx/949498/casa-ocoxal-a-001-taller-de-arquitectura>.
- [11] Solarama. (2024, 3 julio). Impacto Ambiental y Económico de la Energía Solar en México – Solarama Paneles solares México. Solarama Paneles solares México. <https://solarama.mx/blog/impacto-ambiental-y-economico/>.
- [12] Navarro Rayas, S., & González Moreno, J. A. (2000). Implementación de un sistema fotovoltaico para la alimentación de un edificio de usos múltiples. [Universidad tecnologica de la zona metropolitana de Guadalajara]. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/781/1/Soraya%20Navarro%20Rayas%2C%20Jos%C3%A9%20Antonio%20Gonz%C3%A1lez%2C%20C%C3%A9sar%20L%C3%B3pez%20Andrade%20MER.pdf>.
- [13] Cabrera Merchán, W. R., & Villa García, I. S. (2022). Diseño e implementación de un sistema solar fotovoltaico para una residencia que incluye sistemas smart home en el cantón Paute, sector San Cristóbal (Trabajo de titulación, Universidad Católica de Cuenca). Universidad Católica de Cuenca.
- [14] Vázquez López, C. Z. S. (2024). Sistema fotovoltaico comercial interconectado a la red: Diseño, implementación y evaluación (Tesis de licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- [15] Salvador, D. G. C. E. N. F. R. R. G. J. C. R. (s. f.). El Sol, la estrella más cercana a la Tierra. Ciencia UNAM. <https://ciencia.unam.mx/leer/1129/el-sol-la-estrella-mas-cercana-a-la-tierra>.
- [16] Energías renovables y eficiencia energética (1.a ed.). (2008). [Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.]. Julieta C. Schallenberg Rodríguez Gonzalo Piernavieja Izquierdo Carlos Hernández Rodríguez Pedro Unamunzaga Falcón Ramón García Déniz Mercedes Díaz Torres Delia Cabrera Pérez Gilberto Martel Rodríguez Javier Pardilla Fariña Vicente Subiela Ortín. <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>

[17] Energía solar: qué es, características y ventajas principales | Repsol. (2025, 9 junio). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml>.

[18] Corporativa.(S. f.).Energía eólica. Iberdrola.

<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia-eolica>.

[19] Iberdrola. (2019, 12 junio). ¿Qué es la Energía Hidroeléctrica. Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-hidroelectrica>.

[20] Qué es la energía geotérmica y cuáles son sus ventajas. (2025, 10 abril). REPSOL.

<https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-geotermica/index.cshtml>

[21] Energía procedente de biomasa. (2024, 29 mayo). <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energia-biomasa>.

[22] Universidad Europea, Universidad presencial (Madrid, Valencia, Alicante, Canarias, Málaga) y Online. (2025, 25 junio). Energía marina: qué es y tipos de energías del mar. Universidad Europea. <https://universidadeuropea.com/blog/energia-marina/#energia-marina-que-es>.

[23] Salvador, D. G. C. E. N. F. R. R. G. J. C. R. (s. f.). El océano, un gran generador de energía. Ciencia UNAM. <https://ciencia.unam.mx/leer/1220/el-oceano-un-gran-generador-de-energia>.

[24] Beneficios de usar energías renovables | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gob.mx. Retrieved from <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/beneficios-de-usar-energias-renovables-172766>.

[25] DamiaSolar. (2024, 10 septiembre). ¿Qué es y como funciona el efecto fotovoltaico? Blog Damia Solar. <https://www.damiasolar.com/blog/funcionamiento->

efecto-

fotovoltaico/#:~:text=El%20efecto%20fotovoltaico%20es%20la,y%20creando%20un%20circuito%20el%C3%A9ctrico.

[26] Caloryfrio, M. I. (2020, 23 junio). ¿Qué es el Efecto Joule? Aplicaciones para calefacción. caloryfrio.com. <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/que-es-el-efecto-joule-aplicaciones-para-calefaccion.html#:~:text=El%20efecto%20Joule%20es%20un,material%20por%20el%20que%20circulan.>

[27] Energía solar térmica - campus sostenible. (s. f.).
<https://www.um.es/web/campussostenible/ambiental/energia/energias-renovables/energia-solar-termica#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20solar%20t%C3%A9rmica%20utiliza,en%20los%20puntos%20de%20consumo.>

[28] Energía solar: qué es, características y ventajas principales | Repsol. (2025, 9 junio). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml>.

[29] Energía solar: qué es, características y ventajas principales | Repsol. (2024, 9 julio). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml>.

[30] Módulo fotovoltaico. (n.d.). Enel Green Power.
<https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-solar/modulo-fotovoltaico>.

[31] Conexión placas solares: tipos, esquema y cableado | SunFields. Retrieved from <https://www.sfe-solar.com/instalaciones-fotovoltaicas/conexion-serie-paralelo/>.

[32] IEA (2013), Photovoltaic and Solar Forecasting: State of the Art, Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA PVPS T14-01:2013, OECD/IEA, Paris.

[33] DOF – Diario Oficial de la Federación. (n.d.).
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5101826&fecha=06/08/2009#gsc.tab=0

[34] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (s.f.). Mapas de potencial solar en México.

[35] Como funciona un sistema solar interconectado | Erco Energy. Retrieved from <https://erco.energy/co/blog/como-funciona-un-sistema-solar-interconectado>.

[36] ¿Qué es un sistema solar aislado?. Retrieved from <https://solarama.mx/blog/sistema-solar-aislado/>.

[37] Krannich Solar México: Diferentes tipos de sistemas solares fotovoltaicos. (2022, December 12). <https://krannich-solar.com/mx-es/blog/diferentes-tipos-de-sistemas-solares-fotovoltaicos/>.

[38] ¿Qué es un sistema fotovoltaico y cómo funciona? | Enel X. Retrieved from <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>.

[39] Gustavo Palma Avila. (2020). Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red [Tesis de licenciatura, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/17434/2/Informe.pdf>

[40] Equipos que conforman un Sistema Interconectado a la Red – CCEEA. Retrieved from <https://ccee.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/equipos-que-conforman-un-sistema-interconectado-a-la-red>.

[41] Medidor bidireccional CFE ¿Qué es? Y ¿Cómo funciona?. Retrieved from <https://www.energiasolarinc.com/medidor-bidireccional-cfe>.

[42] Componentes para instalación de paneles solares esenciales. Retrieved from <https://solarama.mx/blog/componentes-para-instalacion-de-paneles-solares/>

[43] Jimenez Torres, E. A. (s. f.). Instalación de equipos y sistemas energéticos. Recuperado 21 de mayo de 2025, de <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-abierta-y-a-distancia-de-mexico/instalacion-de-equipos-y-sistemas-energeticos/eies-u1-ea-emjt-ejercicio-unidad-1/10492469>

[44] Importancia del dimensionamiento de un sistema fotovoltaico. Retrieved from <https://solarama.mx/blog/dimensionamiento-de-un-sistema-fotovoltaico/>.

[45] A guide for where to place your solar panels | Geo Green Power. Retrieved from <https://www.geogreenpower.com/blog/a-guide-for-where-to-place-your-solar-panels/>

[46] El impacto de las sombras en el rendimiento de los paneles solares. Retrieved from <https://greendates.com.mx/el-impacto-de-las-sombras-en-el-rendimiento-de-los-paneles-solares/>

[47] ¿Qué son los puntos calientes en paneles solares y cómo se generan?. Retrieved from <https://solarama.mx/blog/puntos-calientes-en-paneles-solares/>

[48] Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2023). Programas de medición neta y energías renovables en México. Comisión Federal de Electricidad. <https://www.cfe.gob.mx>.

[49] Sanchez, F. (2021, April 27). Norma para instalar paneles solares NOM 001. Inntecsol. <https://www.inntecsol.mx/energia-solar/nom-001-paneles-solares/>.

[50] Normas y estándares fotovoltaicos. Retrieved from <https://maerenovables.com/normas-estandares-sistemas-fotovoltaicos/>.

REFERENCIAS DE ILUSTRACIONES

[1] Proyectos Destacados – Consorcio Vilar – Paneles Solares Chiapas México. Retrieved From <https://Consortiovilar.Com/Proyectos-Destacados/>.

[2] Espinoza Navarrete, E., Joscha Rosenbuch, & Martínez Fernández, M., Dr. (2018). La Industria Solar Fotovoltaica Y Fototérmica En México (1.A Ed.). Pro Mexico.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428621/La_Industria_Solar_Fv_Y_Ft_En_M_Xico-Compressed.Pdf.

[3] Gallery of Ocoxal House / A-001 Taller de Arquitectura - 12. (s. f.). ArchDaily. <https://www.archdaily.com/949936/ocoxal-house-a-001-taller-de>

arquitectura/5f86cbcd63c0173bc6000640-ocoxal-house-a-001-taller-de-arquitectura-image

[4] Navarro Rayas, S., & González Moreno, J. A. (2000). Implementación de un sistema fotovoltaico para la alimentación de un edificio de usos múltiples. [Universidad tecnologica de la zona metropolitana de Guadalajara]. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/781/1/Soraya%20Navarro%20Rayas%2C%20Jos%C3%A9%20Antonio%20Gonz%C3%A1lez%2C%20C%C3%A9sar%20L%C3%B3pez%20Andrade%20MER.pdf>.

[5] [6] Cabrera Merchán, W. R., & Villa García, I. S. (2022). Diseño e implementación de un sistema solar fotovoltaico para una residencia que incluye sistemas smart home en el cantón Paute, sector San Cristóbal (Trabajo de titulación, Universidad Católica de Cuenca). Universidad Católica de Cuenca.

[7] Admin. (2018b, abril 28). (Español) Energía Solar Mexico. Sopelia Es la Plataforma Solar de América Latina. <https://www.energiasolar.lat/energia-solar-mexico/>

[8] Miriam. (2023, 17 agosto). Conceptos básicos sobre los paneles solares. Nueva Solar - Microinversores Solares. <https://nuevasolar.es/paneles-solares/>.

[9] Lucero, M. (2024, 20 noviembre). Conexiones en serie vs. Conexiones en paralelo: ¿Cuál es la mejor opción? - CIT Solar. CIT Solar. <https://citsolar.mx/conexiones-en-serie-vs-conexiones-en-paralelo-cual-es-la-mejor-opcion/>.

[10] [11] [12] Krannich Solar México: Diferentes tipos de sistemas solares fotovoltaicos. (2022, 12 diciembre). <https://krannich-solar.com/mx-es/blog/diferentes-tipos-de-sistemas-solares-fotovoltaicos/>.

[44] Mi espacio. (s. f.-b). <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/MiEspacio/login.aspx>

REFERENCIAS DE TABLA

Tabla [1] Cceea. (s. f.). Beneficios de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica - CCEEA. cceea.mx.

<https://cceea.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/beneficios-de-un-sistema-fotovoltaico-interconectado-a-la-red-electrica>