

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

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

TESIS

**“SISTEMA FOTOVOLTAICO COMERCIAL
INTERCONECTADO A LA RED: DISEÑO,
IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN”**

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

PRESENTA:

C. ZURI SADAY VÁZQUEZ LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOEL PANTOJA ENRIQUEZ



TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.

Noviembre 2024.



Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Dirección de Servicios Escolares
Departamento de Certificación Escolar
Autorización de impresión



Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
Fecha: 28 de octubre 2024.

C. Zuri Saday Vázquez López

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería en Energías Renovables

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:
Sistema Fotovoltaico Comercial Interconectado a la Red: Diseño,
implementación y evaluación.

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

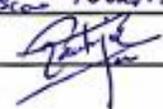
Revisores

Dr. Luis Alberto Hernández Domínguez

Mtro. Óscar Martínez Aguirre

Dr. Joel Pantoja Enríquez

Firmas:


Oscar Martínez Aguirre


Ccp. Expediente

Dedicatoria

A mis padres, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración y apoyo incondicional a lo largo de esta travesía. A ustedes, que con su amor, esfuerzo y dedicación me han enseñado que no hay meta inalcanzable y que el éxito es fruto del sacrificio y la perseverancia.

Este logro no es solo mío, sino de ustedes también. Les dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud, porque sin ustedes, nada de esto habría sido posible. Este logro es una pequeña muestra de todo lo que me han dado y de lo mucho que los aprecio y valoro.

Agradecimientos

Quiero dedicar este espacio para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra manera, me acompañaron durante este largo y retador proceso, brindándome su apoyo, ánimo y guía.

A mis hermanos, por ser mi sostén en los momentos de dificultad, por compartir conmigo sus palabras de aliento y por estar siempre presentes.

Al Dr. Joel Pantoja Enríquez, mi director de tesis, por su invaluable guía, consejos y dedicación. Gracias por compartir conmigo su vasto conocimiento, por su paciencia y por orientarme en cada etapa de este proyecto. Su apoyo ha sido fundamental para la culminación de este trabajo.

A mi novia, Candy Rodríguez Pérez, gracias por ser mi compañera incansable, paciencia y por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles. Tu apoyo me ha dado la fuerza para seguir adelante y nunca rendirme, y por ello, te agradezco profundamente.

Al Maestro Oscar Martínez Aguirre, quien no solo me brindó su ayuda al compartir sus conocimientos, sino que también ha sido un gran amigo. Su apoyo, tanto académico como personal, ha sido invaluable, y siempre estaré agradecido por su confianza, compañía y consejos que han enriquecido esta experiencia.

A todos ustedes, gracias por su apoyo incondicional. Este logro es también de ustedes.

Índice

INTRODUCCIÓN.	14
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	16
<i>Alcance del proyecto</i>	16
<i>Limitaciones y Desafíos:</i>	18
OBJETIVOS	19
<i>Objetivo general.</i>	19
<i>Objetivos particulares.</i>	19
PROBLEMÁTICA	20
JUSTIFICACIÓN	20
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	21
1.1 INTRODUCCIÓN.	21
1.2 CRECIMIENTO DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA.	22
1.3 IMPACTO AMBIENTAL	25
1.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	26
1.4.1 <i>Sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica</i>	30
2.5 TARIFAS.....	35
2.5.1 <i>Tarifas Residenciales.</i>	36
2.5.2 <i>Tarifas comerciales</i>	38
2.6 MARCO LEGAL	39
1.7 TRAMITACIÓN DE LOS PERMISOS.....	43
1.8 MODELOS DE CONTRATO CON CFE.....	45
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS.....	47
2.1 EL SOL PRINCIPAL FUENTE DE ENERGÍA.	47
2.2 RADIACIÓN SOLAR.	49
2.2.1 <i>Constante solar.</i>	50
2.2.2 <i>Radiación directa.</i>	51
2.2.3 <i>Radiación difusa</i>	51
2.2.4 <i>Radiación reflejada o albedo.</i>	51
2.2.5 <i>Irradiancia solar.</i>	52
2.2.6 <i>irradiación solar.</i>	53
2.2.7 <i>Hora sol pico.</i>	54
2.2.8 <i>Medición de la irradiancia y de la insolación.</i>	57

2.3 EFECTO FOTOVOLTAICO	60
2.4 CELDA FOTOVOLTAICA.....	61
2.4.1 Estructura y Funcionamiento:.....	61
2.4.2 Tipos de celdas Fotovoltaicas:.....	62
2.5 PANEL FOTOVOLTAICO.....	67
2.5.1 Parámetros eléctricos de un panel fotovoltaico.....	69
2.6 FACTORES DE EMPLAZAMIENTO.	72
2.6.1 Inclinación.....	72
2.6.2 Orientación.....	75
2.6.3 Sombras	77
2.9 INVERSORES.....	79
2.9.1 Característica técnicas.	80
2.9.2 Protecciones del inversor.	82
2.9.3 Configuraciones para conexión a red.....	83
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	85
3.1 CÁLCULOS	85
3.2 ARREGLOS FOTOVOLTAICOS.	89
3.3 ESTRUCTURAS.	92
3.3.1 Factores por conocer antes de elegir una estructura solar	92
3.4 ELECCIÓN DE INVERSORES	94
3.5 ELECCIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	95
3.6 DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN	97
3.6.1 Interruptores termomagnéticos.....	98
3.6.2 Interruptor diferencial.	99
3.6.3 Fusibles.....	100
3.6.4 Diodos de bloqueo.....	100
3.6.5 Diodos de paso.	101
3.6.6 Puesta a tierra.	101
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	102
4.1 DISEÑO Y PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.	103
4.2 IMPLEMENTACIÓN.....	112
4.2.1 Instalación.....	113
4.3 EVALUACIÓN.	118
4.3.1 Evaluación eficiente del sistema.	119

4.3.2 Identificar posibles mejoras.....	123
4.3.3 Consumo de energía.....	124
4.3.4 Estado de los componentes.....	126
4.3.5 Reducción del costo en el recibo de luz del usuario.....	126
4.4 ANÁLISIS ECONÓMICO.....	128
4.4.1 Beneficios económicos.....	129
4.4.2 Análisis de rentabilidad.....	130
4.4.3 Proyección de precios energéticos.....	132
4.4.4 Eficiencia Financiera a Largo Plazo.....	134
4.5 ANÁLISIS DE BENEFICIO AMBIENTAL.....	136
4.6 MANTENIMIENTO.....	137
CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN.....	141
REFERENCIAS.....	143

Índice de figuras

FIGURA 1. DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO.....	30
FIGURA 2. DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA. ...	31
FIGURA 3. SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.....	32
FIGURA 4. VENTAJAS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED.....	35
FIGURA 5. ESQUEMA DE CONTRAPRESTACIÓN A ELEGIR.....	46
FIGURA 6. ESTRUCTURA DEL SOL.....	49
FIGURA 7. COMPONENTES DE LA RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE.....	52
FIGURA 8. CURVAS DE IRRADIACIÓN SOLAR A LAS 12 GMT EN VARIOS LUGARES DEL MUNDO.	
53	
FIGURA 9. CURVA QUE MUESTRA LA DIFERENCIA ENTRE IRRADIANCIA SOLAR E IRRADIACIÓN SOLAR (INSOLACIÓN).....	54
FIGURA 10. HORAS SOLARES PICO.....	55
FIGURA 11. PIRANÓMETRO, MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN GLOBAL, DIRECTA Y DIFUSA.....	57
FIGURA 12. HELIÓGRAFOS EMPLEADOS PARA MEDIR LA DURACIÓN DE LA LUZ SOLAR.....	58

FIGURA 13.	ATLAS DE IRRADIACIÓN GLOBAL ANUAL DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS. 59	
FIGURA 14.	DIAGRAMA DEL EFECTO FOTOVOLTAICO.	61
FIGURA 15.	ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA CELDA SOLAR BASADA EN SILICIO Y SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	62
FIGURA 16.	ÁRBOL DE TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS.	64
FIGURA 17.	TIPOS DE PANELES SOLARES.....	67
FIGURA 18.	COMPONENTES DE UN PANEL FOTOVOLTAICO.....	69
FIGURA 19.	PARÁMETROS ELÉCTRICO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO.	69
FIGURA 20.	CURVAS I-V PARA DIFERENTES IRRADIANCIAS A 25°C Y PARA DIFERENTES TEMPERATURAS A UNA IRRADIANCIA DE 1000W/M2.....	70
FIGURA 21.	INVERSORES.	80
FIGURA 22.	PLACA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UN INVERSOR.	82
FIGURA 23.	MICROINVERSORES O INVERSORES INTEGRADOS.	83
FIGURA 24.	INVERSOR MONOFÁSICO PARA CONEXIÓN A RED MONOFÁSICA.....	84
FIGURA 25.	INVERSORES MONOFÁSICOS PARA CONEXIÓN A RED TRIFÁSICA.	84
FIGURA 26.	INVERSOR CENTRAL TRIFÁSICO.	85
FIGURA 27.	PANELES CONECTADOS EN SERIE.	91
FIGURA 28.	PANELES CONECTADOS EN PARALELO.....	92
FIGURA 29.	PUNTOS POR CONSIDERAR ANTES DE ELEGIR UNA ESTRUCTURA FOTOVOLTAICA. 93	
FIGURA 30.	ESTRUCTURAS SOBRE TECHO.	94
FIGURA 31.	INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO.	99
FIGURA 32.	INTERRUPTOR DIFERENCIAL.	99
FIGURA 33.	FUSIBLES.	100
FIGURA 34.	DIODOS DE BLOQUEO Y DIODOS DE BYPASS.	101
FIGURA 35.	PUESTA A TIERRA.	101
FIGURA 36.	MEDIDAS DE PANEL SOLAR DE LA MARCA JA SOLAR.	105

FIGURA 37.	INVERSOR ELEGIDO MARCA “GROWATT”	106
FIGURA 38.	CONECTORES MC4.	108
FIGURA 39.	PREPARACIÓN DEL SITIO.....	114
FIGURA 40.	MONTAJE DE LA ESTRUCTURA.	115
FIGURA 41.	INSTALACIÓN DE LOS PANELES SOLARES.	116
FIGURA 42.	SISTEMA FOTOVOLTAICO COMPLETAMENTE INSTALADO.	118
FIGURA 43.	PLATAFORMA DE MONITOREO REMOTO PARA EL SFI.....	119
FIGURA 44.	PRODUCCIÓN DIARIA EN KWH DEL MES DE AGOSTO.....	120
FIGURA 45.	PRODUCCIÓN MENSUAL EN KWH DEL SFI.	122
FIGURA 46.	RECIBO DE LUZ DEL USUARIO.	127
FIGURA 47.	GRÁFICA DE PERIODO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN PARA PRECIO MÍNIMO Y PRECIO MÁXIMO DE KWP INSTALADO.	132
FIGURA 48.	CONTRIBUCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED.	136

Índice de ecuaciones

EC 1.	HORA SOL PICO	56
EC 2.	RADIACIÓN PROMEDIO DIARIA MENSUAL MÁS BAJA DEL AÑO.	56
EC 3.	RADIACIÓN PROMEDIO DIARIA EN CADA MES DEL AÑO (DESDE ENERO A DICIEMBRE). .	56
EC 4.	POTENCIA.	70
EC 5.	INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO PARA IRRADIACIÓN.	70
EC 6.	TEMPERATURA DEL PANEL	71
EC 7.	EFICIENCIA DEL MÓDULO.	72
EC 8.	ÁNGULO DE INCLINACIÓN.	73
EC 9.	INTENSIDAD MÁXIMA A LA ENTRADA.	81
EC 10.	CONSUMO DIARIO.....	86

EC 11.	HORA SOL PICO.....	86
EC 12.	POTENCIA DE PANELES REQUERIDA.....	87
EC 13.	NÚMERO DE PANELES NECESARIOS PARA EL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	87
EC 14.	ÁNGULO DE INCLINACIÓN.....	88
EC 15.	NÚMERO DE INVERSORES.....	88
EC 16.	NÚMERO DE PANELES CONECTADOS EN SERIE.....	90
EC 17.	NÚMERO DE PANELES CONECTADOS EN PARALELO.....	91
EC 18.	POTENCIA.....	98
EC 19.	SECCIÓN TRANSVERSAL MÍNIMA DEL CABLE.....	109
EC 20.	RADIACIÓN MENSUAL ESTIMADA.....	121
EC 21.	PRODUCCIÓN DE POTENCIA ESTIMADA.....	122
EC 22.	COSTO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CON EL PRECIO MÍNIMO POR WP.....	128
EC 23.	COSTO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CON EL PRECIO MÁXIMO POR WP.....	129
EC 24.	AHORRO ANUAL.....	129
EC 25.	PERIODO DE RETORNO.....	130
EC 26.	PRECIO FUTURO.....	133
EC 27.	ROI.....	135
EC 28.	BENEFICIO AMBIENTAL.....	137

Índice de tablas

TABLA 1.	PRECIO DE DIFERENTES TARIFAS ELÉCTRICAS.....	36
TABLA 2.	CARGO POR REGIÓN DE LA TARIFA DAC.....	37
TABLA 3.	CARGO EN REGIÓN SURESTE DE TARIFA PDBT.....	38
TABLA 4.	CARGO EN REGIÓN SURESTE DE TARIFA GDBT.....	39

TABLA 5.	VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN SOLAR EN FUNCIÓN DE LA ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR.	50
TABLA 6.	ESTÁNDAR PARA ÁNGULOS DE INCLINACIÓN DE PANELES SOLARES.	75
TABLA 7.	TOTAL DE PÉRDIDAS.....	87
TABLA 8.	CONSUMO HISTÓRICO DEL RECIBO DE LUZ DEL USUARIO.	103
TABLA 9.	EQUIVALENCIA DE SECCIÓN DE CABLE AWG A MM².	111
TABLA 10.	TOTAL DE PÉRDIDAS.....	125
TABLA 11.	COMPARATIVA DE LA ENERGÍA CONVENCIONAL Y LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA....	134

RESUMEN

El presente trabajo titulado "Sistema Fotovoltaico Comercial Interconectado a la Red: Diseño, Implementación y Evaluación" tiene como objetivo principal dimensionar e implementar un sistema fotovoltaico interconectado a la red para un establecimiento comercial, con el propósito de generar la energía eléctrica necesaria para cubrir toda la demanda energética del negocio. Se buscó maximizar el ahorro en los costos de electricidad, y se realizó una evaluación exhaustiva de la instalación y su desempeño desde que se instaló en el mes de noviembre hasta el mes de septiembre.

Para lograr este objetivo, se llevaron a cabo diferentes pasos que incluyeron: la evaluación de la demanda energética del establecimiento, el análisis de la radiación solar disponible en el lugar de la instalación, la selección adecuada de los componentes del sistema fotovoltaico y el diseño del sistema

Se evaluaron aspectos técnicos, económicos y ambientales para demostrar la viabilidad del proyecto, resaltando el impacto positivo en el valor del activo comercial, la mejora de la imagen corporativa y los beneficios derivados de la autosuficiencia energética y la resiliencia ante los aumentos en los precios de la electricidad.

Los resultados muestran que el sistema fotovoltaico, no solo reduce significativamente los costos operativos del negocio, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental

Finalmente, este estudio demuestra que la implementación de sistemas fotovoltaicos es una alternativa eficiente y rentable para los establecimientos comerciales, ya que, en el caso de estudio, el periodo de retorno fue de tan solo 2 años, mejorando su competitividad y teniendo un impacto ambiental positivo en donde se ha reducido: 13,726.3 kg de CO₂, 757 árboles y 5507 kg de carbón ahorrado.

ABSTRACT

The present work entitled "Grid-connected Commercial Photovoltaic System: Design, Implementation and Evaluation" has as its main objective to size and implement a grid-connected photovoltaic system for a commercial establishment, with the purpose of generating the necessary electric energy to cover all the energy demand of the business. The aim was to maximize savings in electricity costs, and a thorough evaluation of the installation and its performance was carried out since it was installed in November until September.

To achieve this objective, different steps were carried out that included: the evaluation of the energy demand of the establishment, the analysis of the solar radiation available at the installation site, the appropriate selection of the photovoltaic system components and the design of the system. Technical, economic and environmental aspects were evaluated to demonstrate the viability of the project, highlighting the positive impact on the value of the commercial asset, the improvement of the corporate image and the benefits derived from energy self-sufficiency and resilience to increases in electricity prices.

The results show that the photovoltaic system not only significantly reduces the operating costs of the business, but also contributes to environmental sustainability. Finally, this study demonstrates that the implementation of photovoltaic systems is an efficient and profitable alternative for commercial establishments, since, in the case study, the payback period was only 2 years, improving their competitiveness and having a positive environmental impact where the following have been reduced: 13,726.3 kg of CO₂, 757 trees and 5,507 kg of carbon saved.

Introducción.

El presente documento aspira a diseñar, implementar y evaluar un sistema fotovoltaico interconectado a red para un establecimiento comercial sujeta a la tarifa PDBT.

Después, debemos identificar los beneficios económicos para evidenciar la rentabilidad del proyecto. Y, por último, diseñar el sistema fotovoltaico interconectado a la red que sea acorde con el porcentaje requerido para minimizar costos y garantizar el servicio de energía eléctrica constante.

El documento consta de 4 capítulos, divididos en sus respectivos subtemas; el primer capítulo antecedentes cumple un rol fundamental para contextualizar la investigación y establecer su relevancia dentro del campo de estudio. Este capítulo aporta diversos beneficios, se revisa y analiza la literatura existente sobre el tema de investigación. Se presentan las teorías, conceptos, modelos y estudios previos relevantes que sustentan la investigación, esto nos permite ubicar la tesis dentro de un marco de conocimiento más amplio y así, comprender su contribución a la comprensión del problema de investigación. Así, podemos avalar la credibilidad de la investigación.

El capítulo de antecedentes expone las brechas de conocimiento o las limitaciones de estudios previos que justifican la realización de la nueva investigación, también se identifica la importancia y la originalidad del problema de investigación que se aborda en la tesis. El conocimiento de estudios previos puede ayudar a anticipar posibles resultados o hallazgos de la investigación propia. Esto permite enfocar la investigación de manera más efectiva y optimizar la recolección y análisis de datos.

El segundo capítulo llamado fundamentos, juega un papel crucial para sentar las bases teóricas y conceptuales de la investigación. Este capítulo aporta diversos beneficios que son esenciales para la solidez y el rigor académico del trabajo. El capítulo de fundamentos presenta las teorías, conceptos, modelos y autores

relevantes que sustentan la investigación, se realiza una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el tema de estudio, identificando las perspectivas teóricas más importantes y representativas. Esto permite al lector comprender el marco conceptual que sustenta la investigación y la forma en que se aborda el problema de investigación. Se proporciona definiciones claras y precisas de los términos y variables clave que se utilizan en la investigación.

Como tercer capítulo tenemos el diseño metodológico, es fundamental comunicar de manera clara y precisa la forma en que se llevó a cabo la investigación. Este capítulo describe los pasos, técnicas y herramientas utilizados para recolectar, analizar e interpretar los datos que sustentan los hallazgos y conclusiones del estudio. Permite comprender con exactitud cómo se realizó la investigación, lo que aumenta la transparencia y la replicabilidad del estudio. Un diseño metodológico sólido y bien documentado aumenta la confiabilidad de los resultados obtenidos. El capítulo de diseño metodológico debe estar estrechamente relacionado con el marco teórico de la investigación.

Y como último capítulo está resultados y análisis, este capítulo se presentan los resultados de la investigación, en donde se expone de forma organizada y detallada los datos recopilados durante el proyecto. Es importante que se deba mantener un enfoque objetivo y descriptivo, tratando de evitar interpretaciones o conclusiones prematura.

Después, debemos interpretar el significado de los resultados, en donde se adentra en su análisis, se relacionan con el marco teórico y los objetivos planteados inicialmente, en donde también se discuten las implicaciones de los resultados, destacando su relevancia y aporte al conocimiento en el área de estudio.

En base a los resultados y su discusión, se formulan conclusiones sólidas y respaldadas por la evidencia, deben ser claras y consistentes con el resto de la tesis. También se pueden identificar áreas que requieren mayor estudio o se plantean nuevos enfoques para abordar el tema de investigación, esto demuestra

el potencial de la investigación para generar conocimiento y contribuir a su campo de estudio.

Definición del problema

Se centra en la necesidad de reducir los costos energéticos en un establecimiento comercial mediante la implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red. La energía eléctrica representa uno de los gastos más significativos en la operación de los comercios, especialmente en aquellos sujetos a tarifas elevadas como la PDBT.

Alcance del proyecto

El proyecto abarca desde la fase de estudio hasta la implementación, puesta en marcha y seguimiento del sistema fotovoltaico. Se incluyen las siguientes etapas:

- Análisis detallado de la demanda energética:
 - Cálculo de del consumo eléctrico, incluyendo la demanda máxima, factor de potencia, horarios pico, etc.

- Estudio de la radiación solar:
 - Recopilación de datos históricos de irradiación solar en el lugar, considerando la inclinación y orientación óptimas para los paneles solares.
 - Análisis de los patrones de sombreado causados por edificios cercanos, árboles o elementos arquitectónicos del establecimiento comercial.

- Evaluación de los efectos de la nubosidad, la temperatura y la humedad en la producción de energía.
- Diseño del sistema fotovoltaico:
 - Selección de tecnología fotovoltaica adecuada considerando factores como eficiencia, costo y disponibilidad.
 - Dimensionamiento del sistema para garantizar la cobertura de la demanda energética estimada, considerando un factor de seguridad para futuras ampliaciones.
 - Diseño de la estructura de soporte de los paneles solares, optimizando la eficiencia espacial y considerando las cargas estructurales.
 - Selección e integración de inversores solares, equipos de protección, sistemas de monitoreo y control, y cableado eléctrico.
- Implementación y puesta en marcha:
 - Obtención de los permisos necesarios para la instalación del sistema fotovoltaico.
 - Construcción de la estructura de soporte y montaje de los paneles solares.
 - Conexión del sistema a la red eléctrica, cumpliendo con las normativas técnicas y de seguridad.
 - Puesta en marcha y pruebas de funcionamiento del sistema.
- Monitoreo y mantenimiento:
 - Implementación de un sistema de monitoreo remoto para la evaluación del rendimiento del sistema fotovoltaico.

- Establecimiento de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para garantizar la durabilidad y eficiencia del sistema.

Limitaciones y Desafíos:

- Disponibilidad de espacio: La superficie disponible en la cubierta del establecimiento comercial puede limitar la capacidad de instalación de los paneles solares.
- Condiciones climáticas adversas: Períodos prolongados de nubosidad, lluvias intensas o granizo pueden afectar la producción de energía.
- Sombreado: La presencia de obstáculos puede reducir significativamente la producción de energía, especialmente durante las horas pico.
- Variabilidad de la demanda: La demanda eléctrica de un establecimiento puede variar considerablemente a lo largo del día y a lo largo del año, lo que dificulta la optimización del funcionamiento del sistema.
- Normativa: La normativa eléctrica y de construcción puede imponer restricciones al diseño y la instalación del sistema fotovoltaico.

Objetivos

Objetivo general.

El objetivo primordial es diseñar, implementar y evaluar un sistema fotovoltaico interconectado a red para un establecimiento comercial.

Objetivos particulares.

Para alcanzar el objetivo general, se establecen los siguientes objetivos particulares:

- Evaluar la demanda energética del establecimiento:
 1. Revisión de los recibos de luz.
 2. Identificación del consumo.
 3. Cálculo del consumo promedio diario y bimestral.

- Dimensionar el sistema fotovoltaico:
 1. Cálculo de la potencia requerida.
 2. Selección de componentes.
 3. Consideración de pérdidas y sobredimensionamiento.

- Implementar el sistema fotovoltaico:
 1. Preparación del sitio de instalación.
 2. Montaje de la estructura y paneles.
 3. Conexión eléctrica y configuración del inversor.

- Monitorear y evaluar el rendimiento del sistema instalado:

1. Revisión de producción diaria y mensual.
2. Verificación del estado del sistema.
3. Análisis de ahorro energético y económico.

Problemática

El aumento constante de los precios de la electricidad en México representa un desafío económico significativo para los establecimientos comerciales, especialmente aquellos con un consumo energético considerable. El negocio del caso de estudio de esta investigación consume 27.4 kWh diarios, lo que genera facturas eléctricas elevadas que impactan negativamente en sus costos operativos y márgenes de ganancia.

Además, las empresas enfrentan crecientes presiones para adoptar prácticas sostenibles y reducir su huella de carbono. Sin embargo, muchas de ellas no han implementado tecnologías de energía renovable debido a los altos costos iniciales asociados con sistemas como los fotovoltaicos, a pesar de que ofrecen beneficios económicos a largo plazo. La instalación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red puede no solo reducir los costos energéticos, sino también proteger al negocio contra futuros aumentos en las tarifas de electricidad, que se proyecta alcancen 6.95 MXN/kWh en los próximos años.

Justificación

La implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red en el establecimiento comercial es una solución técnica y económicamente viable para abordar los crecientes costos de la electricidad y la dependencia de fuentes de energía convencionales.

Desde una perspectiva ambiental, el sistema fotovoltaico permite al establecimiento reducir su huella de carbono

Desde el punto de vista de mantenimiento, el sistema fotovoltaico es relativamente sencillo y barato de mantener. Además, el mantenimiento preventivo asegura que el sistema opere de manera eficiente durante su vida útil, evitando gastos adicionales significativos.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Introducción.

El presente capítulo tiene como objetivo establecer los antecedentes y contextualizar la investigación sobre la implementación de un sistema fotovoltaico conectado a la red para uso comercial.

En primer lugar, se analizará el crecimiento exponencial de la energía fotovoltaica a nivel mundial en las últimas décadas.

Posteriormente, se realizará una comparación entre las tarifas eléctricas comerciales y residenciales, poniendo énfasis en las diferencias en su estructura y en los incentivos existentes para la autogeneración de energía. Esta comparación permitirá identificar las oportunidades de ahorro económico que ofrece la instalación de un sistema fotovoltaico para las empresas.

En conjunto, este capítulo proporcionará una base sólida para el desarrollo de los siguientes capítulos.

1.2 Crecimiento de la energía fotovoltaica.

Cada paso ha sido crucial para el desarrollo de la tecnología fotovoltaica que conocemos hoy. Ahora, los paneles solares no solo son viables para aplicaciones prácticas, sino que, también son una pieza clave en la transición hacia fuentes de energías renovables. Con el increíble desarrollo para la mejora de la eficiencia y la reducción de costos que se ha obtenido a lo largo de los años, se ha expandido a una utilización global.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por primera vez en el año 1839 por el físico francés Edmond Becquerel, en donde observó un aumento de generación de energía eléctrica entre dos electrodos metálicos sumergidos en un electrolito cuando se exponían en el sol.

El siguiente paso, lo dio el ingeniero eléctrico inglés Willoughby Smith en el año 1873, descubriendo que el selenio podía utilizarse como fotoconductor. Años más tarde, en 1877, el profesor William Grylls y su alumno Richard Evans Day aplicaron el principio de la fotocelda de Becquerel al selenio. Esto confirmó que la electricidad se genera cuando se expone a la luz. [1].

Después de 50 años del descubrimiento de Becquerel, en 1883, Charles Fritz fabricó la primera celda solar de selenio. Recubrió el semiconductor de selenio con una fina capa de oro para formar las uniones. Este dispositivo sólo tenía una eficiencia de alrededor del 1%. Fue el primero en demostrar que un material sólido sin partes móviles podía utilizarse para convertir la luz solar directamente en energía eléctrica. [2].

En el año de 1946, el investigador estadounidense Russell Ohl patentó la primera celda solar de silicio. La cantidad de energía eléctrica que se obtenía era muy mínima y quedaba descartada cualquier aplicación práctica. Pero en 1953, se da la posibilidad de una aplicación práctica del fenómeno cuando tres científicos, Darryl Chaplin, Calvin Fuller y Gerald Pearson, fabricaron casi accidentalmente una celda fotovoltaica basada en el material de silicio que resultó mucho más

eficiente que cualquiera hecha de selenio. Fueron perfeccionando el invento y produjeron celdas solares de silicio capaces de proporcionar suficiente energía eléctrica como para que pudiesen obtener aplicaciones prácticas de ellas. De esta manera empezaba la carrera de las placas fotovoltaicas como proveedoras de energía. [3]

Una empresa llamada Hoffman electronics con sus investigaciones lograron alcanzar una eficiencia del 15%. Las investigaciones siguieron dando un gran avance con el paso de los años y, asimismo, los paneles solares se fueron perfeccionando hasta el punto de que la agencia espacial de los Estados Unidos de América decidió utilizar paneles solares en satélites espaciales, tuvieron grandes avances pues el costo de inversión para seguir con la investigación no era un limitante, así que, en 1955, se empezó la producción de paneles fotovoltaicos para aplicaciones espaciales.

Con el desarrollo de la era espacial, los paneles solares se utilizaron para alimentar diversas partes de las naves espaciales a finales de los años 50 y 60, empezando por el satélite Vanguard I El 17 de marzo de 1958, el primer satélite alimentado con paneles solares fotovoltaicos. El satélite llevaba 0,1W en una superficie aproximada de 100 cm² para alimentar un transmisor de 5 mW. [2]. Si bien en este satélite los paneles solares eran solo la fuente de energía de respaldo, acabaron por convertirse en la fuente principal cuando las baterías consideradas fuente de alimento se agotaron en tan sólo 20 días. El equipo estuvo operativo con esa configuración por 5 años. Seguido por el Vanguard II, el Explorer III y el Sputnik III. En 1964, la NASA lanzó el Nimbus, un satélite alimentado enteramente por paneles solares de 470 Watios. [2].

El precio de conseguir un vatio de energía bajó enormemente en la década de 1970, lo que llevó a la aplicación de la unidad en lugares remotos donde los servicios públicos conectados a la red no podían existir de forma asequible.

Hasta este momento los paneles solares eran exitosos en su funcionamiento, pero la idea de tenerlos en proyectos más pequeños y con bajos costos aún era un reto el cual Dr. Elliot Berman decidió afrontar con el patrocinio de EXXON, desarrolló y

creó una celda solar mucho más barata que reducía el costo por vatio de 100 USD a 20 USD. Para ello empleo un silicio con un grado de pureza menor y unos materiales encapsulantes más baratos, pero combinando todo para mayor eficiencia. [3] [4].

En 1980 se construyeron plantas de energía con paneles solares con ARCO solar, produciendo más de 1 megavatio de paneles solares al año. La empresa ayudó a crear la primera central eléctrica a escala de megavatios en Hisperia, California. Ese año finalizó la construcción de un proyecto del Departamento de Energía de Estados Unidos denominado Solar One. Este proyecto producía 10 megavatios de corriente, guiando la energía del sol hacia un punto focal común para producir calor. El calor hacía funcionar un generador de turbina de vapor. Para ello utilizaba 1820 espejos, cada uno de los cuales tenía 40 m², con una superficie total de más de 72.000 m². [4].

En 1985 las ventas de celdas fotovoltaicas habían alcanzado los 250 millones dólares. La Universidad de Gales del Sur había aumentado la eficiencia de las celdas solares de silicón alrededor del 20%. Un año después, ARCO lanzó el primer módulo de energía solar de capa fina disponible en el mercado. [4].

En 1994, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos desarrolló una celda solar. La celda estaba hecha de fosfuro de galio e indio y arseniuro de galio. Supera la marca del 30% de eficiencia, lo que significa que convierte en energía utilizable el 30% de la luz solar que incide sobre ella. Un rascacielos de Nueva York utilizó estas nuevas celdas finas de mayor eficiencia en una selección de sus plantas. Ayudaron a satisfacer las necesidades energéticas del edificio unos años más tarde.

Llegamos ahora al año 2000. La construcción de paneles solares en la mayor planta alcanzó una capacidad de producción de 100 megavatios de energía al año. La energía solar se había convertido en un gran negocio para los productores y vendedores de todo el mundo.

Alemania y otros países habían desarrollado un mercado solar fotovoltaico doméstico de gran éxito. En 2006 se produjo una amplia cobertura informativa. Ello se debió a la decisión de varios de los principales minoristas de electricidad de la calle de almacenar módulos solares fotovoltaicos. [5].

En los últimos años, se ha asistido a una enorme inversión en plantas de energía solar a escala de servicios públicos. A menudo se baten récords de tamaño. La mayor planta de energía solar en la actualidad es la planta de energía solar de Golmud, en China. La planta tiene una capacidad instalada de 200 megavatios. Un proyecto solar en la India, llamado Gujarat Solar Park, un conjunto de parques solares independientes, cuenta con una capacidad instalada combinada de 605 megavatios. [6].

1.3 Impacto ambiental

Es correcto que las instalaciones fotovoltaicas de conexión a red presentan un impacto medioambiental significativamente bajo en comparación con otras fuentes de energía. Durante su operación, no producen ruido significativo, emisiones de gases contaminantes, ni residuos tóxicos que requieran un sistema de saneamiento especial. Además, su presencia física tiene un efecto mínimo en la flora y fauna local.

Es importante considerar el ciclo de vida completo de los componentes fotovoltaicos, incluyendo la extracción de materiales, la fabricación, el transporte, la instalación y, finalmente, el reciclaje o disposición al final de su vida útil. Aunque el impacto durante la fase de operación es mínimo, la sostenibilidad a largo plazo de la energía fotovoltaica también depende de prácticas responsables en todas estas etapas.

La fabricación de componentes para sistemas fotovoltaicos, aunque es una tecnología que promueve la generación de energía limpia, no está exenta de

impactos ambientales. Durante el proceso de producción, se utilizan materias primas como silicio, vidrio y metales, cuya extracción y procesamiento pueden tener consecuencias negativas para el medio ambiente. Por ejemplo, la minería de silicio puede llevar a la deforestación y la contaminación del agua, mientras que la extracción de metales como el cadmio o el plomo puede afectar negativamente la biodiversidad y la salud humana.

Además, la fabricación de paneles solares genera emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono y el hexafluoruro de azufre, contribuyendo al calentamiento global y al deterioro de la calidad del aire. Sin embargo, es importante reconocer que los beneficios a largo plazo de la energía solar, como la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y la generación de electricidad sin emisiones contaminantes, pueden compensar estos impactos iniciales. Las empresas del sector están implementando prácticas de sostenibilidad y economía para minimizar estos efectos, como la certificación de reciclabilidad de los módulos al final de su vida útil y el cumplimiento de estándares de sostenibilidad en la tecnología Inverter.

Estas medidas, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, buscan asegurar que la energía solar no solo sea limpia en su generación, sino también en su producción y ciclo de vida completo. [7].

1.4 Sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos se basan en la capacidad de las celdas fotovoltaicas de transformar la energía solar en energía eléctrica (DC). Esta energía, mediante el uso de un inversor, es transformada a corriente alterna (AC), la cual puede ser utilizada en residencias y comercios. Para la absorción de la energía solar se utilizan paneles solares, estos tienen la capacidad de producir energía eléctrica al aprovechar la irradiación solar que incide en ellos. Cuando los rayos solares impactan la celda, ocurre un movimiento de electrones que, al canalizarlos se

obtiene corriente eléctrica. La generación de energía eléctrica dependerá de la energía lumínica, la cantidad de horas que el sol actué sobre el panel solar, el tipo y la cantidad de módulos instalados, su orientación e inclinación. [5].

La energía solar fotovoltaica se presenta como una alternativa viable y atractiva para suministrar energía eléctrica a una amplia gama de usuarios, desde zonas rurales (sistemas autónomos) hasta hogares, comercios e industrias (sistemas conectados a la red). La tecnología fotovoltaica ha demostrado ser altamente confiable y su instalación en viviendas e industrias es relativamente sencilla. [5].

Ventajas de un sistema fotovoltaico.

- Los sistemas fotovoltaicos representan una solución energética prometedora y sostenible. Su capacidad para generar electricidad en el lugar necesario las convierte en una opción versátil, especialmente en áreas remotas o de difícil acceso.
- Además, su operación no emite contaminantes, lo que las hace amigables con el medio ambiente y contribuye a la reducción de la huella de carbono.
- El ahorro en combustibles fósiles es otro beneficio significativo, al disminuir la dependencia de recursos no renovables.
- La fiabilidad es una de sus grandes ventajas, ya que, al no tener partes móviles, los SF requieren menos mantenimiento y tienen una vida útil prolongada de al menos 20 años.
- Los costos operativos y de mantenimiento son relativamente bajos, lo que las hace económicamente atractivas a largo plazo.

- Por último, la modularidad del sistema permite una fácil expansión para satisfacer la demanda energética creciente, simplemente añadiendo más paneles solares.

Estas características hacen de los sistemas fotovoltaicos una opción energética cada vez más preferida a nivel mundial. [6].

Desventajas de un sistema fotovoltaico.

- La implementación de sistemas fotovoltaicos aislados o no interconectados a la red eléctrica, como la de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), requiere de baterías para almacenar energía, lo que puede incrementar significativamente el costo inicial del sistema.
- Además, la instalación de grandes parques solares puede tener un impacto en los ecosistemas debido a la extensión de terreno que ocupan, y si no se realiza una adecuada integración paisajística, también pueden generar un impacto visual negativo.
- Por otro lado, la generación de energía solar es inherentemente variable, ya que depende de las condiciones atmosféricas, como la nubosidad y la intensidad de la radiación solar.
- Asimismo, es importante considerar que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos tiende a disminuir con el aumento de la temperatura, lo cual puede afectar el rendimiento general del sistema.

Estos factores deben ser cuidadosamente evaluados al planificar y diseñar sistemas fotovoltaicos para maximizar su eficiencia y minimizar su impacto ambiental y visual. [6].

Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar de diversas maneras, se presenta una clasificación básica:

1. Sistemas fotovoltaicos autónomos:

- **Independencia de la red:** Estos sistemas operan de forma aislada, sin conexión a la red eléctrica.
- **Ubicación ideal:** Su aplicación principal se encuentra en zonas rurales donde la red eléctrica no está disponible.
- **Almacenamiento de energía:** Para garantizar el suministro durante la noche o en días nublados, estos sistemas suelen incorporar baterías para almacenar el excedente de energía solar generado durante el día.

La figura 1 presenta un esquema simplificado del funcionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo. En el diagrama se observa la conexión de los componentes principales, como los paneles solares, un controlador de carga, baterías para almacenamiento de energía y un inversor, que convierte la corriente continua (DC) generada por los paneles en corriente alterna (AC) para el consumo eléctrico. [6].

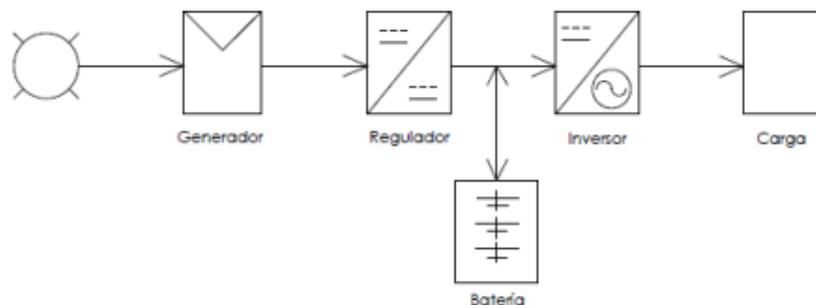


Figura 1. Diagrama unifilar de un sistema fotovoltaico autónomo.

2. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red:

- **Interacción con la red:** Estos sistemas se encuentran conectados a la red eléctrica, permitiendo la inyección del excedente de energía generada.
- **Beneficios de la red:** La red eléctrica actúa como un "banco de baterías" natural, eliminando la necesidad de costosos sistemas de almacenamiento.
- **Compensación por excedentes:** En algunos casos, los usuarios pueden recibir compensación económica por la energía solar inyectada a la red.

1.4.1 Sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica

Es un sistema fotovoltaico de generación eléctrica en el que la corriente de energía directa del GFV (Generador fotovoltaico) es convertida en corriente alterna(c.a.), a la tensión y frecuencia de la red eléctrica y sincronizada con ella. Al conectarse en paralelo con la red, el SFV (Sistema fotovoltaico) contribuye al suministro de la energía demandada a la red. Si existe una carga local en el inmueble, ésta debe ser alimentada de cualquiera de las dos fuentes o por ambas simultáneamente, dependiendo de los valores instantáneos de la carga y de la potencia de salida del SFV. Cualquier superávit de la potencia del SFV es inyectado a la red eléctrica y cualquier déficit es demandado por ésta. [5].

Cabe destacar que, para implementar un sistema interconectado, se deben contar con los permisos necesarios y equipos proporcionados por las empresas generadoras de energía de cada localidad. [2].

Las instalaciones fotovoltaicas se pueden conectar a la red eléctrica de las siguientes maneras:

- En baja tensión:
 - Conexión monofásica (230 V): si la potencia nominal de la instalación es inferior a 5 kW.
 - Conexión trifásica (400 V): Si la potencia nominal de la instalación se encuentra entre 5 kW y 100 kW.
- En media o alta tensión: normalmente, en instalaciones con potencias superiores a 100 kW. [7].

A continuación, se muestra la figura 2 con una configuración de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica. En él se observan los paneles solares que generan energía en corriente continua (DC), conectados a un inversor que convierte esta energía en corriente alterna (AC), apta para el consumo. El sistema está vinculado a la red eléctrica, lo que permite que la energía generada por los paneles se utilice en el consumo del usuario y el excedente se envíe a la red.

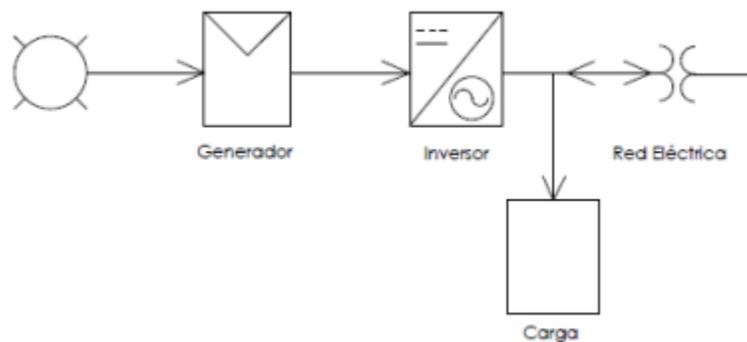


Figura 2. Diagrama unifilar de un sistema interconectado a la red eléctrica.

La forma de medición del sistema de Interconexión a red se lleva mediante un contador bidireccional que registra de los kW/h generados por el sistema de paneles solares entregados a la red y los kW/h que consume el usuario, el pago a CFE será el resultado de la diferencia de energía que exista entre CFE y la

energía que generó su equipo solar. La capacidad máxima instalada en paneles solares podrá ser hasta 10 kW para uso residencial y hasta 30kW para uso comercial en baja tensión. [5].

En la figura 3 se muestra un diagrama de bloques específico para un SFVCR, donde se encuentran cada uno de los componentes que hacen parte de este y que pueden ser aplicados en la generación distribuida (GD).

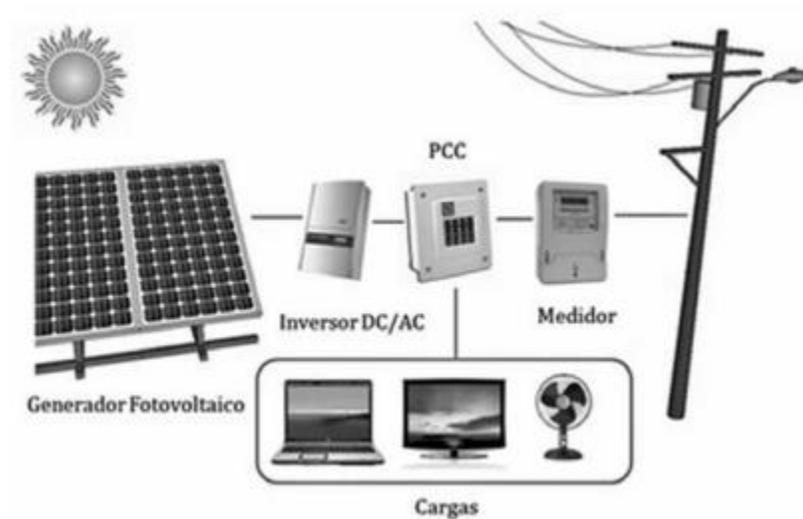


Figura 3. Sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica.

Los seis bloques funcionales que lo conforman se describen a continuación.

- Generador fotovoltaico: formado por los paneles solares y su correspondiente estructura de soporte.
- Acondicionador de potencia: es el responsable de adecuar los parámetros de potencia producidos por el generador DC a tensión variable, a los parámetros requeridos por la red eléctrica de baja tensión (AC a 120 o 208 V), también conocido como inversor.

- Punto de acople común: (PCC, point of common coupling), donde se ubican los elementos de protección adoptados para garantizar la seguridad del propio SFVCR y la seguridad de la red eléctrica.
- Contador bidireccional de energía AC: tiene como objeto registrar la energía que se consume de la red además de la energía que está siendo entregada al sistema interconectado en un instante de tiempo específico.
- Carga: conformada por todos aquellos elementos (lineales y/o no lineales) que demandan energía eléctrica para su funcionamiento.
- Red eléctrica. [7].

En el dimensionado de este tipo de sistema FV, se deben de considerar los siguientes aspectos:

- Obtención de parámetros meteorológicos y de radiación solar del lugar donde se instalará el sistema FV.
- Se determina la demanda energética del lugar.
- Se determina el número de paneles para abastecer parcial o totalmente la demanda energética, de acuerdo con la necesidad.
- Se dimensiona el inversor adecuado a la demanda.
- Se calcula el cableado. [8].

Existen dos tipos de sistema interconectado: con respaldo y sin respaldo.

Aunque es poco común encontrar un sistema interconectado a la red con respaldo de batería, es posible implementarlo, lo que naturalmente incrementa los costos de inversión inicial del proyecto. Sin embargo, esto reduciría la demanda de energía de la red pública. El funcionamiento es el siguiente: cuando se genera electricidad mediante los paneles solares, se comienza a cargar el banco de baterías almacenando la cantidad calculada de energía.

El exceso de energía producido se entrega a la red pública, lo que proporciona un mayor beneficio económico, ya que la energía almacenada en las baterías puede utilizarse por la noche para iluminación u otras actividades. Esto reduce significativamente el suministro de energía de la red pública y, por ende, el costo de la factura. [2]

Por otro lado, un sistema interconectado a la red sin respaldo utiliza un contador bidireccional que permite controlar el consumo y la producción de energía eléctrica. Al consumir energía de la red, el contador gira en un sentido, contabilizando la energía consumida durante un período. Sin embargo, al producir energía mediante el sistema fotovoltaico y entregarla a la red pública, el contador gira en sentido opuesto, descontando del consumo registrado. En otras palabras, la energía producida se almacena en la red eléctrica. [2] [8].

Ventajas de un sistema fotovoltaico interconectado a la red:

- Es el más eficiente dado que la energía se transmite directo a la red de distribución eléctrica.
- Los paneles solares generan potencia que reduce su consumo de la red de distribución eléctrica y reduce su factura. Si la potencia no es suficiente el balance es suplido por la CFE, si los paneles solares generan más electricidad de la que está consumiendo, entonces el medidor bidireccional va registrando ese excedente de energía a su favor. [Ref 12 Hernández].

La figura 4 presenta un esquema que resalta las principales ventajas de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

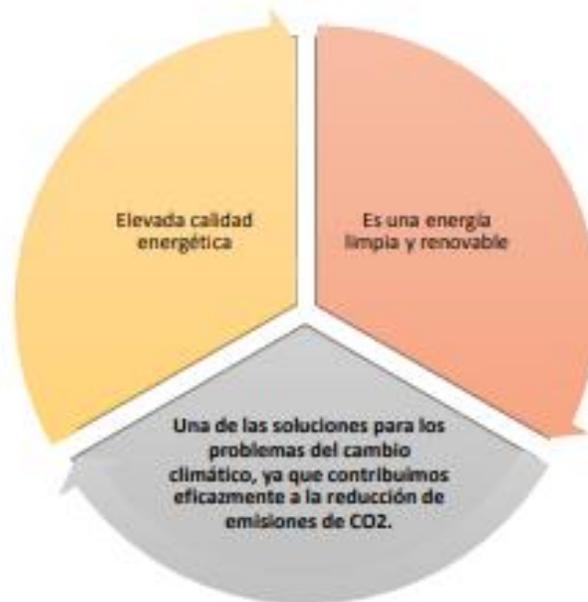


Figura 4. Ventajas de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

2.5 Tarifas

La tarifa es un factor clave para tomar en cuenta, ya que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) maneja diferentes tarifas dependiendo a que se esté destinando la electricidad, de la intensidad del uso y ubicación geográfica. Es importante mencionar que el costo por kWh puede variar por zona y por época del año.

Haremos alusión sobre las tarifas que tiene CFE para Hogar, Comercio, Industria, etc. Tarifas 1, PDBT, GDBT, GDMTO, GDMTH, HS, HIS, etc. Posteriormente hablaremos con más detalle sobre la tarifa comercial.

2.5.1 Tarifas Residenciales

En las tarifas residenciales existen dos tipos. La primera es la tarifa 1, esta es la tarifa subsidiada por el gobierno para los hogares mexicanos, es una de las tarifas más baratas que tiene CFE. Aunque no todas las tarifas 1 son iguales, a esta, dependiendo de la zona se le puede añadir una letra. A, B, C, D, E o F.

En México tenemos un clima variado, esto provoca que las necesidades eléctricas no sean las mismas para una familia que vive en el clima templado del centro a una que vive en el desierto del norte.

La tabla 1 presenta una comparación de las tarifas eléctricas disponibles para los usuarios, detallando los precios por kilovatio-hora (kWh) de cada tarifa. Esta tabla es útil para los usuarios que buscan entender las opciones de tarifas eléctricas, permitiendo una evaluación informada para seleccionar la tarifa más adecuada según sus necesidades de consumo energético. [9].

Tabla 1. Precio de diferentes tarifas eléctricas.

Tarifa	Consumo límite para aplicación de Tarifa DAC	febrero 2022			julio 2022			
		Consumo Básico \$0.887 kWh	Consumo Intermedio \$1.079 kWh	Consumo Excedente \$3.153 kWh	Consumo Básico	Consumo Intermedio bajo	Consumo Intermedio alto	Consumo Excedente
Tarifa 1	250 kWh al mes	Los primeros 75 kWh	Los siguientes 65 kWh	Por cada kWh adicional a los anteriores	\$0.912 kWh (los primeros 75 kWh)	\$1.111 kWh (los siguientes 65 kWh)	-	\$3.248 kWh (los kWh adicionales)
Tarifa 1A	300 kWh al mes	Los primeros 100 kWh	Los siguientes 50 kWh	Por cada kWh adicional a los anteriores	\$0.912 kWh (los primeros 75 kWh)	\$1.111 kWh (los siguientes 75 kWh)	-	\$3.248 kWh (los kWh adicionales)
Tarifa 1B	400 kWh al mes	Los primeros 75 kWh	Los siguientes 100 kWh	Por cada kWh adicional a los anteriores	\$0.816 kWh (los primeros 125 kWh)	\$0.944 kWh (los siguientes 100 kWh)	-	\$3.248 kWh (los kWh adicionales)
Tarifa 1C	850 kWh al mes	Los primeros 75 kWh	Los siguientes 100 kWh	Por cada kWh adicional a los anteriores	\$0.816 kWh (los primeros 150 kWh)	\$0.944 kWh (los siguientes 150 kWh)	\$1.219 kWh (los siguientes 150 kWh)	\$3.248 kWh (los kWh adicionales)
Tarifa 1D	1,000 kWh al mes	Los primeros 75 kWh	Los siguientes 125 kWh	Por cada kWh adicional a los anteriores	\$0.816 kWh (los primeros 175 kWh)	\$0.944 kWh (los siguientes 225 kWh)	\$1.219 kWh (los siguientes 200 kWh)	\$3.248 kWh (los kWh adicionales)
Tarifa 1E	2,000 kWh al mes	Los primeros 75 kWh	Los siguientes 125 kWh	Por cada kWh adicional a los anteriores	\$0.677 kWh (los primeros 300 kWh)	\$0.845 kWh (los siguientes 450 kWh)	\$1.098 kWh (los siguientes 150 kWh)	\$3.248 kWh (los kWh adicionales)
Tarifa 1F	2,500 kWh al mes	Los primeros 75 kWh	Los siguientes 125 kWh	Por cada kWh adicional a los anteriores	\$0.677 kWh (los primeros 300 kWh)	\$0.845 kWh (los siguientes 900 kWh)	\$2.056 kWh (los siguientes 1300 kWh)	\$3.248 kWh (los kWh adicionales)

La tarifa DAC (Doméstica de Alto Consumo) se aplica a los hogares que pasan el consumo establecido en la tabla de arriba. Esta tarifa por lo general es entre 6 y 7

veces más cara que la 1, es incluso más cara que la tarifa PDBT (tarifa comercial). La tarifa DAC es la tarifa más cara por kWh que tiene CFE.

Su costo fijo al mes es de \$127.18 y el cargo por kWh varía según la zona del país, en la zona norte y noreste el kWh cuesta \$5.711.

La tabla 2 muestra un desglose de los cargos aplicados a la tarifa de Alto Consumo (DAC) según diferentes regiones. Cada fila incluye el nombre de la región, el cargo específico por kilovatio-hora (kWh) y cualquier otro costo adicional que se aplique en esa área.

Esta información permite a los usuarios conocer las variaciones en los precios de la tarifa DAC en función de su ubicación geográfica, facilitando así la planificación del consumo eléctrico y la estimación de los costos totales en función del consumo energético. La tabla es una herramienta valiosa para aquellos que buscan optimizar su gasto en electricidad dentro de la tarifa DAC. Estos son los costos de la tarifa DAC en todo México: [9].

Tabla 2. Cargo por región de la tarifa DAC.

REGIÓN	Cargo Fijo	Cargo por energía consumida (\$/kWh)	
	\$/mes	Temporada de Verano	Temporada Fuera de Verano
Baja California	\$127.18	\$6.080	\$5.224
Baja California Sur	\$127.18	\$6.624	\$5.224
	Cargo Fijo	Cargo por energía consumida (\$/kWh)	
	\$/mes		
Central	\$127.18	\$6.255	
Noroeste	\$127.18	\$5.860	
Norte y Noreste	\$127.18	\$5.711	
Sur y Peninsular	\$127.18	\$5.799	

2.5.2 Tarifas comerciales

La tarifa PDBT (Pequeña Demanda en Baja Tensión) es la que por lo general tienen los negocios pequeños y medianos los cuales no tienen transformador o subestación, a los que acudimos diariamente a comer, hacer compras, etc. En esta modalidad se pueden consumir hasta 25 kW al mes, y tiene un costo de kWh que ronda aproximadamente los \$4.00, lo que la hace más barata que la tarifa doméstica de alto consumo (DAC) pero mucho más cara que la tarifa 1.

Tabla 3. Cargo en región sureste de tarifa PDBT.

Tarifa	Descripción	Cargo	Unidades	OCT-24
PDBT	Pequeña demanda baja tensión hasta 25 kW-mes	Fijo	\$/mes	36.36
		Variable (Energía)	\$/kWh	4.036

GDBT (Gran Demanda en Baja Tensión) es una tarifa no tan común entre los comercios, en muchas ocasiones los negocios prefieren utilizar la tarifa GDMTO (Gran Demanda en Media Tensión Ordinaria), ya que esta brinda un mejor costo por kWh. Se llega a esta tarifa cuando un negocio tiene un consumo superior a los 25 kW al mes. Esta Tarifa se aplica para negocios más grandes como lo pueden ser supermercados o pequeños hoteles.

Tabla 4. Cargo en región sureste de tarifa GDBT.

Tarifa	Descripción	Cargo	Unidades	OCT-24
GDBT	Gran demanda baja tensión mayor a 25 kW-mes	Fijo	\$/mes	363.59
		Variable (Energía)	\$/kWh	1.593
		Distribución	\$/kW	457.52
		Capacidad	\$/kW	268.30

2.6 Marco legal

El objetivo primordial de esta sección es definir los requerimientos para el diseño, instalación, inspección, autorización y utilización de sistemas fotovoltaicos interconectados con la red eléctrica (SFVI) que garanticen la seguridad del personal de la CFE y de los usuarios de esta, la calidad de la energía en la red, así como la integridad física y operacional de la red eléctrica y de los propios SFVI.

Aplica para la interconexión a la red eléctrica de baja tensión de SFV con capacidad hasta 30 kWp, los cuales pueden estar instalados en viviendas individuales, inmuebles comerciales, escuelas y edificios públicos. La especificación considera únicamente SFVI que utilizan inversores estáticos de estado sólido, para la conversión de corriente directa (c.d.) a corriente alterna (c.a.). [10]

Normas que aplican.

NOM-001-SEDE-2005:

El objetivo de esta NOM es establecer las especificaciones y lineamientos de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas a la utilización de la energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de seguridad para las personas y sus propiedades, en lo referente a la protección contra:

- Las descargas eléctricas,
- Los efectos térmicos,
- Las sobrecorrientes,
- Las corrientes de falla y
- Las sobretensiones.

El cumplimiento de las disposiciones indicadas en esta NOM promueve el uso de la energía eléctrica en forma segura; asimismo esta NOM no intenta ser una guía de diseño, ni un manual de instrucciones para personas no calificadas.

Campo de aplicación

1.2.1 Esta NOM cubre a las instalaciones destinadas para la utilización de la energía eléctrica en:

a) Propiedades industriales, comerciales, de vivienda, cualquiera que sea su uso, públicas y privadas, y en cualquiera de los niveles de tensión de operación, incluyendo las utilizadas para el equipo eléctrico conectado por los usuarios. Instalaciones en edificios utilizados por las empresas suministradoras, tales como

edificios de oficinas, almacenes, estacionamientos, talleres mecánicos y edificios para fines de recreación.

b) Casas móviles, vehículos de recreo, construcciones flotantes, ferias, circos y exposiciones, estacionamientos, talleres, lugares de reunión, lugares de atención a la salud, construcciones agrícolas, marinas y muelles.

c) Todas las instalaciones del usuario situadas fuera de edificios;

d) Alambrado fijo para telecomunicaciones, señalización, control y similares (excluyendo el alambrado interno de aparatos);

e) Las ampliaciones o modificaciones a las instalaciones, así como a las partes de instalaciones existentes afectadas por estas ampliaciones o modificaciones.

Los equipos eléctricos sólo están considerados respecto a su selección y aplicación para la instalación correspondiente.

1.2.2 Esta NOM no se aplica en:

a) Instalaciones eléctricas en embarcaciones.

b) Instalaciones eléctricas para unidades de transporte público eléctrico, aeronaves o vehículos automotores.

c) Instalaciones eléctricas del sistema de transporte público eléctrico en lo relativo a la generación, transformación, transmisión o distribución de energía eléctrica utilizada exclusivamente para la operación del equipo rodante o de señalización y comunicación.

d) Instalaciones eléctricas en áreas subterráneas de minas, así como en la maquinaria móvil autopropulsada de minería superficial y el cable de alimentación de dicha maquinaria.

e) Instalaciones de equipo de comunicaciones que esté bajo el control exclusivo de empresas de servicio público de comunicaciones donde se localice. [11]

NOM-008-SCFI-2002:

Esta Norma Oficial Mexicana establece las definiciones, símbolos y reglas de escritura de las unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI) y otras unidades fuera de este Sistema que acepte la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), que, en conjunto, constituyen el Sistema General de Unidades de Medida, utilizado en los diferentes campos de la ciencia, la tecnología, la industria, la educación y el comercio. [12]

IEC 60364-7-712:2017:

muestra todos los cambios del contenido técnico en comparación con la edición anterior. IEC 60364-7-712:2017 se aplica a la instalación eléctrica de sistemas fotovoltaicos destinados a alimentar total o parcialmente una instalación. El equipamiento de una instalación fotovoltaica, como cualquier otro equipamiento, se aborda únicamente en lo que respecta a su selección y aplicación en la instalación. Esta nueva edición incluye importantes revisiones y ampliaciones, teniendo en cuenta la experiencia adquirida en la construcción y operación de instalaciones fotovoltaicas, y los avances tecnológicos, desde que se publicó la primera edición de esta norma. [13]

RESOLUCION Núm. RES/119/2012:

Establecer y comunicar los requerimientos técnicos, administrativos y legales para la interconexión al Sistema de las instalaciones de los Generadores o Permisionarios con Fuentes de Energía Renovables o Cogeneración Eficiente, mediante los cuales el Suministrador mantiene el Sistema operando con seguridad, confiabilidad y competitividad. [14]

También se tienen las normas para sistemas fotovoltaicos que debe seguir el instalador. La secretaría de trabajo y previsión social (STPS) administra y regula

las relaciones laborales (obrero-patrón), para proteger a los trabajadores como las que se muestra a continuación:

NOM-009-STPS:

Establece condiciones de seguridad para realizar trabajos en alturas. Normalmente las instalaciones fotovoltaicas van en azoteas o lugares altos, es importante considerarla. Establece el uso de equipo de seguridad como un lineamiento para conservar la integridad física del instalador.

NOM-029-STPS:

Establece que las instalaciones eléctricas en los centro de trabajo deben recibir mantenimiento para conservar sus condiciones de seguridad.

NOM-017-STPS:

Hace obligatorio el uso del equipo de protección. El patrón debe proporcionar seguridad a sus trabajadores. Establece los requisitos mínimos para el equipo de protección del personal correspondiente. El trabajador debe de portar equipo de protección dieléctrico. Al momento de realizar la instalación, como es el casco, guantes, botas, etc. [15]

1.7 Tramitación de los permisos.

requisitos para realizar un contrato de interconexión:

- Llenar el formato de la solicitud para interconexión debidamente contestado.

- Croquis de ubicación geográfica de la central eléctrica (ubicación del suministro eléctrico del solicitante).
- Diagrama unifilar de la central eléctrica y, en su caso, centros de carga que compartirán el mismo punto de interconexión/conexión.
- Ficha técnica de la tecnología de generación utilizada.
- Ficha técnica y certificado del inversor de corriente o sistema de adecuación de corriente (si es el caso).
- Si cuentas con servicio de energía eléctrica suministrado a través de CFE Suministrador de Servicios Básicos, es necesario presentar una copia del último aviso recibo del usuario final (al corriente en los pagos), cuyo centro de carga compartirá el mismo punto de interconexión/conexión que la central eléctrica. Caso contrario, deberás contar con el Registro Móvil de Usuario (RMU) asignado en tu contrato de suministro.

Instalar un sistema fotovoltaico en el sector industrial requiere dos dictámenes obligatorios: La Unidad de Verificación de Instalaciones Eléctricas (UVIE) y la Unidad de Inspección (UI).

La UVIE debe realizarse antes de comenzar el proceso de interconexión y su función es verificar que el sistema fotovoltaico cumpla con los estándares de seguridad y requerimientos técnicos que solicita la Norma Oficial Mexicana (NOM). Un proveedor de sistemas de paneles solares no podría verificar sus propias instalaciones, es por eso por lo que un tercero evalúa más a detalle la parte técnica y verifica mediante pruebas y comprobación visual que la seguridad de las personas e instalaciones fotovoltaicas está garantizada.

Después de que se comprueba que la instalación fotovoltaica cumple con la norma correspondiente, se emite el dictamen de verificación. Las empresas o personas capacitadas para realizar una UVIE han sido certificadas por CFE para realizar estas verificaciones, de hecho, existe un padrón de unidades verificadoras y para ser parte de éste deben cumplirse requisitos muy puntuales que dicta la Secretaría de Energía (SENER).

A diferencia de la UVIE, la Unidad de Inspección o UI se lleva a cabo durante el procedimiento de interconexión y su función es certificar que los puntos de interconexión cumplen con los requisitos del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) para su incorporación en la red eléctrica.

La UI se realiza por una cuestión de seguridad, ya que una mala interconexión puede ocasionar una falla que ocasione un apagón generalizado y comprometa la confiabilidad, la seguridad y la calidad en el servicio eléctrico.

Contrario al dictamen UVIE, que es emitido por la empresa que contratamos, el dictamen UI está hecho a través de la empresa que elegimos del padrón de verificadores de UI, pero es expedido por la CRE. [16].

1.8 Modelos de contrato con CFE.

Existen 3 modelos de contratos de contra prestación de la energía entregada a las Redes Generales de Distribución:

Medición Neta de Energía (Net Metering)

El cliente consume y genera energía en un mismo contrato de suministro. Esta energía se compensa entre sí y se emite una única facturación.

Facturación Neta (Net Billing)

La energía consumida que CFE factura al cliente es independiente de la energía que el cliente genera y vende a CFE; es decir, no se compensa. Se debe asociar a un contrato de suministro vigente con CFE.

Venta total de energía

El generador exento vende a CFE toda la energía generada. No existe un contrato de suministro de energía eléctrica del generador con CFE.

Los trámites se realizan únicamente a través de las ventanillas de los Centros de Atención a Clientes de CFE Suministrador de Servicios Básicos. El trámite de contratación es totalmente gratuito, en caso de que se requiera una evaluación de las Redes Generales de Distribución (RGD), pudiera tener un costo a cargo del solicitante.

Para darle seguimiento a la solicitud, puede ser marcando 071 o acudiendo a la ventanilla de un Centro de Atención a Clientes. [17]

La figura 5 muestra un esquema que ilustra las opciones de contraprestación que los usuarios pueden seleccionar en un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

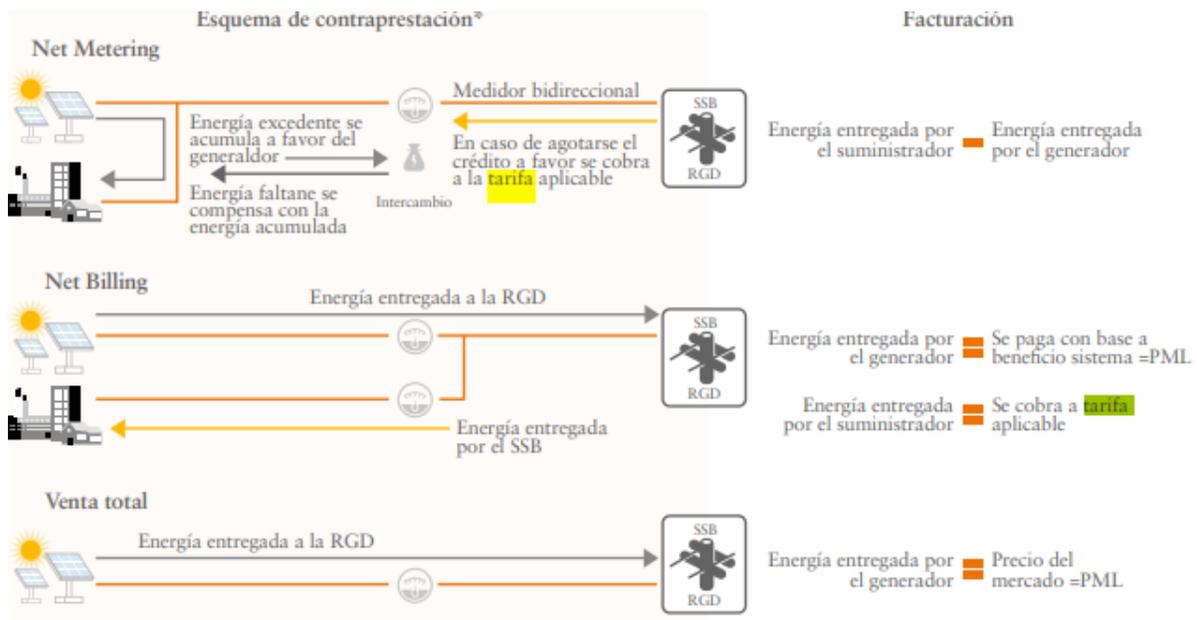


Figura 5. Esquema de contraprestación a elegir.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

2.1 El sol principal fuente de energía.

El sol es la única estrella de nuestro sistema planetario denominado sistema solar, se estima que existe hace 4650 millones de años y que desaparecerá dentro de 5000 millones de años; está compuesto, en gran parte por hidrógeno, algo de helio y pequeñas cantidades de otros elementos, su masa corresponde al 99% del total de la masa de nuestro sistema.

El sol es una gran bola de plasma a altas temperaturas y presiones en donde ocurren fusiones nucleares con gran transformación de masa y liberación de energía en forma de radiaciones electromagnéticas. La estructura interior del sol está constituida por:

- Núcleo. Es la parte central del sol, contiene enorme cantidad de plasma de gran densidad, a una presión de muchos millones de veces la presión atmosférica, temperatura de 15000000 K (quince millones de Kelvin) y funciona como una planta de fusión nuclear. Toneladas de átomos de hidrógeno se fusionan, convirtiéndose en helio, perdiendo mucha masa y liberando gran cantidad de energía de acuerdo con la ecuación de Einstein: $e = mc^2$. El núcleo es la zona responsable de generar calor y luz, a todo el sistema solar, sustancias esenciales para la existencia de vida en la tierra.
- Zona radiactiva. Se encuentra después del núcleo, la densidad, presión y temperatura del plasma de esta franja son muy inferiores a las que se encuentran en el núcleo, por lo que todas las radiaciones electromagnéticas emanadas del centro pueden viajar hacia el exterior relativamente fácil.

- Zona convectiva. Se encuentra por encima de la zona radiactiva e inmediatamente por debajo de la fotosfera que es la superficie del sol.
- Fotosfera. Es la capa superficial y visible del sol, temperatura de 6000 K, movimientos del plasma controlados por campos magnéticos locales que permiten la emisión de luz hacia el exterior.
- Mancha solar. Lugares oscuros en la superficie del sol debido a temperaturas inferiores que las zonas de su alrededor y a grandes campos magnéticos que controlan el movimiento del material.

La región exterior o atmósfera solar está constituida por:

- Protuberancias. Son arcos gigantes de plasma, controlados por grandes campos magnéticos, que ascienden desde la fotosfera hasta la atmósfera solar y pueden *“extinguirse suavemente o estallar; enviando hacia el espacio grandes cantidades de material solar”*.
- Cromosfera. Es la primera capa exterior, se encuentra inmediatamente después de la fotosfera, tiene un espesor de 10000 km y color rojizo, no es posible observarla directamente debido a su relativa transparencia.
- Corona solar. Es la parte más externa del sol, su temperatura supera varios millones de kelvin y contrariamente a lo que aparentemente debiera ser, es muy superior a la de la fotosfera e incluso a la del núcleo solar, este fenómeno es llamado inversión térmica solar. En la corona se encuentran zonas activas en donde campos magnéticos inmensos concentran plasma

de alta densidad y producen explosiones gigantescas llamadas ráfagas, enviando enormes cantidades de energía al espacio. [18] [19].

La figura 6 muestra un esquema detallado de las capas que componen el sol. Se observan las diferentes zonas, desde el núcleo, donde ocurre la fusión nuclear y se genera la energía, hasta las capas externas como la zona radiativa y la zona convectiva, responsables de la transferencia de calor hacia la superficie.

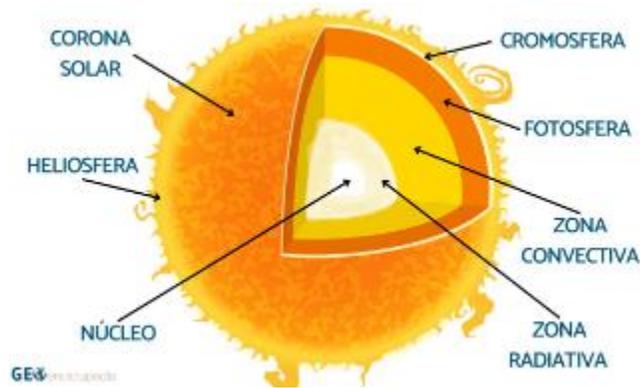


Figura 6. Estructura del sol.

2.2 Radiación solar.

Es la energía emitida por el Sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. [20].

Cualquier aplicación de la energía solar requiere una evaluación del recurso solar en el territorio en cuestión. Por evaluación del recurso solar se entiende la cuantificación de la energía solar disponible para ser utilizada en una aplicación. Como diferentes tipos de sistemas solares utilizan diferentes componentes de la radiación solar, dicha evaluación puede significar cosas un poco diferentes dependiendo de la aplicación. Del mismo modo el nivel de detalle que se requiere difiere de una aplicación a otra. [21]

En la tabla 5 se puede observar a grandes rasgos como varía la intensidad de la radiación en función de la altitud sobre el nivel del mar, y cómo influyen ciertas condiciones climatológicas. [22].

Tabla 5. Variación de la intensidad de radiación solar en función de la altitud sobre el nivel del mar.

VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN INCIDENTE CON LA ALTITUD					
ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR	0	900	1500	2250	3000
INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN (w/m²)	950	1050	1100	1150	1190

Para la comprensión y análisis de la radiación solar se definen los siguientes términos:

2.2.1 Constante solar.

La constante solar define el valor total promedio de la energía solar que llega al borde exterior de la atmósfera y es de 1367 W/m². El 30 % de esta energía es regresada al espacio porque es reflejada por las nubes y por el aire que se encuentra en la atmósfera. Del 70 % de la energía que sigue hacia la tierra, es decir, de los 1000 W/m² que no son reflejados; más o menos, las dos terceras partes calientan la atmósfera, la tierra y los océanos; casi toda la otra tercera parte se absorbe en la evaporación de agua; y solo una pequeña cantidad es absorbida por las plantas para la fotosíntesis. finalmente, después de que la energía solar es utilizada (transformada) en la tierra, la mayor parte de esta energía es devuelta a la atmósfera en forma de rayos infrarrojos (calor). [6].

2.2.2 Radiación directa.

Se define como radiación directa, a la radiación que no sufre ninguna atenuación en su trayecto, en general, esto ocurre en los días soleados; la radiación directa en un día soleado puede llegar a los 1000W/m². [6].

2.2.3 Radiación difusa

Se denomina radiación difusa a la radiación que debe atravesar nubes, partículas de agua, polvo, y smog, y que por lo tanto llegan bastante atenuadas a la superficie terrestre; se considera que en un día muy nublado la radiación recibida solo alcanza 100W/m², es decir el 10% de lo que correspondería a un día soleado. [Ref 6].

2.2.4 Radiación reflejada o albedo.

El albedo corresponde a una relación entre la energía incidente y la energía reflejada en cualquier superficie de la tierra. El albedo de la nieve es alto y puede llegar a 90%; en cambio el albedo del lodo tiene un valor bajo, 5%, esto significa que gran cantidad de la energía incidente es absorbida por el agua y la tierra que lo forman. Los valores más comunes que se encuentran para el albedo están entre el 10% y el 30%. [6].

La figura 7 ilustra los diferentes componentes de la radiación solar que llegan a la Tierra. Se destacan tres tipos principales: la radiación directa, que es la luz solar que llega de manera directa desde el sol sin desviaciones; la radiación difusa, que es la luz dispersada por las partículas en la atmósfera antes de alcanzar la superficie; y la radiación reflejada, que es la energía solar que rebota en superficies terrestres como el suelo, el agua o los edificios. El esquema ayuda a

entender cómo la radiación solar se distribuye y afecta la generación de energía en sistemas fotovoltaicos, influyendo en su rendimiento y eficiencia.

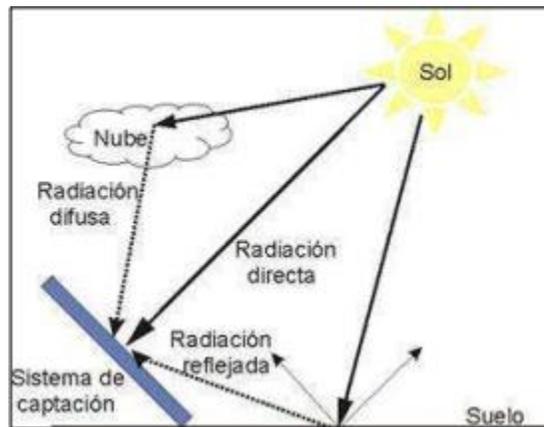


Figura 7. Componentes de la radiación solar terrestre.

2.2.5 Irradiancia solar.

Es la cantidad de radiación solar que incide en un área en un instante determinado, utilizando los vatios por unidad de área (W/m^2). La máxima irradiancia solar ocurre en la línea ecuatorial. la máxima Irradiancia solar ocurre en la zona ecuatorial, durante el verano, a las 12 del día. La irradiancia recibida en un lugar de la tierra depende de la época del año, de la hora y de las condiciones atmosféricas del sitio. [6].

La figura 8 muestra un gráfico comparativo que representa las curvas de irradianción solar medida a las 12:00 GMT en diferentes ubicaciones alrededor del mundo. Cada curva refleja la intensidad de la radiación solar en kilovatios por metro cuadrado (kW/m^2) para cada lugar, permitiendo observar las variaciones geográficas de la irradianción.

Las curvas más altas indican áreas con mayor exposición solar, mientras que las más bajas corresponden a regiones con menor radiación solar a esa hora específica. Este tipo de información es crucial para la planificación y diseño de

sistemas fotovoltaicos, ya que permite identificar las mejores ubicaciones para su instalación y maximizar la eficiencia de la captación solar.

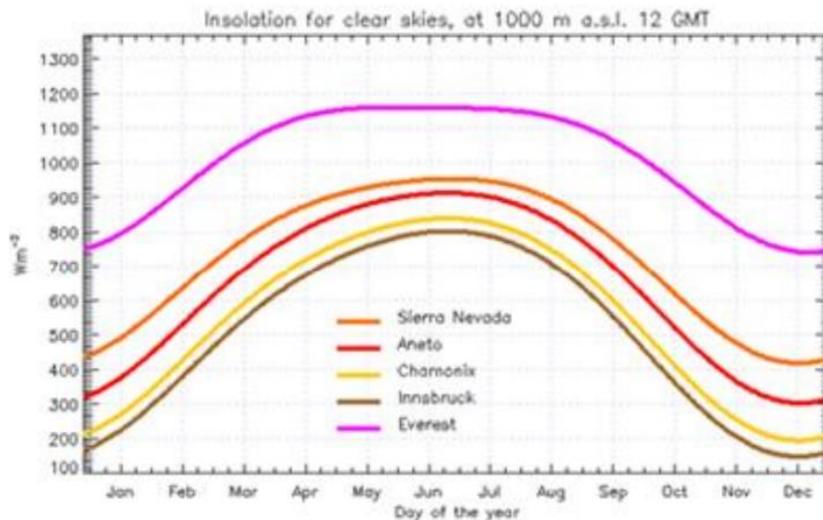


Figura 8. Curvas de irradiación solar a las 12 GMT en varios lugares del mundo.

2.2.6 irradiación solar.

Mide la energía solar recibida y corresponde a la cantidad de irradiancia solar que incide durante un tiempo determinado, en el caso de las aplicaciones fotovoltaicas, es conveniente utilizar la energía en vatios hora por unidad de área (Wh/m^2).

Ya que es una magnitud derivada de irradiancia; la máxima insolación solar ocurre en la zona ecuatorial, durante el verano, en las horas cercanas a las 12 del día. Al igual que la irradiancia, la insolación recibida en un lugar de la tierra depende de la época del año, de la hora y de las condiciones atmosféricas del sitio. [6].

A continuación, la figura 9 presenta un gráfico que distingue entre irradiancia e irradiación solares, también conocida como insolación. La irradiancia solar se refiere a la potencia de la radiación solar que incide sobre una superficie en un momento dado, expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2), mientras que la irradiación solar o insolación es la cantidad total de energía recibida en un periodo de tiempo, usualmente medida en kilovatios-hora por metro cuadrado (kWh/m^2).

La curva refleja cómo estos dos conceptos se relacionan a lo largo del día o el año, destacando la fluctuación de la irradiancia en momentos específicos y la acumulación de energía como irradiación. Esta diferenciación es clave para entender el comportamiento solar y su impacto en la generación de energía fotovoltaica.



Figura 9. Curva que muestra la diferencia entre irradiancia solar e irradiación solar (insolación).

2.2.7 Hora sol pico.

Conocidas como horas efectivas de Sol es el resultado de la irradiación en un intervalo de tiempo de un día, sirven para calcular cuánta energía va a generar un panel solar a lo largo de un día, y con este valor se puede interpolar para obtener las HSP en semanas, meses, años o para estimar cuánta energía puede generar un panel durante su vida útil.

La generación en un panel llega a su pico más alto al momento que incide sobre este una irradiancia de 1000 W/m², para una irradiancia diferente en una hora del día la potencia generada es directamente proporcional a la irradiancia instantánea;

por tal motivo un panel solar nunca genera una potencia estable en el tiempo por el contrario es el aporte de las potencias instantáneas.

La figura 10 muestra un gráfico que representa las horas solares pico (HSP), que son el número de horas durante las cuales la irradiancia solar alcanza un valor estándar de $1,000 \text{ W/m}^2$. El gráfico ilustra cómo varía la cantidad de HSP a lo largo del día y en diferentes ubicaciones geográficas o condiciones climáticas. Las HSP son una medida crucial para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, ya que permiten estimar la cantidad de energía solar utilizable por día, facilitando el cálculo de la producción energética de un sistema en función de su ubicación.

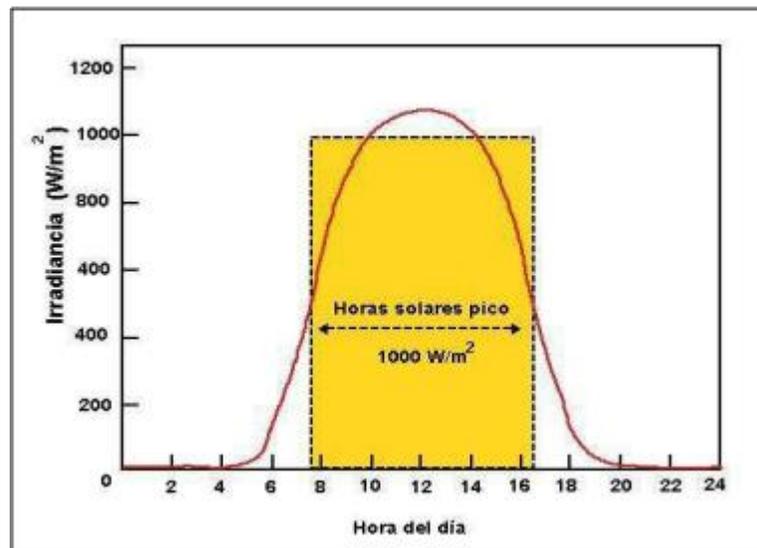


Figura 10. Horas solares pico.

El área bajo la curva en la figura siguiente muestra la variabilidad de la irradiancia durante un día, obteniendo bajos niveles de irradiancia durante las horas de la mañana y por el atardecer, por el contrario, al medio día este valor puede llegar a sobrepasar el límite considerado. [7]

Si se quiere evaluar la energía que el panel fotovoltaico puede producir diariamente, habrá que conocer cuantas horas diarias con radiación de 1000 w/m² estará expuesto en el día. La manera de encontrar las horas solar pico del mes de más baja radiación consta del cociente entre la radiación promedio diaria mensual más baja y 1kW/m², de la siguiente forma.

$$H_{spico} = \frac{r}{1kW/m^2}$$

Ec 1. Hora sol pico

Donde: Hspico: horas solar pico del mes de más baja radiación a lo largo del año en (h/d)

Γ : radiación promedio diaria mensual más baja del año. (kWh/m² /d)

Γ se calcula de la siguiente forma:

$$\Gamma = \min([\gamma\bar{]})$$

Ec 2. Radiación promedio diaria mensual más baja del año.

para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico se necesita la radiación promedio mensual de cada uno de los meses, esta se puede calcular con el producto punto entre la radiación mensual y el inverso punto a punto de vector de días en cada mes.

$$\gamma\bar{=} \vartheta\bar{*} [1. D\bar{]}$$

Ec 3. Radiación promedio diaria en cada mes del año (desde enero a diciembre).

En donde:

$\gamma\bar{}$: radiación promedio diaria en cada mes del año (desde enero a diciembre) (kWh/m² /d).

$\vartheta\bar{}$: radiación mensual en cada mes durante un año. (kWh/m²).

\bar{D} : días de cada mes (desde enero a diciembre). (d)

$[1/\bar{D}]$: representa el resultado de invertir cada componente del vector \bar{D} .

2.2.8 Medición de la irradiancia y de la insolación.

Podemos encontrar en el mercado una alta gama de instrumentos indispensables para la medición de la potencia y de la energía solar incidente, para aplicaciones prácticas y comunes se puede utilizar el piranómetro y/o el heliógrafo.

- Piranómetro: Sirven para medir la radiación global, directa y difusa, que se recibe en todas las direcciones. La radiación directa se elimina poniendo el aparato a la sombra, con ayuda de una pantalla, para que la superficie sensible del piranómetro capte sólo la radiación difusa. [7].



Figura 11. Piranómetro, medición de la radiación global, directa y difusa.

- Heliógrafos: Sirven para medir la duración de la luz solar, que se puede definir como el intervalo de tiempo durante el cual se ve el disco solar y determinan los períodos del día durante los cuales la intensidad de la

radiación directa es superior a un cierto umbral, que está reconocido a nivel mundial con un valor de 120 W/m^2 .

El intervalo de tiempo transcurrido entre la salida y la puesta de Sol define el máximo tiempo de radiación solar diaria posible, para un día concreto del año y para un lugar determinado. [7].



Figura 12. Heliógrafos empleados para medir la duración de la luz solar.

Otra distinción que se puede hacer es la medición de diferentes partes del espectro; es decir, la separación entre la radiación solar ultravioleta, la visible, la radiación fotosintéticamente activa, (que forma parte del visible) y la infrarroja.

Los efectos de la atmósfera son determinantes en la intensidad de la radiación solar, lo que da como resultado una gran variabilidad de este parámetro con el tiempo y con la ubicación geográfica.

La cantidad de energía disponible puede presentar diferencias importantes, no sólo de un día a otro o de un mes a otro, sino, de un año a otro, así mismo, puede haber variaciones importantes entre sitios relativamente cercanos debido a diferencias en el microclima.

Los datos de radiación solar pueden estar disponibles en formas de valores instantáneos, medidos con diferentes frecuencias (segundos, minutos, horas), pero también en acumulados o promedios sobre periodos de tiempo.

Durante la 16° edición de la conferencia de las partes de la convención marco de naciones unidas sobre el cambio climático celebrada en Cancún, Quintana Roo del 29 de noviembre al 10 de diciembre del 2010, el presidente de México de ese periodo, Felipe Calderón Hinojosa presentó el atlas de recursos renovables eólicos y solares de México, creados por el instituto de investigaciones eléctricas, en donde se demuestra a través de las mediciones realizadas que en el territorio nacional se presenta un rango de irradiación solar anual de entre 5.66 kWh/m^2 y 6.16 kWh/m^2 al día, lo que comprueba que el desarrollo de proyectos fotovoltaicos para el abastecimiento de energía en México como una de las opciones con mayor viabilidad a futuro, dadas las excelentes condiciones de irradiación solar. [8].

La figura 13 muestra un mapa de la República Mexicana que ilustra la irradiación solar global anual recibida en diferentes regiones del país

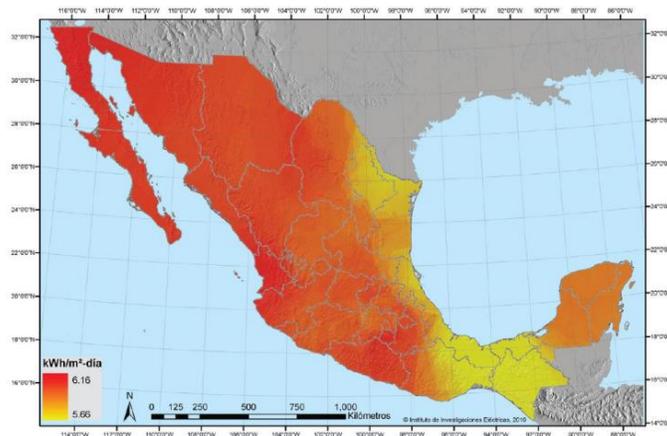


Figura 13. Atlas de irradiación global anual de los Estados Unidos Mexicanos.

Sin embargo, mayores niveles de irradiación no garantizan el desempeño óptimo de una instalación fotovoltaica, es necesaria la combinación de diversos factores climatológicos y geográficos que permitan que los módulos operen con eficiencia y con cierta regularidad, minimizando las fallas en la operación.

Un factor clave para el aprovechamiento de los paneles solares es la combinación de una alta irradiación solar con buenos niveles de velocidad y fuerza del viento, ya que estos últimos coadyuvan al enfriamiento de los paneles, manteniéndolos bajo temperaturas que incrementan su eficiencia al disminuir la saturación de los módulos, derivando en una mayor producción de energía eléctrica.

2.3 Efecto fotovoltaico

Se funda en el efecto fotoeléctrico. La radiación solar es captada por los paneles solares, y al establecer un circuito eléctrico externo entre las dos superficies, los electrones acumulados fluirán a través de él regresando a su posición inicial. En sus extremos se observará una diferencia de potencial eléctrico (voltaje). Por lo cual el efecto fotovoltaico es un fenómeno físico conocido por esta conversión de la energía de luz en energía eléctrica. [5] [22] [23].

Ya que la energía que contienen los fotones de la luz solar es capaz de liberar electrones de los átomos de silicio, se han fabricado muchos arreglos, con este elemento, para obtener y aplicar el efecto fotovoltaico, como es el caso de las celdas solares.

La mayoría de las celdas solares comerciales se fabrican con una placa de silicio dopada con átomos positivos en una de sus caras y con átomos negativos en la otra, generalmente, con boro y fósforo, de tal forma que se obtiene un elemento con dos semiconductores y una unión PN con un campo eléctrico. En el momento que la celda recibe luz solar se producen los efectos fotoeléctrico y fotovoltaico. [5].

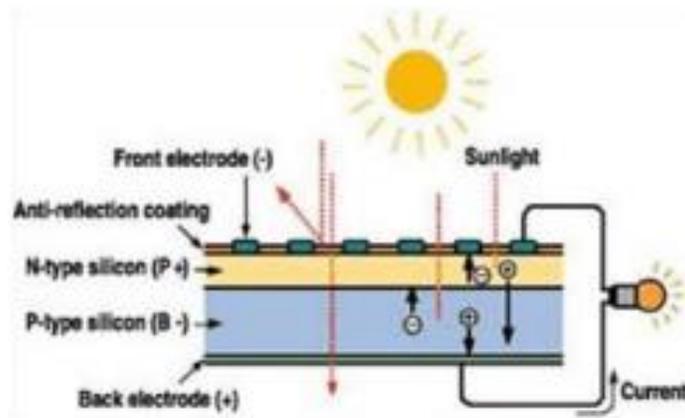


Figura 14. Diagrama del efecto fotovoltaico.

2.4 Celda fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas, también conocidas como celdas solares, son sensibles a la luz, están hechas de un material semiconductor, silicio en la mayoría de los casos, el cual se excita ante la presencia de radiación (aumento de temperatura) y los electrones pueden fluir del tipo P (positivo) al tipo N (negativo), esto ocasiona un voltaje interno, el cual ante la presencia de una resistencia se produce una corriente. [24].

2.4.1 Estructura y Funcionamiento:

El principio de una celda fotovoltaica es obligar a los electrones y a los huecos a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él: así, se producirá una diferencia de potencial y por lo tanto tensión entre las dos partes del material. se crea un campo eléctrico permanente, a través de una unión pn, entre dos capas dopadas respectivamente, p y n. [25].

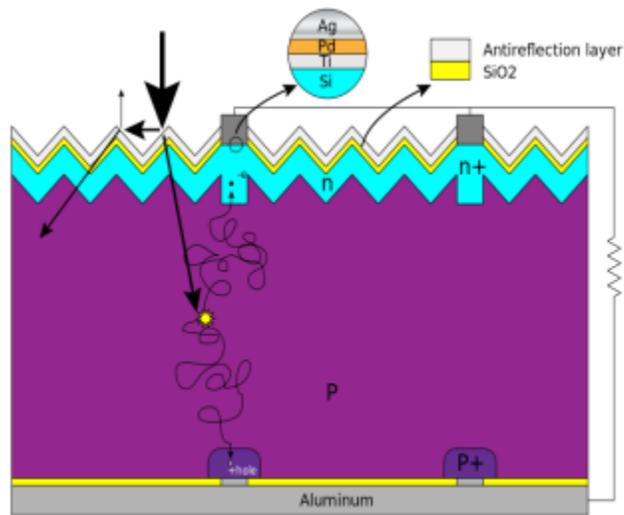


Figura 15. Estructura básica de una celda solar basada en silicio y su principio de funcionamiento

Físicamente, una celda fotovoltaica se asemeja a un diodo con una superficie amplia, generalmente de entre 0.25 y 0.35 mm de grosor y forma cuadrada, con un área aproximada de 100 cm². El proceso de fabricación varía según las características deseadas (rendimiento, flexibilidad, economía). La pureza del silicio impacta en el costo, pero un aumento en su pureza no siempre se traduce en un incremento significativo del rendimiento. [22].

2.4.2 Tipos de celdas Fotovoltaicas:

En la actualidad, existen diversos tipos de celdas fotovoltaicas con distintas tecnologías, cada una con propiedades únicas. La elección de la tecnología adecuada depende de varios factores:

- **Cristalinidad:** Indica el grado de orden en la estructura cristalina del silicio. Puede ser monocristalino, policristalino o amorfo.
 - **Monocristalino:** Presenta la estructura cristalina más ordenada, lo que resulta en mayor eficiencia y menor costo, pero su fabricación es más compleja.
 - **Policristalino:** Estructura cristalina menos ordenada, con menor eficiencia y costo que el monocristalino, pero su fabricación es más sencilla.
 - **Amorfino:** Carece de estructura cristalina ordenada, lo que resulta en menor eficiencia y costo, pero presenta mayor flexibilidad y facilidad de fabricación.

- **Coefficiente de absorción:** Mide la capacidad de la luz para penetrar en el material antes de ser absorbida. Depende del material de la celda y de la longitud de onda de la luz. Un mayor coeficiente de absorción implica una menor necesidad de grosor en la celda.

- **Costo y complejidad de fabricación:** Depende de diversos factores como el número de pasos involucrados, la necesidad de un ambiente especial, la cantidad y tipo de material, la necesidad de mover las celdas, entre otros. [23].

La figura 16 presenta un diagrama que clasifica las diversas tecnologías fotovoltaicas disponibles en el mercado. Este árbol ofrece una visión clara y estructurada de las opciones tecnológicas en el campo de la energía solar, facilitando la comprensión de las distintas alternativas y su evolución en el sector fotovoltaico.

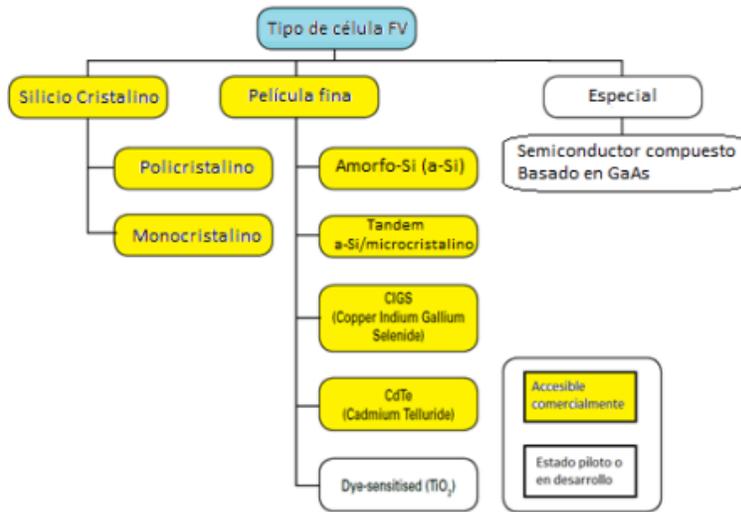


Figura 16. Árbol de tecnologías fotovoltaicas.

Las celdas fotovoltaicas de silicio pueden ser fabricadas con cristales monocristalinos, policristalinos o con silicio amorfo. La diferencia entre ellas reside en la disposición de los átomos de silicio en su estructura cristalina, lo que influye en su eficiencia.

La eficiencia de una celda fotovoltaica es el porcentaje de luz solar convertida en electricidad. Las celdas solares de silicio monocristalino y policristalino tienen eficiencias similares, superiores a las del silicio amorfo, aunque este último es más económico. [22].

2.4.2.1 Silicio monocristalino

Las celdas de silicio monocristalino representan el estándar en la tecnología fotovoltaica comercial. Para su fabricación, el silicio se purifica mediante la inserción de una varilla de "cristal germen" de silicio, que se funde a unos 1400°C y se cristaliza en lingotes o láminas delgadas. Luego, el silicio se corta en obleas finas que se pulen por ambos lados. Durante el proceso de corte y pulido, se

pierde casi la mitad del material. Una vez pulidas, las celdas se dopan a alta temperatura con materiales, típicamente boro para semiconductores tipo p y fósforo para tipo n. Este método de obtención del silicio se conoce como el método Czochralski.

En este método, generalmente se usa boro para dopar el semiconductor tipo p. Para formar la unión n-p, se difunden átomos de fósforo en una de las caras, creando una zona con deficiencia de átomos (tipo p) y otra con exceso de átomos (tipo n). Esta diferencia de carga eléctrica genera un campo eléctrico que impulsa a los electrones a salir de la celda por la superficie de la capa n, estableciendo una corriente eléctrica cuando interactúan con la energía solar en forma de fotones.

La celda resultante necesita contactos eléctricos para canalizar la energía producida bajo la luz solar. Estos contactos, en la cara expuesta al sol, se disponen de forma ramificada y se conectan a dos contactos principales.

Los contactos se fabrican frecuentemente mediante serigrafía por su bajo costo y facilidad de automatización. En la cara posterior, no expuesta al sol, el material puede cubrir toda la superficie o formar una malla metálica densa, recubierta con un tratamiento antirreflejo de bióxido de titanio o zirconio.

La mayoría de las celdas fotovoltaicas producen un voltaje de aproximadamente 0.5V, independientemente del área superficial de la celda. Sin embargo, una mayor superficie permite una mayor capacidad de corriente.

El proceso de fabricación de paneles monocristalinos es costoso y requiere mucha energía, pero produce cristales más eficientes, con rendimientos en laboratorio del 15 al 18%. Estos paneles se distinguen por su color azul homogéneo o negro y tienen una calidad tal que algunos fabricantes los garantizan por 25 años. [8].

2.4.2.2 Silicio policristalino

El silicio policristalino representa una alternativa más accesible en el mercado de la energía solar, ofreciendo una opción de menor costo frente al silicio monocristalino. A pesar de que las celdas de silicio policristalino presentan una eficiencia ligeramente menor, su proceso de fabricación permite una producción más económica y a gran escala. Este tipo de celdas son reconocibles por su color azul característico, resultado de la composición de múltiples cristales pequeños.

La eficiencia de estas celdas, que oscila entre el 12% y el 14%, junto con su precio competitivo, las convierte en una elección popular para proyectos de energía solar a nivel comercial. Además, la garantía de 20 años que ofrecen algunos fabricantes proporciona una seguridad adicional a los consumidores, asegurando una inversión a largo plazo en tecnologías sostenibles. Aunque la pérdida de material durante el proceso de corte es significativa, el balance entre costo y eficiencia sigue siendo favorable para el uso de silicio policristalino en la industria solar. [8].

2.4.2.3 Silicio amorfo

El silicio amorfo representa una alternativa interesante en el campo de la energía solar debido a su proceso de producción sencillo y económico. A pesar de las desventajas como la baja eficiencia inicial y la degradación temprana, su bajo costo y la capacidad de ser depositado en sustratos flexibles lo hacen atractivo para ciertas aplicaciones.

La investigación continua en la mejora de la calidad del material y en la optimización de los procesos de producción podría incrementar su eficiencia y vida útil, ampliando así su gama de aplicaciones prácticas. Además, su uso en dispositivos de bajo consumo energético demuestra su versatilidad y potencial para integrarse en la vida cotidiana de formas innovadoras y sostenibles. [8].

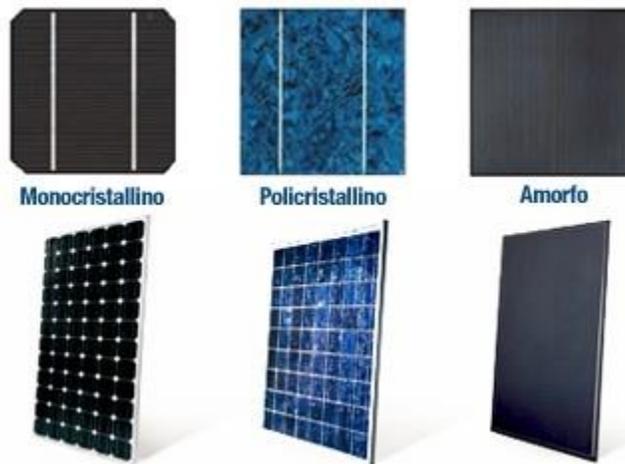


Figura 17. Tipos de paneles solares.

2.5 Panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico, también conocido como módulo solar, es la unidad básica que convierte la luz solar en electricidad. Está compuesto por varias celdas fotovoltaicas conectadas entre sí, ya sea en serie para aumentar la corriente o en paralelo para incrementar el voltaje. Su fabricación implica un proceso riguroso que involucra plantas certificadas con altos estándares de calidad, especialmente en la soldadura. Los materiales principales utilizados son metales (por su alta conductividad) y vidrios para garantizar la resistencia y durabilidad del panel.

Para garantizar la calidad y seguridad de los paneles fotovoltaicos, se deben cumplir con normas internacionales como la IEC 61215, la cual establece los requisitos mínimos para la fabricación de paneles solares de silicio cristalino destinados a aplicaciones terrestres. Esta norma define las pruebas necesarias para evaluar diversos aspectos cruciales del panel, incluyendo: [25].

- **Diagnóstico:** Se realizan pruebas para verificar la integridad estructural y la ausencia de defectos en el panel.
- **Requerimientos eléctricos:** Se evalúan parámetros como la potencia máxima, la corriente y el voltaje del panel bajo condiciones específicas.
- **Parámetros de rendimiento:** Se mide la eficiencia del panel en la conversión de la luz solar en electricidad.
- **Requerimientos térmicos:** Se verifica la capacidad del panel para soportar temperaturas extremas sin sufrir daños.
- **Requerimientos de irradiación:** Se evalúa la resistencia del panel a la exposición prolongada a la luz solar directa.
- **Requerimientos ambientales:** Se comprueba la capacidad del panel para resistir condiciones climáticas adversas como lluvia, nieve, granizo y viento.
- **Requerimientos mecánicos:** Se evalúa la resistencia del panel a cargas mecánicas como vibraciones y golpes.
- **Protecciones:** Se verifica la presencia de protecciones contra descargas eléctricas, cortocircuitos y otros riesgos.

Un panel solar está compuesto por las siguientes partes:

- Caja metálica para contener las celdas y elementos eléctricos.
- Placa con filas de celdas solares, soldadas y conectadas eléctricamente.
- Tapa transparente construida en material especial resistente a la intemperie.
- Marco metálico para instalación a la intemperie. [26].

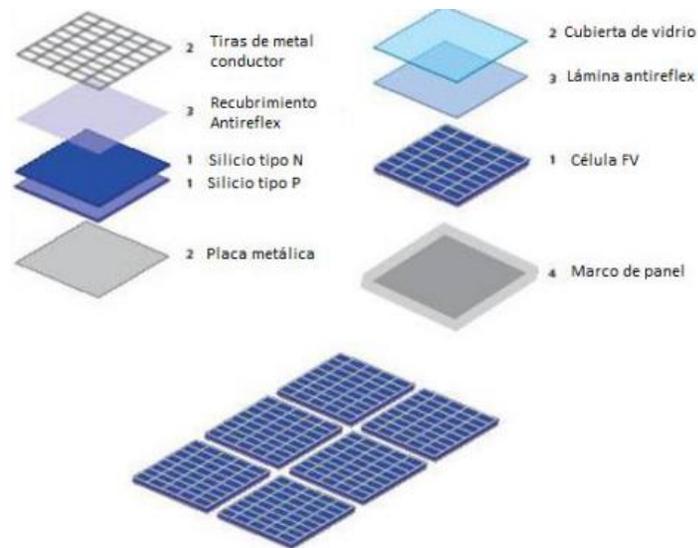


Figura 18. Componentes de un panel fotovoltaico

2.5.1 Parámetros eléctricos de un panel fotovoltaico

En la figura 19 se muestra las características eléctricas de un panel fotovoltaico.



Figura 19. Parámetros eléctrico de un panel fotovoltaico.

- Punto de máxima potencia (PMP): Es un punto de trabajo en el que la potencia entregada por el panel solar a la carga externa es máxima. La potencia P entregada por el panel es: [24].

$$P = I * V.$$

Ec 4. Potencia.

- Temperatura: El exceso de temperatura afecta negativamente a la potencia generada. Dicho efecto se suele traducir en pérdidas del 4% por cada 10°C de incremento respecto de la temperatura en condiciones estándar, 25°C. cabe resaltar que un módulo fotovoltaico puede alcanzar los 70°C en función de la irradiancia y la temperatura ambiente. [24].

En la figura 20 se muestra como varía la curva “voltaje-corriente” para distintos valores de irradiancia y para distintos valores de temperatura.

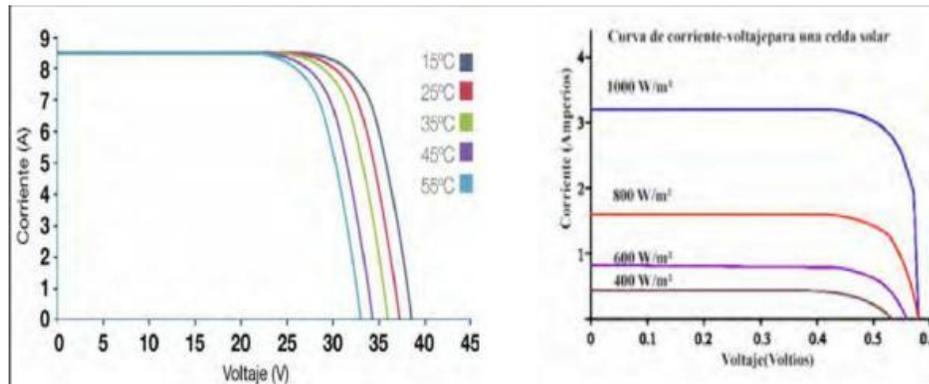


Figura 20. Curvas I-V para diferentes irradiancias a 25°C y para diferentes temperaturas a una irradiancia de 1000W/m2

Para el cálculo de corriente de cortocircuito para irradiación se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{cc'} = \frac{I_{cc}(STC) * H}{1000}$$

Ec 5. Intensidad de cortocircuito para irradiación.

donde:

$I_{cc'}$ = Intensidad de cortocircuito para irradiación.

I_{cc} = Intensidad de cortocircuito STC (condición de temperatura estándar).

H = Irradiancia en W/m^2 .

Una fórmula empírica usada frecuentemente es la siguiente:

$$T_{panel} = T_{amb} + 0.03 * G$$

Ec 6. Temperatura del panel

Siendo G la irradiancia.

T_{amb} : Temperatura ambiente en °C. [26].

Para tener en cuenta, a mayor temperatura:

1. Aumenta la intensidad de cortocircuito (I_{cc}).
 2. Disminuye la tensión a circuito abierto (V_o).
 3. Disminuye el factor de forma (FF).
 4. Decrece el rendimiento.
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): al dejar los terminales del panel en circuito abierto (intensidad cero), la tensión que proporciona la radiación será máxima.
 - Corriente de cortocircuito (I_{cc}): al cortocircuitar los terminales del panel (tensión cero), la radiación solar proporcionara una corriente máxima. Dado que la potencia eléctrica viene definida como $P = I * V$ podemos distinguir:
 - Potencia pico (P_p): potencia máxima (en vatios, W) que genera un módulo en condiciones normales de radiación. Es el producto de la tensión pico, por la corriente pico.

- Intensidad pico (I_p) y Tensión pico (V_p) son los valores de intensidad y tensión que hacen máxima la potencia en condiciones normales. [26].

- Eficiencia:

$$\eta = \frac{P_m}{P_i * A_a}$$

Ec 7. Eficiencia del módulo.

Donde:

η = Eficiencia del módulo

P_m = Potencia máxima

P_i = Potencia incidente 1000 W/m^2

A_a = Superficie del módulo en m^2

Si se acumula una cantidad excesiva de suciedad debido a una falta de mantenimiento o a una frecuencia de lluvias insuficiente, se puede dejar de producir entre un 4% y un 15% de la energía.

2.6 Factores de emplazamiento.

2.6.1 Inclinación

La inclinación óptima de los paneles solares es crucial para aprovechar al máximo la energía del sol. Al posicionarlos correctamente, se puede maximizar su capacidad de convertir la luz solar en electricidad.

Eficiencia y orientación de los paneles solares en México:

Los paneles solares funcionan mejor cuando la luz solar incide perpendicularmente sobre ellos. Por ello, la orientación ideal para los paneles en México es hacia el sur, con un ángulo azimutal de 180 grados.

2.6.1.1 *Inclinación óptima de los paneles:*

El ángulo de inclinación de los paneles solares en México depende de varios factores:

- **Latitud geográfica:** Entre mayor sea la latitud, mayor debe ser la inclinación.
- **Época del año:** En invierno, cuando la demanda de energía es mayor, se recomienda una inclinación más vertical (entre 10° y 15° por encima del ángulo de latitud) para maximizar la captación solar.
- **Objetivos de consumo:** Si se busca mayor eficiencia durante todo el año, se recomienda un ángulo medio calculado mediante fórmulas específicas.

2.6.1.2 *Fórmulas para calcular la inclinación:*

La fórmula general para el ángulo de inclinación de los módulos de una instalación fotovoltaica interconectada a la red es con la siguiente expresión:

$$\beta = 3.7 + 0.69 * \phi$$

Ec 8. *Ángulo de inclinación.*

Donde:

β = ángulo de inclinación

ϕ = Latitud

Existen tres métodos más específicos para calcular la inclinación óptima de los paneles en México, según la latitud:

1. **Inclinación estacional:** Sumar 15° a la latitud en invierno y restar 15° en verano.

2. **Inclinación por época:**

- **Invierno:** Latitud $\times 0.9 + 29^\circ$
- **Verano:** Latitud $\times 0.9 - 23.5^\circ$
- **Primavera/Otoño:** Latitud $- 2.5^\circ$

3. **Inclinación general:**

- Latitud $< 25^\circ$: Latitud $\times 0.87$
- $25^\circ \leq \text{Latitud} \leq 50^\circ$: (Latitud $\times 0.76$) + 3.1° . [27].

La tabla 6 proporciona los valores recomendados para la inclinación óptima de los paneles solares en diferentes latitudes. Incluye columnas que detallan la latitud de la ubicación, el ángulo de inclinación sugerido para maximizar la captación de energía solar durante todo el año, así como ajustes para estaciones específicas como verano o invierno.

Estos ángulos son fundamentales para mejorar la eficiencia del sistema fotovoltaico, asegurando que los paneles reciban la mayor cantidad de irradiación solar posible según la ubicación geográfica y las condiciones climáticas.

Tabla 6. Estándar para ángulos de inclinación de paneles solares.

Latitud de la ubicación de tu casa (grados)	Ángulo de inclinación fijo
0° a 15°	15°
15° a 25°	La misma latitud
25° a 30°	Latitud + 5°
30° a 35°	Latitud + 10°
35° a 40°	Latitud + 15°
40° o más	Latitud + 20°

2.6.2 Orientación

Aprovechando al máximo la energía solar: Una guía sobre la orientación de los paneles solares

Los paneles solares, conversores de la luz solar en energía eléctrica, funcionan de manera más eficiente cuando se orientan correctamente. A continuación, se detallan los diferentes tipos de orientación de paneles solares, sus ventajas y las consideraciones para tener en cuenta para cada caso:

1. Orientación Sur:

- **Ventajas:**
 - Mayor captación de radiación solar durante todo el día, gracias a la incidencia perpendicular del sol sobre los paneles.
 - Máximo ahorro en la factura eléctrica.

2. Orientación Oeste:

- **Segunda opción más popular:** Adecuada para viviendas sin baterías.
- **Ventajas:**
 - Mayor producción de energía solar durante la tarde, coincidiendo con el pico de consumo energético.

3. Orientación Este-Oeste:

- **Distribución estratégica:** Mitad de los paneles hacia el este y la otra mitad hacia el oeste.
- **Ventajas:**
 - Máxima radiación solar durante las mañanas y tardes.
 - Mayor densidad de producción energética.
 - Potencia de salida más consistente.
 - Diseño aerodinámico que reduce la presión del viento.
 - Menor contrapeso para sujetar los paneles, lo que reduce la carga sobre la cubierta.

4. Orientación Norte:

- **Menos recomendable:** Considerar alternativas solo si el techo está orientado hacia el norte.
- **Opciones:**
 - Instalación en una pared orientada al sur libre de sombras.
 - Mayor cantidad de paneles en un techo orientado al norte para compensar la menor radiación solar. [Ref 14].

2.6.3 Sombras

Impacto de las Sombras en la Eficiencia de Paneles Fotovoltaicos: Un Análisis Técnico

La viabilidad y rentabilidad de una instalación fotovoltaica dependen en gran medida de su capacidad para generar energía eléctrica de manera eficiente. En este contexto, la presencia de sombras se erige como un factor crítico que debe ser cuidadosamente considerado durante el diseño, la implementación y el mantenimiento de un sistema fotovoltaico. [27].

2.6.3.1 Efecto de las Sombras en la Generación de Energía

Las sombras, ya sean causadas por elementos naturales como árboles o estructuras artificiales como edificios y chimeneas, pueden reducir significativamente la producción de energía eléctrica de un sistema fotovoltaico. Este efecto se debe a la naturaleza del funcionamiento de las celdas fotovoltaicas, las unidades básicas que componen los paneles solares. Cuando una sombra oscurece total o parcialmente una celda fotovoltaica, se interrumpe el proceso de conversión de luz solar en electricidad, lo que lleva a una disminución en la potencia de salida del panel. [27].

2.6.3.2 Magnitud del Impacto

La magnitud del impacto de las sombras en la generación de energía depende de diversos factores:

- **Tamaño y forma de la sombra:** Una sombra grande proyectará una mayor área de oscurecimiento y, por lo tanto, tendrá un impacto más significativo que una sombra pequeña.
- **Ubicación de la sombra:** Una sombra que cae sobre el centro de un panel fotovoltaico tendrá un efecto más severo que una sombra que incide en un borde.
- **Intensidad de la luz solar:** El impacto de las sombras será menos pronunciado en días con poca luz solar, ya que la generación de energía general es menor.

2.6.3.3 Estrategias de Mitigación

Para minimizar el impacto de las sombras en un sistema fotovoltaico, se pueden implementar diversas estrategias:

- **Selección cuidadosa del sitio:** La ubicación de la instalación fotovoltaica debe ser seleccionada meticulosamente, priorizando áreas que reciban luz solar directa durante la mayor parte del día y que estén libres de sombras permanentes o estacionales.
- **Análisis del movimiento solar:** Es fundamental comprender el patrón de movimiento del sol a lo largo del día y del año para identificar potenciales zonas de sombra y optimizar la orientación e inclinación de los paneles.
- **Diseño optimizado de la instalación:** La disposición y el espaciamiento de los paneles fotovoltaicos deben planificarse cuidadosamente para minimizar el solape de sombras y maximizar la captación de luz solar.
- **Tecnologías avanzadas:** Existen tecnologías como los optimizadores de potencia que pueden ayudar a mitigar el impacto de las sombras en la

producción de energía al redirigir la corriente eléctrica de las celdas sombreadas a las celdas iluminadas. [27].

2.9 Inversores

Los inversores fotovoltaicos son dispositivos electrónicos que convierten la energía eléctrica de corriente continua (CC) generada por paneles solares o baterías en corriente alterna (CA) con la magnitud y frecuencia especificadas por el usuario o el diseñador. Su selección adecuada es fundamental en el diseño de sistemas fotovoltaicos, asegurando una operación eficiente y segura.

Para poder optimizar al máximo la instalación, los inversores de conexión a red incorporan una función por la que hacen trabajar al generador fotovoltaico en su punto de máxima potencia (PMP), el cual varía dependiendo básicamente de la irradiancia recibida y de la temperatura ambiente. Para ello, el inversor modifica constantemente la tensión y la corriente del generador de forma que el producto de ambos valores sea el máximo.

La elección del inversor fotovoltaico adecuado es fundamental en el diseño de sistemas fotovoltaicos, asegurando una operación eficiente, segura y compatible con los componentes del sistema. Los inversores fotovoltaicos encuentran aplicación en diversos sectores, desde pequeñas fuentes de alimentación para equipos electrónicos hasta sistemas industriales de alta potencia.

Cuando existen condiciones ambientales para generar energía por parte del arreglo fotovoltaico, el inversor debe transformar y utilizar esta energía para satisfacer el consumo, sin embargo, si la generación de energía es mayor a la del consumo, el inversor suministrará la energía necesaria a las cargas y el exceso lo empujará a la red pública, de esta forma se reduce el consumo de energía por parte de la red pública produciendo un ahorro en función de la energía que es

capaz de suministrar el sistema. Durante la noche o las horas del día donde la radiación sea mínima, toda la energía provendrá de la red pública. [23].



Figura 21. Inversores.

2.9.1 Característica técnicas.

- Fases: si la potencia del inversor es inferior a 6 kW, suele ser monofásico, mientras que para potencias superiores lo normal es que sea trifásico.
- Potencia nominal: determina la potencia que puede entregarse a la red eléctrica, y debe encontrarse entre el 80% y el 90% de la potencia pico del generador fotovoltaico (P_{Gp}):

$$0.8 \cdot P_{Gp} < P_{inv} < 0.9 \cdot P_{Gp}$$

- Rango de tensión de entrada para el seguimiento del PMP: el inversor debe admitir un cierto margen de tensiones de entrada para realizar correctamente el seguimiento del punto de máxima potencia.
- Tensión nominal de entrada: nivel de tensión que puede soportar el inversor en su entrada en condiciones normales de operación. Esta tensión debe ser:

$$U_{inv\ ent} > U_{Goc\ (-10^{\circ}C)}$$

- Tensión nominal de salida: nivel de tensión que proporciona el inversor, que suele ser de 220 V (monofásica) o 400 V (trifásica).

- Intensidad máxima a la entrada: debe ser superior a la intensidad máxima prevista que pueda llegarle del generador fotovoltaico. Recordamos que la corriente máxima del generador es:

$$I_{GSC} = N_p \cdot I_{SC}$$

Ec 9. Intensidad máxima a la entrada.

- Rendimiento: el rendimiento de los inversores de conexión a red actuales suele encontrarse entre el 90% y el 98%, y es el óptimo si estos equipos trabajan en torno a su potencia nominal.
- Potencia máxima o capacidad de sobrecarga: es la potencia que el inversor puede proporcionar durante un tiempo determinado.
- Potencia de arranque: es el umbral de potencia a partir del cual se produce la puesta en marcha del inversor.
- Potencia en espera o stand-by: potencia que consume el inversor cuando está encendido, pero sin entregar energía a la red.
- Tasa de distorsión armónica THD (%): indica el contenido de armónicos de la onda de tensión de salida.
- Frecuencia: debe ser la misma que la de la red donde se conecta.
- Factor de potencia: mide la relación entre la potencia activa y la potencia aparente. En la mayoría de los inversores el factor de potencia es igual a la unidad, aunque, en cualquier caso, este valor es superior a 0.95. [23].

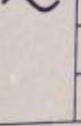
	$V_{DC \text{ max}}$	600 V
	$V_{DC \text{ MPP}}$	246 - 600 V
	$I_{DC \text{ max}}$	26 A
	$V_{AC \text{ nom}}$	230 V
	$f_{AC \text{ nom}}$	50/60 Hz
	$P_{AC \text{ nom}}$	5330 W
	$I_{AC \text{ nom}}$	23.1 A
	$\cos \varphi$	1

Figura 22. Placa de características técnicas de un inversor.

2.9.2 Protecciones del inversor.

Los inversores incorporan protecciones eléctricas, tanto en la parte de corriente continua como en la parte de corriente alterna.

- Protección de la polaridad.
- Protección contra sobretensiones, mediante varistores o dispositivos similares.
- Desconexión por tensión de red fuera de rango: el inversor se desconecta de la red si detecta que esta se encuentra fuera de los márgenes admitidos.
- Desconexión por baja tensión del generador: el inversor queda desconectado hasta que no se alcance un valor umbral de tensión en el lado del generador.
- Protección contra sobreintensidades (sobrecargas y cortocircuitos): la protección contra sobrecargas puede hacerse limitando la potencia que entra al inversor desviando el punto de operación a otro en el que el generador proporcione menos potencia, o bien, desconectando directamente la entrada del inversor. [23].

2.9.3 Configuraciones para conexión a red.

Se presentarán las diferentes configuraciones para una instalación fotovoltaica.

Microinversores o inversores integrados.

Se trata de pequeños inversores cuya potencia no supera los 600 w, que se instalan junto a cada módulo de forma que todos ellos quedan conectados en paralelo. Este método permite ahorrar en cableado de corriente continua., proporciona modularidad a la instalación y permite que la avería de uno de los módulos no afecte a la producción del resto. Sin embargo, esta configuración implica un alto coste, por lo que está limitada a instalaciones de baja tensión de pequeña escala. [Ref 2 edición].

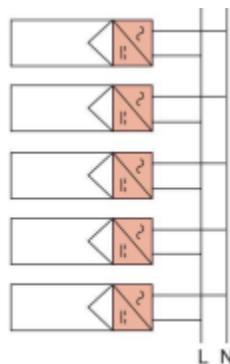


Figura 23. Microinversores o inversores integrados.

Inversor monofásico para conexión a red monofásica.

Cuando la instalación fotovoltaica conectada a red es de potencia inferior a 5 kW, se suele utilizar un único inversor monofásico conectado a la red de baja tensión (220 V). [20].

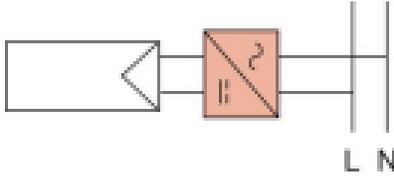


Figura 24. Inversor monofásico para conexión a red monofásica.

Inversores monofásicos para conexión a red trifásica.

Si la instalación tiene una potencia superior a 5 kW y hasta 100 kW, la conexión a la red suele ser trifásica en baja tensión. Una configuración habitual es conectar un inversor monofásico a cada una de las tres fases, quedando la potencia de la instalación repartida de forma equilibrada entre todos los inversores, cada uno de los cuales tiene una salida monofásica de 220 V.

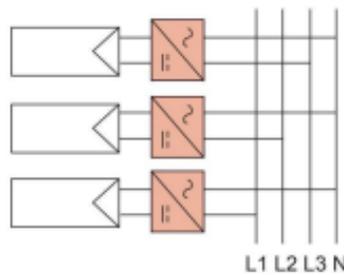


Figura 25. Inversores monofásicos para conexión a red trifásica.

Inversor central trifásico.

Todas las cadenas del generador quedan conectadas en paralelo. Sin embargo, esta configuración se ve más afectada por las sombras, pudiendo limitar la producción óptima de cada cadena. Se utiliza en algunas instalaciones cuya

potencia nominal se encuentra entre 15 y 100 kW, conectándose a una red trifásica de baja tensión (400 V).

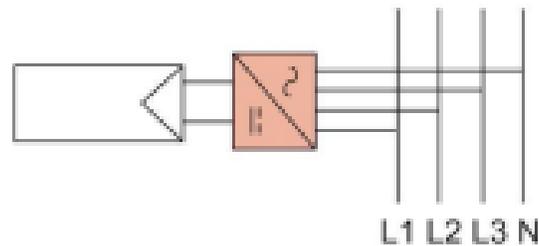


Figura 26. Inversor central trifásico.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica (SFVIR) es un proceso crucial para garantizar un funcionamiento eficiente y una producción de energía adecuada.

3.1 Cálculos

Consumo diario promedio:

La cantidad de energía eléctrica a generar depende de las necesidades puntuales de cada instalación. Si se desea autogenerar todo el consumo de energía de su instalación o vivienda, con la factura de energía se obtiene el consumo promedio bimestral. Dividir el consumo bimestral entre los 60 días promedio de un bimestre, nos permite obtener el consumo promedio diario de energía.

$$C_{diario} = \frac{C_{bim}}{60 \text{ días}}$$

Ec 10. Consumo diario.

Donde:

C_{diario} = Consumo diario estimado (kWh).

C_{bim} = Consumo promedio bimestral (kWh).

Para obtener la HSP se tendrá que dividir la energía solar disponible en un lugar durante un día entre la energía que puede producirse en una hora.

$$HSP = \frac{DNI}{1000}$$

Ec 11. Hora sol pico.

Donde:

HSP = Hora sol pico

DNI = Irradiación normal directa de un lugar en específico.

1000 = Es la energía que puede producirse en una hora.

Una vez que se obtiene el consumo diario por día y las horas solar, se hace una estimación considerando las pérdidas. La estimación se realiza ya que ningún sistema se exceptúa de tener perdidas en sus componentes y dichas pérdidas aumentan conforme a la temperatura, para ello estimamos un 30% de pérdidas, tal como se refleja en la siguiente tabla.

Tabla 7. Total de pérdidas.

Pérdidas x cableado eléctrico	3%
Pérdidas x conversión de energía	5%
Pérdidas x polvo y sombra	15%
Pérdidas x sombra	6%
Total de pérdidas	29% ≈ 30%

La cantidad de potencia instalada en paneles que se necesita depende de la zona geográfica:

$$P_{req} = \frac{C_{diario}}{HSP}$$

Ec 12. Potencia de paneles requerida.

Donde:

P_{req} = Potencia de paneles requerida (kW).

C_{diario} = Consumo diario estimado (kWh)

HSP = Horas sol pico del lugar en específico (h).

La cantidad de paneles necesarios se puede calcular al dividir la potencia requerida sobre la potencia del panel a utilizar. Para este caso, se utilizarán paneles solares con una potencia de 550 W.

$$N_p = \frac{P_{req}}{P_{panel}}$$

Ec 13. Número de paneles necesarios para el sistema fotovoltaico.

Donde:

N_p = Número de paneles necesarios para el sistema fotovoltaico.

P_{req} = Potencia requerida para el sistema fotovoltaico. (W).

P_{panel} = Potencia del panel seleccionado. (W).

Para una inclinación óptima se debe ejecutar la siguiente ecuación:

$$\beta = 3.7 + 0.69 * \phi$$

Ec 14. Ángulo de inclinación

Donde:

β = ángulo de inclinación

ϕ = Latitud del lugar en específico, en este caso, Tuxtla Gutiérrez tiene una latitud estimada de 16°.

Para determinar el número de inversores necesarios, se realizó un cálculo sencillo:

$$N_I = \frac{P_{req}}{P_{inv}}$$

Ec 15. Número de inversores.

Donde:

N_I = Número de inversores.

P_{req} = Potencia requerida para el sistema fotovoltaico. (W).

P_{inv} = Potencia del inversor (W).

3.2 Arreglos fotovoltaicos.

La tensión lograda depende del arreglo o conjunto de paneles la cual aumenta al conectar los paneles en serie debido a la suma de las tensiones (V_{MP}) de cada panel. Es por lo anterior, que se debe comprobar cuantos paneles son necesarios para que el inversor trabaje en su rango de tensión (V_{MPP}).

La cantidad de paneles solares que puedes conectar en serie a un inversor central depende de varios factores:

- Potencia de cada panel: La potencia individual de cada panel solar determinará cuántos puedes conectar en serie.
- Voltaje máximo de entrada del inversor: Cada inversor tiene un límite de voltaje de entrada que no debe sobrepasarse.
- Voltaje de cada panel: El voltaje de los paneles conectados en serie se suma. Es crucial no exceder el voltaje máximo del inversor.
- Características eléctricas de los paneles: La corriente máxima y la tensión en circuito abierto de los paneles también influyen en la cantidad de paneles que puedes conectar.
- Recomendaciones del fabricante del inversor: Siempre consulta la hoja de datos del inversor para conocer las especificaciones exactas y las recomendaciones del fabricante.

Por qué es importante no exceder el voltaje máximo:

- Daño al inversor: Un voltaje excesivo puede dañar el inversor de forma irreversible.
- Riesgo de incendio: El sobrevoltaje puede generar calor excesivo y provocar incendios.

Como calcular el número de paneles conectados en serie:

- Consulta la hoja de datos del inversor: Busca el voltaje máximo de entrada DC.
- Consulta la hoja de datos de los paneles: Observa el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) de cada panel.
- Divide el voltaje máximo del inversor entre el V_{oc} de un panel: Esto te dará una estimación del número máximo de paneles que puedes conectar en serie.

$$P_S = \frac{V_{MPPP}}{V_{MP}}$$

Ec 16. Número de paneles conectados en serie.

Donde:

P_S = Número de paneles conectados en serie.

V_{MPPP} = Tensión en máximo punto de potencia del inversor (V).

V_{MP} = Tensión en máxima potencia del panel (V).

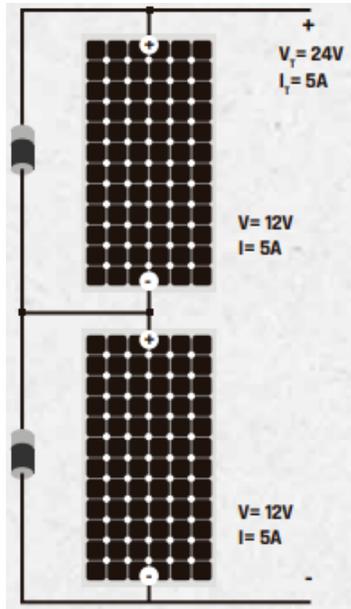


Figura 27. Paneles conectados en serie.

Para casos específicos en donde se desea aumentar la corriente y no el voltaje, se utiliza un arreglo fotovoltaico conectando en paralelo, para ello, se debe calcular la cantidad de cadenas o paneles en paralelo mediante la división de la cantidad total de paneles y la cantidad en serie:

$$P_P = \frac{P_{total}}{P_S}$$

Ec 17. Número de paneles conectados en paralelo.

Donde:

P_P = Numero de paneles conectados en paralelo.

P_{total} = Número total de paneles.

P_S = Número de paneles en serie.

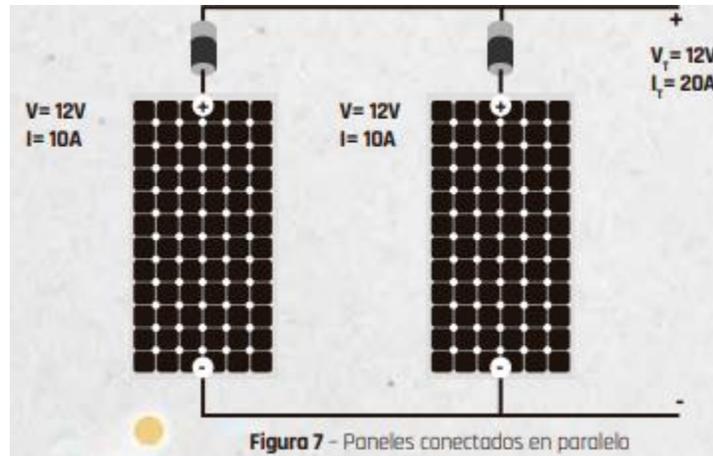


Figura 28. Paneles conectados en paralelo.

3.3 Estructuras.

es un elemento esencial en las instalaciones fotovoltaicas, ya que cumplen con diversas funciones, por ejemplo, mantener el ángulo de inclinación de los módulos y estar fijos hacia el suelo para mantener seguros los paneles. Y es que también es necesario conocer los diversos tipos de estructuras fotovoltaicas, porque según donde realizar tu instalación será el tipo que se selecciona, con el fin de evitar fallas o pérdidas. [28].

3.3.1 Factores por conocer antes de elegir una estructura solar

Antes de conocer los tipos de estructuras para paneles solares, se deben tener en cuentas aspectos y factores para saber cuál utilizar en una instalación.



Figura 29. Puntos por considerar antes de elegir una estructura fotovoltaica.

1. Dónde se hará la instalación: Es necesario tener en cuenta donde se encontrará la instalación, es decir, sobre alguna superficie como techo o en suelo.
2. Orientación de paneles solares: Igualmente es necesario conocer cuál será la orientación que tendrá el panel, recordando que debe ser aquella que tenga una buena incidencia solar.
3. Tipo de superficie: También se debe conocer si la superficie es techo, teja, o suelo, además que, si es en loza saber, si se podrá realizar perforaciones o utilizar otra opción.
4. Consideraciones meteorológicas: Las condiciones climatológicas por las que atravesará la instalación fotovoltaica, son un factor determinante, debido a que, a partir de esto, se sabrá si se requieren estructuras con mayor fuerza.
5. Estética: La estética no influye de manera directa la decisión de la estructura fotovoltaica, sin embargo, sí es un aspecto que sin duda muchos de los clientes toman en cuenta. [28].

Estructura sobre techo

- Montaje sobre estructura en plano paralelo: La estructura de paneles solares en plano paralelo permite que los módulos queden alrededor de 10 cm por encima del techo, lo cual permite el flujo de aire. Estos se sitúan en rieles con canales, que son fijados con prensas centrales.



Figura 30. Estructuras sobre techo.

3.4 Elección de inversores

Existen algunos criterios para determinar los mejores inversores de cadenas solares disponibles en el mercado:

- Calidad y confiabilidad
- Servicio de ayuda
- Monitoreo
- Garantía

- Características
- Precio

Un inversor de conexión a red debe tener características de regulación de tensión y corriente de los paneles, sincronización de la señal, filtración de armónicos y desconexión de ser necesario. La potencia del inversor se selecciona de acuerdo con la potencia generada.

Para el caso en específico, se utilizó un inversor de la marca GROWATT.

3.5 Elección de paneles fotovoltaicos

el nivel de calidad en un sistema fotovoltaico no solo depende de la tecnología con que esté fabricado el panel propiamente dicho, sino también de la fiabilidad de la compañía que los produce.

Los mejores paneles solares y, por ende, los más recomendables para comprar, son los que poseen la certificación Tier-1. Esta validación responde a un ranking internacional que evalúa diversos factores como:

- La solidez económica de la compañía para atraer inversiones a largo plazo
- La calidad en la producción
- El tipo de procesos de fabricación

Esta certificación contempla otros factores además de los mencionados, que te permitirán obtener los mejores beneficios de los paneles solares.

Trina Solar

Trina Solar no solo ha destacado en la fabricación de paneles fotovoltaicos e inversores de alta calidad, sino también por el desarrollo de rastreadores eficientes que permiten seguir al sol para optimizar la producción de energía del sistema.

Ha obtenido diversos reconocimientos, desde certificaciones de calidad (incluido el Tier-1) hasta récords mundiales, gracias al desarrollo de sus celdas solares de silicón. Trina Solar se ha convertido en un símbolo de calidad en energías limpias.

JA Solar

Esta empresa se caracteriza por poseer la patente de la tecnología PERC, lo que la convierte en una de las principales distribuidoras de módulos solares en todo el mercado.

Ja solar figura entre las primeras 500 empresas del mundo en el desarrollo de energía sustentable, lo cual es reflejo del alto nivel de fiabilidad que tiene esta compañía para la producción y venta de sus sistemas fotovoltaicos.

QCells

Estos módulos tienen una duración superior a cualquier otro en el mercado, además de ser sumamente ligeros y flexibles. Entre todos los fabricantes de módulos solares, QCells ha ganado el reconocimiento de diversas organizaciones alemanas para la calidad de consumidor, otorgado a las empresas más confiables y recomendables en el desarrollo de tecnología solar.

First Solar

Sus paneles solares se caracterizan por tener uno de los más altos coeficientes de temperatura y resistencia a la humedad en el mercado, lo que les permite mantener una gran capacidad de producción en las condiciones más adversas.

El Instituto independiente VDE y el Fraunhofer ISE han certificado la tecnología de First Solar como productos de calidad comprobada y de bajo riesgo a lo largo de su vida útil, lo que respalda a esta marca como una de las más confiables de todo el mercado.

Jinko

Se caracteriza por un gran desarrollo tecnológico que le ha permitido fabricar paneles solares de alta eficiencia y bajo costo. Esto le ha permitido aplicar un modelo de negocios exitoso con ventas de alto volumen a lo largo de 6 continentes.

Esta marca es un ejemplo de liderazgo en cuanto al uso de la tecnología solar para el bienestar social, lo cual ha promovido que se integre a los esfuerzos de The Climate Group para conseguir cambios tangibles en la reducción global de la huella de carbono. [29].

Para este caso en específico se utilizaron paneles solares de la marca JA solar, modelo JAM72S30-550/MR, con una potencia de 550 W.

3.6 Dispositivos de protección

Los dispositivos de protección proporcionan seguridad tanto a las personas como a los equipos de la instalación, minimizando las consecuencias de posibles contactos directos o indirectos, cortocircuitos, sobreintensidades y sobretensiones. Los principales elementos de protección son los siguientes.

3.6.1 Interruptores termomagnéticos

Los interruptores termomagnéticos son dispositivos de seguridad cuyo objetivo es el de proteger los cables y equipos conectados dentro de un circuito eléctrico ante los eventuales saltos o variaciones bruscas en la tensión eléctrica. Así, se encargan de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando ésta sobrepasa ciertos valores máximos. Cuentan con un mecanismo de protección magnética (contra cortocircuitos) y térmica (contra sobrecargas).

A la hora de elegir el interruptor termomagnético adecuado para nuestra instalación, debemos considerar la potencia (W) que debe admitir el mismo, para evitar que se sobrecaliente y corte la corriente por efecto de su protección térmica. Teniendo en cuenta el consumo estimado que tendrá ese circuito, podremos calcular el amperaje (A) que deberá tener como mínimo la térmica que vayamos a instalar. El cálculo para hacerlo es sencillo, y para ello necesitaremos aplicar la siguiente fórmula:

$$P = U * I$$

Ec 18. Potencia.

donde:

- *P: Potencia (Watt)*
- *U: Tensión (Volt)*
- *I: Corriente (Ampere)*

Como criterio para seleccionar el interruptor termomagnético se debe tener en cuenta que la Intensidad Nominal (A) de corriente del interruptor debe ser menor o igual a la Intensidad Máxima de corriente que admite el conductor. [Ref 2 edición].



Figura 31. Interruptor termomagnético.

3.6.2 Interruptor diferencial.

Se colocan en las instalaciones de corriente alterna para garantizar la seguridad de las personas contra los contactos directos (debido al contacto con partes activas) e indirectos (debido a una derivación por un fallo del aislamiento de partes en tensión), y también para proteger a la propia instalación contra los incendios que podrían provocar estas derivaciones.



Figura 32. Interruptor diferencial.

3.6.3 Fusibles.

Cada equipo de la instalación suele incluir internamente sus propios fusibles, con el objetivo de protegerlo frente a sobrecargas. También se colocan fusibles externos para la protección de los circuitos de corriente continua contra sobrecargas y cortocircuitos.



Figura 33. Fusibles.

3.6.4 Diodos de bloqueo.

Se instalan en la salida de cada cadena de módulos para que no se disipe la potencia generada en caso de defecto, evitando que la corriente circule en sentido contrario al que se pretende.

3.6.5 Diodos de paso.

Se colocan en la caja de conexiones de cada módulo y minimizan los problemas ocasionados por sombreados parciales, ya que impiden que las celdas en sombra actúen como receptores.

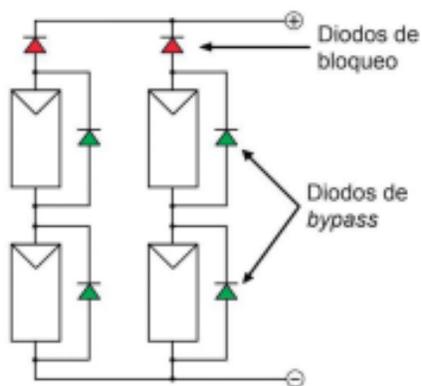


Figura 34. Diodos de bloqueo y diodos de bypass.

3.6.6 Puesta a tierra.

La puesta a tierra de una instalación de seguridad dota a las personas y a los equipos derivando a tierra la corriente de defecto que se pueda generar debido a fallos de aislamiento, averías, etc.



Figura 35. Puesta a tierra.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Es fundamental realizar un análisis exhaustivo de su desempeño para evaluar su eficiencia y rentabilidad. Este análisis permite identificar posibles áreas de mejora y optimizar el funcionamiento del sistema a largo plazo.

Se compara la energía generada por el sistema con la estimada en el diseño. Se analiza el consumo de energía del establecimiento para determinar qué porcentaje de la demanda es cubierta por la energía solar.

Herramientas de Análisis

- **Monitoreo continuo:** Se utilizan sistemas de monitoreo para registrar la producción de energía, el consumo y otros parámetros relevantes.
- **Software de análisis:** Existen diversos software especializados que permiten analizar los datos recopilados y generar informes detallados.
- **Comparativa con datos históricos:** Se comparan los datos obtenidos con los datos históricos de consumo y producción para evaluar la evolución del sistema.

Resultados Esperados

Validación del diseño: Se verifica si el diseño del sistema cumple con las expectativas iniciales en términos de producción de energía y autoconsumo.

Estimación del retorno de la inversión: Se estima el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial y el ahorro económico a largo plazo.

4.1 Diseño y Planificación de Sistemas Fotovoltaicos.

El diseño específico de un sistema fotovoltaico es un proceso crucial que involucra una serie de cálculos y consideraciones para garantizar que el sistema cumpla con los requisitos energéticos de una determinada aplicación y sea económicamente viable.

Análisis de la Demanda Energética:

- Recopilación de datos: Se recolectan los datos de consumo eléctrico del establecimiento, a través de los recibos.

La tabla presenta un registro detallado del consumo eléctrico del usuario en periodos anteriores, mostrando el consumo en kilovatios-hora (kWh) por bimestre a lo largo de un año.

Tabla 8. Consumo histórico del recibo de luz del usuario.

del 21 AGO 23 al 20 OCT 23	1649	\$984.00	\$984.00
del 21 JUN 23 al 21 AGO 23	1480	\$6,922.00	\$6,922.00
del 21 ABR 23 al 21 JUN 23	1585	\$7,101.00	\$7,101.00
del 21 FEB 23 al 21 ABR 23	1444		
del 21 DIC 22 al 21 FEB 23	1507	\$6,618.00	\$6,618.00
del 20 OCT 22 al 21 DIC 22	1578	\$7,079.00	\$7,079.00

- Cálculo de la demanda: Se calcula la energía total consumida en un período determinado para determinar la capacidad del sistema fotovoltaico necesario. En este caso, tomamos el periodo de un año en donde el cálculo obtenido Nos da un resultado de 27.4 kWh de consumo diario.

Para nuestro caso en específico, se calculó de la siguiente forma:

$$C_{diario} = \frac{1649 \text{ kWh}}{60 \text{ días}}$$

Nos da un resultado de 27.4 kWh de consumo diario.

Estudio de la Radiación Solar:

- Datos de irradiación: Se obtienen datos de irradiación solar del lugar de instalación, ya sea a través de estaciones meteorológicas o de bases de datos en línea. La ubicación del sistema fotovoltaico es en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, lugar en donde incide una irradiación de aproximadamente 5000 W/m^2 .
- Horas sol pico: número de horas al día con máxima irradiación. En la ubicación seleccionada es de 5 HSP.
- Inclinación y orientación: ángulo óptimo para la instalación de los paneles solares. El resultado obtenido para el ángulo de inclinación es de 14.74° , y con una orientación al sur para tener una mayor captación de radiación solar durante todo el día.
- Cálculo de la producción: Se estima la cantidad de energía que se puede generar con un sistema fotovoltaico de determinada capacidad en el lugar específico.

Selección de componentes:

Paneles Solares: para este caso en particular, se utilizaron paneles solares de la marca JA solar.

- Tecnología: La tecnología utilizada para los paneles solares son de tipo monocristalinos
- Potencia: Se ha determinado utilizar una potencia de 555 W.
- Dimensiones: Debe adaptarse al espacio disponible en el techo o la estructura de montaje. En este caso es de 2278 mm *1134 mm* 30 mm.

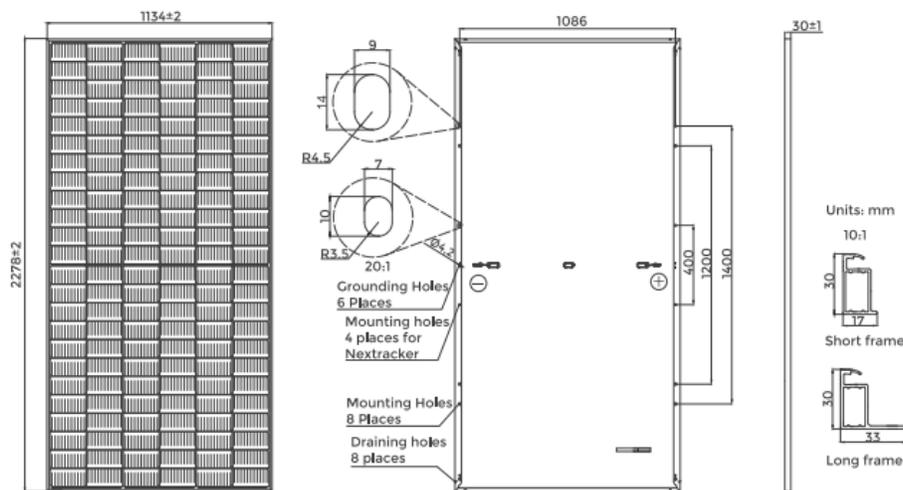


Figura 36. Medidas de panel solar de la marca JA solar.

Inversor: el inversor seleccionado fue de la marca Growatt de 12,000 W.

- Tipo: Conectado a la red.
- Potencia: Debe ser compatible con la potencia total de los paneles. En este caso, se utiliza un inversor con potencia de entrada de hasta 12,000 W, y con una potencia de salida de 7,000W.
- Eficiencia: Su máxima eficiencia es de 98.1%.
- Comunicaciones: Permite la monitorización y control del sistema de manera remota.



Figura 37. Inversor elegido marca “GROWATT”.

Estructura de Montaje:

- Tipo: Montaje sobre estructura en plano paralelo
- Material: Aluminio.
- Resistencia: Debe soportar el peso de los paneles.

Cables y conectores:

Los cables y conectores son componentes esenciales en un sistema fotovoltaico, ya que son los encargados de transportar la corriente eléctrica generada por los paneles solares hacia el inversor y, posteriormente, a la red eléctrica o a los equipos a alimentar.

Importancia de los Cables y Conectores.

- Confiabilidad: Una conexión eléctrica segura y eficiente es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del sistema a largo plazo.

- **Pérdidas de energía:** La elección de cables y conectores inadecuados puede generar pérdidas de energía por calentamiento y resistencia eléctrica.
- **Durabilidad:** Los componentes deben ser resistentes a las condiciones ambientales, como la radiación solar, la humedad y las temperaturas extremas.
- **Seguridad:** Una instalación eléctrica defectuosa puede provocar incendios o electrocuciones.

Tipos de Cables y Conectores

Cables fotovoltaicos:

- **Características:** Diseñados específicamente para soportar las condiciones de las instalaciones fotovoltaicas, como la exposición a la intemperie y las altas temperaturas.
- **Materiales:** Generalmente fabricados con conductores de cobre o aluminio y aislamiento de materiales resistentes a la radiación UV.

Conectores fotovoltaicos:

- **Características:** Diseñados para garantizar una conexión segura y estanca entre los cables y los diferentes componentes del sistema.
- **Conectores MC4:** Los más utilizados en la industria fotovoltaica, ofrecen una conexión rápida y segura.



Figura 38. Conectores MC4.

Selección de Cables y Conectores

Al seleccionar los cables y conectores, se deben considerar los siguientes factores:

- Sección del cable: Depende de la corriente que debe transportar y de la longitud del cable.
- Tipo de aislamiento: Debe ser adecuado para las condiciones ambientales y la tensión del sistema.
- Tipo de conector: Debe ser compatible con los componentes del sistema y ofrecer una conexión segura.
- Normativa: Los cables y conectores deben cumplir con las normativas eléctricas locales y nacionales.

El cálculo de cables eléctricos es fundamental para garantizar que el sistema fotovoltaico funcione de manera eficiente y segura. Un mal dimensionamiento puede provocar sobrecalentamiento, pérdidas de energía y daños en los equipos.

Parámetros clave para el cálculo de cables

- Corriente eléctrica (I): La corriente que circulará por el cable (en amperios, A).
- Longitud del cable (L): La distancia entre los módulos fotovoltaicos y el inversor, o entre el inversor y el punto de conexión a la red, en metros (m).
- *Caída de tensión permisible (ΔV)*: La pérdida de voltaje a lo largo del cable. Generalmente se permite una caída de tensión entre el 1% y el 3% del voltaje total del sistema para evitar pérdidas excesivas.
- *Resistencia específica del material del cable (ρ)*: La mayoría de los cables están hechos de cobre o aluminio. La resistencia específica varía entre materiales, pero para cobre es de $0.0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ y para aluminio es de $0.0282 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.
- Temperatura ambiente: A mayor temperatura, mayor será la resistencia del cable y, por lo tanto, la necesidad de un cable de mayor sección.

Cálculo de la sección del cable (S)

Para calcular la sección transversal mínima del cable (en mm^2), se utiliza la siguiente fórmula:

$$S = \frac{2 * \rho * I * L}{\Delta V}$$

Ec 19. Sección transversal mínima del cable.

Donde:

S =Sección del cable (mm^2).

ρ =Resistividad del material ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

I =Corriente.

L =Longitud del cable (m).

ΔV = Caída de tensión permisible (V).

$$S = \frac{2 * 0.0175 * 14.07 * 70}{3.7} = 9.3mm^2$$

En base a esto, es preferible utilizar cable con un calibre #8 AWG. Es recomendable que, al elegir el calibre del cable, se tome el valor próximo del resultado de la sección del cable.

La tabla 9 presenta una comparativa que muestra la conversión de las secciones de cable expresadas en American Wire Gauge (AWG) a milímetros cuadrados (mm^2). Se incluyen filas que indican diferentes tamaños de cable AWG junto con sus equivalentes en mm^2 , proporcionando una referencia útil para ingenieros y técnicos en la selección adecuada de conductores eléctricos para sistemas fotovoltaicos.

Esta información es esencial para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema, asegurando que los cables utilizados sean apropiados para la capacidad de corriente requerida.

Tabla 9. Equivalencia de sección de cable AWG a mm².

Tabla de Equivalencia AWG a MM2	
AWG/kcmil	MM2
#22 awg	0.5
#20 awg	0.75
#18 awg	1
#16 awg	1.5
#14 awg	2.5
#12 awg	4
#10 awg	6
#8 awg	10
#6 awg	16
#4 awg	25
#2 awg	35
#1 awg	50
#2/0 awg	70
#3/0 awg	95
#4/0 awg	120
300 kcmil	150
350 kcmil	185
500 kcmil	240
750 kcmil	400

Mantenimiento

El mantenimiento de los cables y conectores consiste en realizar inspecciones periódicas para detectar posibles daños o corrosión. En caso de encontrar algún problema, se debe proceder a su reparación o reemplazo.

Conexión a la red

Se tramitan los permisos necesarios para la conexión del sistema a la red eléctrica.

4.2 Implementación.

La implementación de un sistema fotovoltaico implica un proceso que va desde el diseño inicial hasta la conexión final a la red eléctrica.

Siguiendo los pasos de la ecuación 12, obtenemos el siguiente dato de la capacidad a instalar.

$$P_{req} = \frac{27.4 \text{ kWh}}{5 \text{ h}} = 5.48 \text{ kW}$$

Se realizó un cálculo detallado del sistema fotovoltaico, considerando las pérdidas típicas del sistema en un 30%. El resultado inicial indicó una necesidad de 7,124 W. Sin embargo, a petición del cliente, se decidió sobredimensionar el sistema, estableciendo así una capacidad final de 10,000 W. Esta decisión permitirá asegurar un mayor margen de generación de energía y garantizar el suministro eléctrico incluso en condiciones menos favorables.

Con la ecuación 13, obtenemos el número de paneles que se requiere para el sistema fotovoltaico.

$$N_p = \frac{10000 \text{ W}}{555 \text{ W}} = 18 \text{ paneles}$$

La ecuación 14 nos permite saber el ángulo óptimo que deben tener los paneles solares para un mejor rendimiento.

Obtenemos como resultado lo siguiente:

$$\beta = 3.7 + 0.69 * \phi = 3.7 + 0.69 * 16 = 14.74$$

$$N_I = \frac{10000 \text{ W}}{555 \text{ W}} = 1 \text{ inversor.}$$

la potencia total del sistema se dividió entre la potencia nominal del. El resultado obtenido indica que un solo inversor central de 12,000 W es suficiente para convertir la corriente continua generada por los paneles solares en corriente alterna utilizable.

El número de paneles permitidos que se pueden conectar en serie por string es el siguiente:

$$P_s = \frac{550 V}{42.11 V} = 13 \text{ paneles por string}$$

Un string es un grupo de paneles solares fotovoltaicos conectados en serie.

4.2.1 Instalación.

La instalación de un sistema fotovoltaico requiere de precisión y cuidado en cada etapa para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro.

4.2.1.1. Preparación del Sitio:

- Limpieza: Se limpia a fondo el área donde se instalarán los paneles, eliminando cualquier obstáculo como hojas, ramas o suciedad que pueda afectar la producción de energía.
- Verificación de la estructura: Se inspecciona la estructura del techo o soporte donde se colocarán los paneles para asegurar su solidez y capacidad de carga.
- Marcado: Se marcan los puntos exactos donde se fijarán los paneles y los soportes, asegurando la correcta orientación e inclinación.

La figura 42 muestra el proceso de preparación del sitio donde se instalará el sistema fotovoltaico. Se asegura que el área esté libre de escombros y adecuadamente nivelada para la instalación de la estructura que sostendrá

los paneles solares. Esta fase es fundamental para garantizar una instalación segura y eficiente, optimizando el rendimiento del sistema fotovoltaico desde el inicio.



Figura 39. Preparación del sitio.

4.2.1.2. Montaje de la Estructura:

- **Instalación de soportes:** Se instalan las estructuras de montaje sobre el techo, de acuerdo con el diseño previamente elaborado.
- **Nivelación:** Se verifica que la estructura esté perfectamente nivelada para asegurar la correcta inclinación de los paneles.
- **Fijación:** Se fijan los soportes a la estructura del edificio mediante pernos, tornillos y/o anclajes adecuados.

En la figura 43 se observa el proceso de montaje de la estructura que sostendrá los paneles solares. La estructura metálica está siendo ensamblada sobre el techo del edificio, con soportes ajustados y alineados para garantizar estabilidad y la inclinación adecuada.



Figura 40. Montaje de la estructura.

4.2.1.3. Instalación de los Paneles Solares:

- **Conexión de los paneles:** Se conectan los paneles solares entre sí en serie de acuerdo con el diseño del sistema.
- **Fijación a la estructura:** Se fijan los paneles a la estructura de montaje mediante los sistemas de sujeción correspondientes.
- **Verificación de las conexiones:** Se verifica que todas las conexiones entre los paneles estén bien apretadas y sin daños.

La figura 44 muestra a personas instalando los paneles solares sobre la estructura metálica del techo, asegurándolos firmemente con soportes y anclajes. Los módulos solares están alineados en filas, orientados e inclinados estratégicamente para optimizar la captación de la luz solar.



Figura 41. Instalación de los paneles solares.

4.2.1.4. Cableado:

- Instalación de los cables: Se instalan los cables desde los paneles solares hasta la caja de combinadores y el inversor, siguiendo la ruta establecida en el diseño.
- Protección de los cables: Se protegen los cables contra la intemperie y posibles daños mecánicos mediante conductos o canalizaciones.
- Conexión a la caja de combinadores: Se conectan los cables de los paneles solares a la caja de combinadores, que agrupa las cadenas de paneles.

4.2.1.5. Conexión del Inversor:

- Ubicación del inversor: Se instala el inversor en un lugar seco y ventilado, cerca del punto de conexión a la red eléctrica.
- Conexión de los cables: Se conectan los cables de la caja de combinadores al inversor, siguiendo las instrucciones del fabricante.

- Configuración del inversor: Se configura el inversor según las especificaciones del sistema y las necesidades del usuario.

4.2.1.6. Conexión a la Red Eléctrica:

- Conexión a la caja general de protección: Se conecta el inversor a la caja general de protección de la instalación eléctrica.
- Instalación del medidor bidireccional: Se instala un medidor bidireccional para registrar la energía generada y consumida.
- Conexión a tierra: Se realiza una conexión a tierra adecuada para garantizar la seguridad del sistema.

4.2.1.7. Pruebas y Puesta en Marcha:

- Pruebas de funcionamiento: Se realizan pruebas para verificar que todos los componentes del sistema funcionan correctamente.
- Verificación de la producción: Se verifica que la producción de energía sea la esperada.
- Ajustes finales: Se realizan los ajustes finales necesarios para optimizar el rendimiento del sistema.

En la siguiente figura 45, se muestran los paneles solares colocados de manera óptima en el techo del establecimiento, orientados para maximizar la captación de radiación solar.



Figura 42. Sistema fotovoltaico completamente instalado.

4.2.1.8. Documentación:

- Informe de instalación: Se elabora un informe detallado de la instalación, incluyendo planos, esquemas eléctricos y datos técnicos.
- Certificados: Se obtienen los certificados necesarios para la puesta en marcha del sistema y su conexión a la red eléctrica.

4.3 Evaluación.

Una evaluación exhaustiva de un sistema fotovoltaico comercial interconectado a la red busca determinar su eficiencia, rendimiento y estado general, así como identificar posibles áreas de mejora. Este proceso involucra una serie de pasos y análisis, los cuales pueden variar ligeramente dependiendo del tamaño del sistema y los objetivos específicos de la evaluación.

4.3.1 Evaluación eficiente del sistema.

En la siguiente figura 46, muestra la interfaz de la plataforma de monitoreo remoto del Sistema Fotovoltaico Interconectado (SFI). En la pantalla se visualizan gráficos y datos en tiempo real sobre la producción de energía, el rendimiento de los paneles solares y el consumo eléctrico del sistema. Los usuarios pueden acceder a información detallada como la generación diaria, mensual y acumulada, así como alertas sobre posibles fallos o irregularidades en el funcionamiento. Esta herramienta permite gestionar y optimizar el sistema de manera eficiente a distancia.

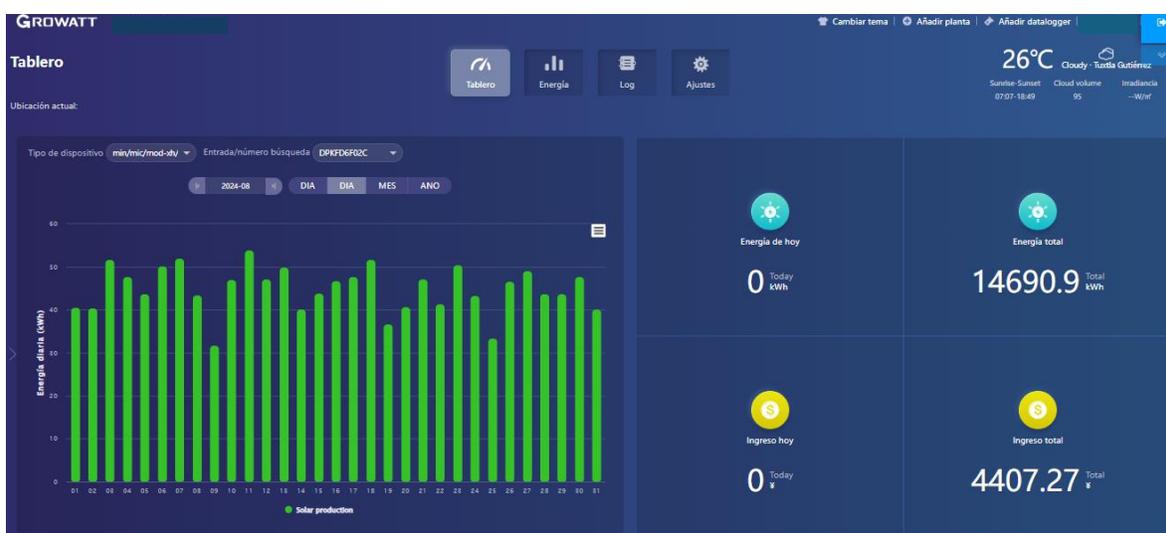


Figura 43. Plataforma de monitoreo remoto para el SFI.

La evaluación de la eficiencia de un sistema fotovoltaico es un aspecto crucial para determinar su desempeño real y validar las estimaciones iniciales.

Rendimiento energético específico: Energía generada por kWp instalado y por año.

En el mes de agosto se registró los datos de la energía generada por los 10 kWp instalados del sistema fotovoltaico, la generación depende del estado climatológico, en días totalmente despejado se ha tenido alcance de hasta 55 kWh en un solo día, mientras que, al tener un clima totalmente nublado y deficiente para el sistema, se ha registrado que se obtiene hasta los 30 kWh. Teniendo así, un rango desde los 30 kWh hasta los 55 kWh, teniendo una producción promedio de 45 kWh.

La siguiente figura 47, muestra un gráfico que detalla la producción de energía diaria del sistema fotovoltaico durante el mes de agosto, expresada en kilovatios-hora (kWh). Cada barra representa la cantidad de energía generada por día, con variaciones debido a las condiciones climáticas, como la nubosidad o los días soleados. El gráfico permite observar la tendencia general de producción, destacando los días con mayor y menor generación, y proporcionando una visión clara del rendimiento del sistema a lo largo del mes.

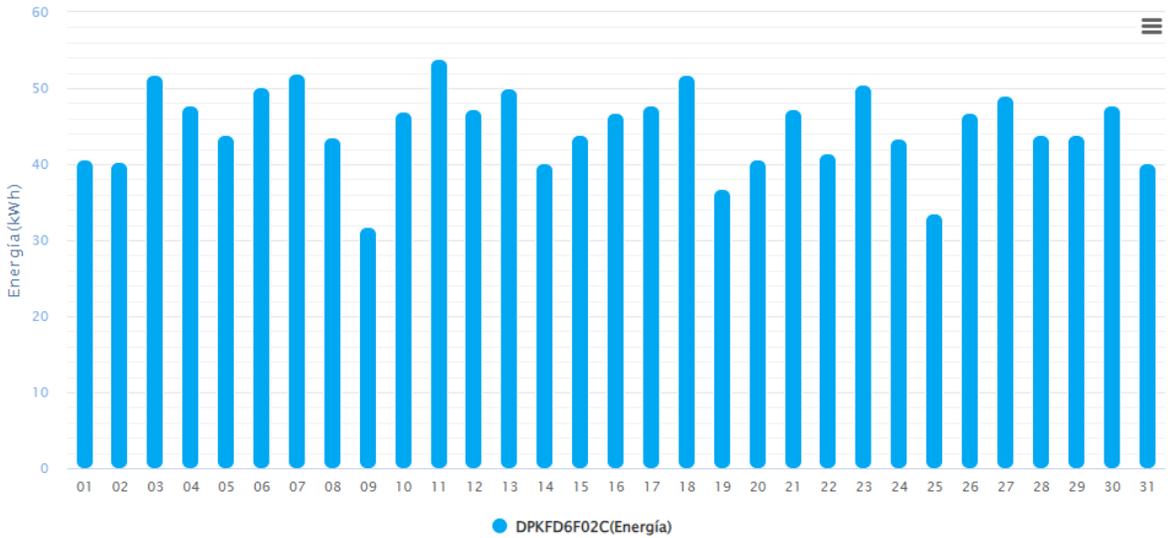


Figura 44. producción diaria en kWh del mes de agosto.

La producción de la potencia estimada está en dependencia de la radiación mensual estimada. Para calcular la radiación solar mensual estimada en un lugar específico, generalmente se siguen los siguientes pasos.

Los datos de radiación solar diaria promedio por metro cuadrado se obtienen de bases de datos meteorológicas, como el Servicio Meteorológico Nacional.

La radiación diaria promedio se multiplica por la cantidad de días del mes que deseas analizar. Si se conoce la radiación media diaria de un mes específico.

*Radiación mensual = radiación diaria promedio * Número de días del mes*

$$Radiación\ mensual = 5000Wh/m^2 * 30\ días = 150,000Wh/m^2$$

Ec 20. Radiación mensual estimada.

Para calcular la potencia eléctrica estimada generada por un sistema fotovoltaico a partir de la radiación solar mensual estimada, se deben seguir varios pasos, tomando en cuenta la eficiencia del sistema, la radiación incidente sobre los paneles, y otros factores.

La potencia eléctrica generada por un sistema fotovoltaico depende de varios factores y se puede calcular usando la siguiente fórmula general:

$$E = A * H_m * \eta$$

Donde:

E = Energía eléctrica generada en un mes (kW/mes)

A = Área de los paneles solares

H_m = Radiación solar mensual estimada.

η = Eficiencia global del sistema fotovoltaico.

El cálculo sería:

$$E = 46.62 \text{ m}^2 * 150 \text{ kWh/m}^2 * 0.20 = 1,394.7 \text{ kWh/mes}$$

Ec 21. Producción de potencia estimada.

El resultado obtenido de la producción de energía estimada del mes de agosto es de 1,057 kWh, mientras que en la producción real que se registró fue de 1.394.9 kWh.

La figura muestra un gráfico que presenta la producción mensual de energía del Sistema Fotovoltaico Interconectado (SFI), expresada en kilovatios-hora (kWh). Cada barra representa la energía generada en un mes específico, lo que permite visualizar las fluctuaciones de producción a lo largo del año. Las variaciones reflejan factores como la estacionalidad, la disponibilidad de radiación solar, y las condiciones climáticas, proporcionando una evaluación del desempeño global del sistema durante diferentes meses.

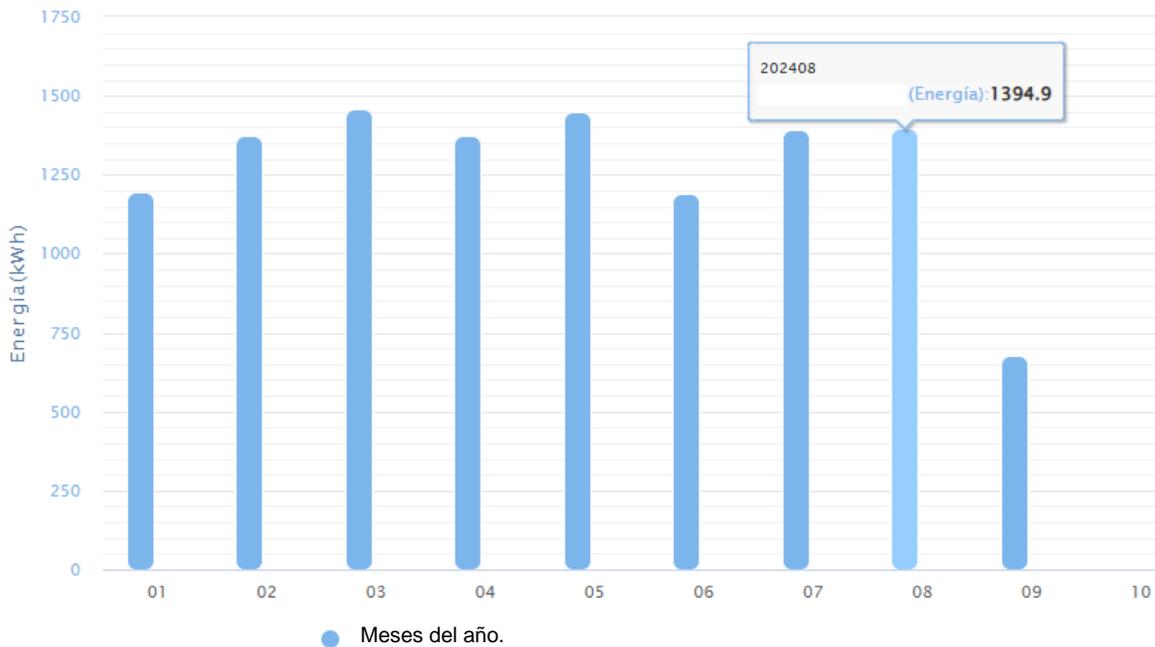


Figura 45. producción mensual en kWh del SFI.

Los datos de radiación solar diaria promedio por metro cuadrado

4.3.2 Identificar posibles mejoras.

Una vez realizado un análisis exhaustivo del comportamiento de un sistema fotovoltaico, es posible identificar diversas áreas de mejora que permitan optimizar su rendimiento y maximizar la producción de energía.

1. Limpieza de los Paneles:

- Frecuencia: Establecer un programa de limpieza regular basado en las condiciones climáticas locales y el nivel de contaminación.
- Métodos: Utilizar agua desmineralizada y herramientas adecuadas para evitar dañar los paneles.

2. Gestión del Sombreado:

- Identificación de fuentes de sombra: Árboles, edificios, otros paneles, etc.
- Soluciones: Poda de árboles, reubicación de paneles.

3. Optimización de la Inclinación y Orientación:

- Verificación de la instalación: Asegurarse de que los paneles estén instalados con la inclinación y orientación óptimas según la ubicación geográfica.
- Ajustes: Realizar ajustes si es necesario para maximizar la captación de radiación solar.

4. Mantenimiento Preventivo:

- Inspecciones regulares: Realizar inspecciones periódicas de todos los componentes del sistema.
- Reemplazo de componentes: Sustituir los componentes dañados o defectuosos de manera oportuna.
- Actualización de software: Mantener el software del inversor actualizado para aprovechar las últimas mejoras.

5. Optimización de la Configuración Eléctrica:

- Verificación de las conexiones: Asegurarse de que todas las conexiones eléctricas estén bien ajustadas y libres de corrosión.
- Optimización de los cables: Utilizar cables de la sección adecuada para minimizar las pérdidas por caída de tensión.
- Balance de carga: Asegurarse de que la carga esté equilibrada entre los diferentes strings de paneles.

4.3.3 Consumo de energía.

El consumo de energía en un sistema fotovoltaico puede parecer contradictorio, ya que su función principal es generar electricidad. Sin embargo, es importante entender que todos los sistemas electrónicos, incluso los fotovoltaicos, requieren una cierta cantidad de energía para funcionar.

¿Qué consume energía en un sistema fotovoltaico?

- Inversor: El inversor es el componente principal que convierte la corriente continua generada por los paneles solares en corriente alterna utilizable.

Este proceso requiere una pequeña cantidad de energía. El inversor seleccionado para su correcto funcionamiento tiene un autoconsumo de <1W.

- Pérdidas en el sistema: Las conexiones eléctricas, los cables y otros componentes pueden generar pérdidas de energía en forma de calor.

La tabla detalla las pérdidas totales asociadas al sistema fotovoltaico, desglosando los diferentes factores que contribuyen a la disminución de la eficiencia en la generación de energía. Incluye columnas que representan cada tipo de pérdida, como las pérdidas por sombras, temperatura, cableado, y otros componentes del sistema. Asimismo, se presentan las pérdidas totales en porcentaje y en kilovatios-hora (kWh), lo que permite al lector comprender el impacto acumulado de estas pérdidas en la producción energética del sistema.

Tabla 10. Total de pérdidas.

Pérdidas x cableado eléctrico	3%
Pérdidas x conversión de energía	5%
Pérdidas x polvo y sombra	15%
Pérdidas x sombra	6%
Total de pérdidas	29% ≈ 30%

La energía consumida por el sistema fotovoltaico es generalmente muy pequeña en comparación con la energía generada. Además, esta energía se compensa con creces por el ahorro que se obtiene al utilizar la energía solar.

4.3.4 Estado de los componentes.

El estado de los componentes de un sistema fotovoltaico es crucial para garantizar su correcto funcionamiento y eficiencia a largo plazo. Una evaluación regular permite detectar a tiempo cualquier deterioro o anomalía, lo que facilita la toma de medidas correctivas y evita costosas reparaciones.

Los principales componentes de un sistema fotovoltaico que requieren evaluación son:

- Paneles solares: Se inspeccionan visualmente para detectar roturas, grietas, suciedad, decoloración o signos de delaminación. También se evalúa la eficiencia de los paneles mediante mediciones eléctricas.
- Inversor: Se verifica el funcionamiento del inversor, su eficiencia, la presencia de códigos de error y la calidad de la onda sinusoidal de salida.
- Estructura de soporte: Se inspecciona la estructura de soporte para detectar corrosión, deformaciones, óxido o daños en los puntos de fijación.
- Conexiones eléctricas: Se revisan todas las conexiones eléctricas, incluyendo los conectores, cables y cajas de conexiones, para asegurar que estén limpias, apretadas y sin signos de corrosión.

4.3.5 Reducción del costo en el recibo de luz del usuario.

Gracias a la implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red en el establecimiento, se ha logrado una notable disminución en los costos de energía eléctrica. Anteriormente, el negocio enfrentaba facturas de electricidad significativamente más altas. Sin embargo, tras el análisis y dimensionamiento

adecuados, se instaló un sistema solar capaz de generar una parte considerable de la energía requerida.

Como resultado, el monto de la factura de electricidad, que anteriormente ascendía a cifras elevadas, se ha reducido drásticamente. En la figura 49 se muestra que hoy en día, el cobro bimestral se ha disminuido a tan solo 85 pesos, lo que refleja el impacto positivo del sistema en el ahorro de costos y la eficiencia energética del establecimiento. Esto demuestra no solo la viabilidad del sistema fotovoltaico, sino también el beneficio económico a largo plazo que puede ofrecer a los usuarios.



Figura 46. Recibo de luz del usuario.

4.4 Análisis económico.

Se determina el valor de los recursos necesarios para la ejecución del proyecto, los costos totales de operación del proceso productivo y el valor de los ingresos que se aspira recibir en el periodo de vida útil.

Aspectos clave a considerar en el análisis económico:

- Costos iniciales:
 - Adquisición de equipos: Paneles solares, inversores, estructuras de montaje.
 - Instalación: Mano de obra, permisos, licencias.
 - Conexiones a la red: Si se requiere conectar el sistema a la red eléctrica.

Costos operativos:

- Mantenimiento: Limpieza de paneles, revisión de conexiones, reemplazo de componentes.
- Seguros: Cobertura ante daños o robos.

Por todo lo anterior, el costo inicial del sistema fotovoltaico fue de aproximadamente \$160,000 pesos mexicanos considerando un precio mínimo de 0.8 USD por Wp.

Se obtuvo este resultado de la siguiente forma:

Los 10,000 Wp que se necesita para el sistema fotovoltaico lo multiplicamos por el costo del mercado instalado por Wp.

$$10,000Wp * 0.8 USD = 8000USD * 20 MXN = 160,000MXN$$

Ec 22. Costo de la instalación fotovoltaica con el precio mínimo por Wp.

Para un costo máximo por W_p instalado de 1.2 USD que se encuentra en el mercado, se obtiene el siguiente resultado:

$$10,000W_p * 1.2 \text{ USD} = 12,000\text{USD} * 20 \text{ MXN} = 240,000\text{MXN}$$

Ec 23. Costo de la instalación fotovoltaica con el precio máximo por W_p .

4.4.1 Beneficios económicos.

Ahorro en la factura eléctrica.

La energía que genera el sistema fotovoltaico se utiliza para cubrir parte o la totalidad del consumo eléctrico del negocio durante el día, lo que reduce el consumo de energía proveniente de la red.

Consumo desplazado: Esto es la cantidad de energía que antes se consumía de la red eléctrica y que ahora es suministrada por el sistema fotovoltaico. La ecuación básica es:

$$\text{Ahorro anual} = \text{Energía generada por el sistema al año} * \text{tarifa eléctrica}$$

Ec 24. Ahorro anual.

Se debe considerar el cargo fijo por mes que es de 36.36 pesos MXN, por lo que en un año es de 436.32 MXN y el IVA de 16%.

El ahorro sería lo siguiente:

$$\text{Ahorro anual: } [(16,968.85\text{kWh} * 4.036) + 436.32] * 1.16 = 79,950.2144\text{MXN}$$

4.4.2 Análisis de rentabilidad.

Periodo de recuperación de inversión.

es el tiempo que tarda un proyecto en recuperar la inversión inicial a través de los flujos de caja generados por el mismo. En el contexto de un sistema fotovoltaico comercial interconectado a la red, el período de retorno representa cuántos años tomará recuperar la inversión inicial del sistema mediante los ahorros en la factura eléctrica y los posibles ingresos por la venta de energía excedente.

Fórmula del Período de Retorno Simple

El Período de Retorno Simple se calcula de la siguiente manera:

$$\textit{Periodo de retorno} = \frac{\textit{Inversión inicial}}{\textit{Flujos de cajas anuales netos}}$$

Ec 25. Periodo de retorno

Donde:

- Inversión Inicial: El costo total del sistema fotovoltaico (paneles solares, instalación, permisos, etc.).
- Flujos de Caja Anuales Netos: Los ahorros anuales en la factura eléctrica más los posibles ingresos por la venta de energía a la red, menos los costos de operación y mantenimiento.

Cálculo del Periodo de recuperación de inversión.

Para calcular el período de retorno se siguen los siguientes pasos:

a) Inversión Inicial:

- Costos iniciales del sistema fotovoltaico: Incluye el costo de los paneles solares, inversores, la instalación, permisos, y cualquier otro costo relevante.

b) Flujos de Caja Anuales:

- Ahorro en la factura eléctrica: Calcula cuánto ahorra la empresa cada año por generar su propia energía solar, que reduce la energía comprada de la red.
- Ingresos por venta de excedentes (si aplica): Si existe un esquema de compensación por inyectar energía excedente a la red, suma estos ingresos anuales.
- Costos de operación y mantenimiento: Resta los costos anuales de mantenimiento del sistema fotovoltaico (limpieza de paneles, revisiones, etc.). lo tomaremos como 1,500 pesos MXN.

El periodo de retorno del precio mínimo sería:

$$\text{Periodo de retorno 1} = \frac{160,000 \text{ MXN}}{79,950.2144 \text{ MXN}} = 2 \text{ años}$$

Para el precio máximo se obtuvo lo siguiente:

$$\text{Periodo de retorno 2} = \frac{240,000 \text{ MXN}}{79,950.2144 \text{ MXN}} = 3 \text{ años}$$

La figura 50 presenta un gráfico que ilustra el tiempo necesario para recuperar la inversión en un sistema fotovoltaico, considerando dos escenarios: el precio mínimo y el precio máximo por kilovatio pico (kWp) instalado. Las barras en el gráfico muestran cómo varía el periodo de recuperación en función de los

diferentes costos de instalación, destacando las diferencias en el retorno de la inversión bajo cada condición de precio.

Esta representación visual permite evaluar la viabilidad económica del proyecto, facilitando la comparación entre las dos opciones de inversión.

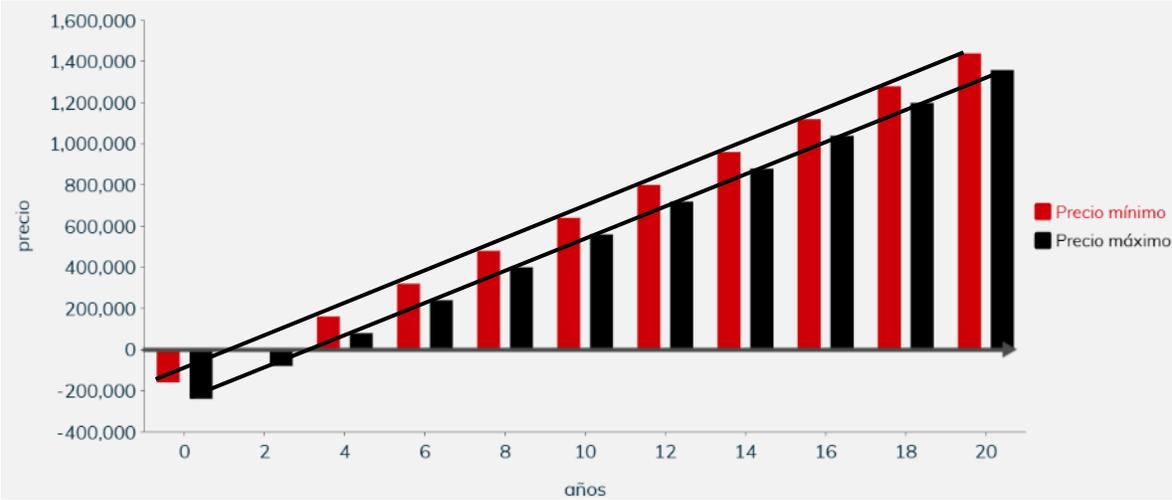


Figura 47. Gráfica de periodo de recuperación de inversión para precio mínimo y precio máximo de kWp instalado.

4.4.3 Proyección de precios energéticos.

La proyección de precios energéticos es una parte crucial en el análisis económico de un sistema fotovoltaico comercial interconectado a la red, ya que los precios futuros de la energía eléctrica afectarán directamente los ahorros que genera el sistema y, por lo tanto, la viabilidad financiera del proyecto. Esto permitirá calcular el impacto de posibles fluctuaciones en el costo de la energía convencional, lo que afectará los ahorros que obtendrá el establecimiento comercial por la instalación del sistema fotovoltaico.

Al proyectar los precios de la energía, es importante considerar varios factores que afectan el costo de la electricidad a lo largo del tiempo:

- Crecimiento de la demanda energética: A medida que las economías crecen y más sectores consumen electricidad, los precios tienden a aumentar.
- La inflación general afecta los precios energéticos, ya que todos los costos asociados a la generación y distribución de energía aumentan con la inflación.

Analizar los cambios históricos en los precios de la energía es una forma sencilla de proyectar el comportamiento futuro. Esto implica calcular la tasa de crecimiento anual promedio de los precios de la electricidad y aplicarla hacia el futuro.

$$\text{Precio futuro} = \text{Precio actual} * (1 + \text{tasa de crecimiento})^n$$

Ec 26. Precio futuro.

Donde:

Precio actual: precio de la electricidad en el año base.

Tasa de crecimiento: Tasa de crecimiento promedio anual (por ejemplo, 2%-4%).

n: Número de años proyectados

Siendo el resultado el siguiente:

$$\text{Precio futuro} = 4.68 * (1 + 2)^{20} = 6.95$$

La tabla 11 presenta un análisis detallado de los aspectos clave que distinguen la energía convencional de la energía fotovoltaica. Incluye columnas que indican el costo de instalación inicial, el costo anual de electricidad, el costo total acumulado en 20 años, el ahorro total durante ese periodo, el periodo de retorno de la inversión, la producción energética a lo largo de dos décadas y el precio proyectado de la electricidad en el futuro.

Esta comparativa permite visualizar de manera clara y concisa los beneficios económicos y energéticos de optar por un sistema fotovoltaico frente a la energía convencional, evidenciando el impacto positivo que la energía solar puede tener en la reducción de costos y la sostenibilidad a largo plazo.

Tabla 11. Comparativa de la energía convencional y la energía fotovoltaica.

Concepto	Energía convencional	Energía fotovoltaica
Costo de instalación inicial	0	160,000. Pesos MXN.
Costo anual de electricidad	79,950.2144 pesos MXN.	0 (compensado por el sistema).
Costo total en 20 años	1,599,004.29 pesos MXN.	160,000 pesos MXN.
Ahorro total en 20 años	0	1,439,004.29 pesos MXN.
Periodo de retorno	N/A	2 años
Producción energética	0 (consumo convencional).	45 kWh/día
Precio de la electricidad (futuro)	6.95 pesos/kWh	0 (autogeneración)

4.4.4 Eficiencia Financiera a Largo Plazo

La eficiencia financiera a largo plazo de un sistema fotovoltaico comercial interconectado a la red depende de varios factores clave que determinan la relación costo-beneficio y la capacidad del sistema para generar ahorros y aumentar el valor del activo a lo largo del tiempo. En este análisis, se considerarán los elementos que influyen en la viabilidad financiera de un proyecto fotovoltaico, destacando cómo maximiza el retorno de inversión (ROI) y minimiza riesgos económicos en el largo plazo.

Ahorro Energético y Financiero

El ahorro energético proviene de la autogeneración de electricidad que reduce la dependencia de la red eléctrica. En el caso planteado, el sistema de 10 kWp compensa completamente el consumo diario del establecimiento (27.4 kWh). El ahorro financiero directo es evidente en la reducción o eliminación de la factura eléctrica.

Este ahorro no solo se manifiesta en el corto plazo, sino que se amplifica en el largo plazo debido al aumento proyectado en los precios de la energía convencional. Con un crecimiento estimado del costo eléctrico a 6.95 pesos/kWh, la instalación fotovoltaica ofrece una solución a la volatilidad de los precios de la electricidad.

Retorno de la Inversión (ROI)

El retorno de la inversión se refiere al porcentaje de ganancia obtenido en relación con el costo inicial del proyecto. Una vez superado el período de retorno, el ahorro anual de 67,644.72 MXN se traduce en beneficios netos. Si proyectamos estos ahorros durante 20 años:

$$ROI = \frac{\text{Ahorro total en 20 años} - \text{inversión inicial}}{\text{inversión inicial}} * 100$$

Ec 27. ROI

$$ROI = \frac{1,352,894.4 \text{ MXN} - 160,000 \text{ MXN}}{160,000 \text{ MXN}} * 100 = 745.5\%$$

Esto significa que, en 20 años, la instalación genera un retorno de más del 745.5% sobre la inversión inicial, lo cual es una excelente muestra de eficiencia financiera.

4.5 Análisis de beneficio ambiental.

El análisis beneficio ambiental en un sistema fotovoltaico comercial interconectado a la red es una parte clave para justificar la viabilidad no solo económica, sino también ecológica del proyecto. Este análisis busca cuantificar los costos y beneficios ambientales que resultan de la implementación de la energía solar, comparándolos con los sistemas de energía convencionales basados en combustibles fósiles.

Los principales beneficios ambientales de un sistema fotovoltaico provienen de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes que afectan la calidad del aire, así como de la reducción del consumo de combustibles fósiles. Estos beneficios pueden medirse en términos cuantitativos y cualitativos.

La principal ventaja de la energía solar es que no genera emisiones de dióxido de carbono (CO₂), reduce el registro forestal y también contribuye en el carbón ahorrado. Esto contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático.

Se ha reducido: 13,726.3 kg de CO₂, 757 árboles y 5507 kg de carbón ahorrado.

Estos datos se obtuvieron de la plataforma de monitoreo del inversor central.



Figura 48. Contribución de un sistema fotovoltaico interconectado a la red.

Se puede utilizar el precio del carbono (o costo social del carbono) para calcular el valor económico de las emisiones evitadas. El costo social del carbono es una estimación del daño económico asociado con una tonelada de emisiones de CO₂.

El beneficio ambiental del CO₂ es el siguiente.

$$\text{Beneficio ambiental} = 13 \text{ toneladas} * 50 \frac{\text{USD}}{\text{tonelada}} = 650 \frac{\text{USD}}{\text{año}} = 13,000 \text{MXN}.$$

Ec 28. Beneficio ambiental.

4.6 Mantenimiento.

Es importante cubrir varios aspectos que abarcan desde el tipo de mantenimiento requerido, su periodicidad, los costos involucrados, y la durabilidad del sistema.

Tipos de Mantenimiento:

1. **Mantenimiento preventivo:** Este tipo de mantenimiento busca asegurar el buen funcionamiento del sistema a lo largo de su vida útil y evitar fallas antes de que ocurran. Incluye la limpieza de los paneles solares, la revisión de los inversores, cables y conexiones eléctricas.
- **Limpieza de paneles solares:** Los paneles suelen acumular polvo, suciedad y otros residuos que pueden reducir su eficiencia. Se recomienda realizar una limpieza periódica, al menos dos veces al año, para garantizar que la captación de radiación solar sea óptima.
 - **Inspección de inversores:** Los inversores son un componente crítico del sistema ya que convierten la corriente continua (DC) generada por los paneles en corriente alterna (AC) que puede ser utilizada por el establecimiento o inyectada a la red. Es necesario revisar periódicamente

su funcionamiento, actualizaciones de firmware, y asegurar su ventilación adecuada para evitar sobrecalentamientos.

- Revisión de conexiones y cableado: Con el tiempo, las conexiones eléctricas pueden sufrir desgaste. Se recomienda inspeccionar los cables y conexiones para prevenir posibles problemas como cortocircuitos o pérdida de eficiencia por resistencias altas en los conductores.
2. Mantenimiento correctivo: Este tipo de mantenimiento se realiza cuando se detecta una falla en el sistema, como paneles dañados, problemas con el inversor, o fallas en la conexión a la red. Aunque este tipo de mantenimiento es menos frecuente, debe estar contemplado en el presupuesto general.

Periodicidad del Mantenimiento

- Frecuencia del mantenimiento preventivo: El mantenimiento preventivo se realiza típicamente entre una y dos veces al año, dependiendo del entorno y las condiciones de instalación. Por ejemplo, en áreas con mayor acumulación de polvo o contaminación, se podría requerir una limpieza más frecuente de los paneles.
- Mantenimiento correctivo: Este tipo de mantenimiento es impredecible, pero puede ser necesario cada vez que ocurra una falla inesperada. Afortunadamente, los sistemas fotovoltaicos son altamente fiables y no suelen presentar grandes problemas si se realiza el mantenimiento preventivo correctamente.

Costos del Mantenimiento

- **Mantenimiento preventivo:** El costo de limpieza de los paneles solares varía dependiendo de la ubicación y el tamaño del sistema, pero puede estimarse entre 1,000 y 3,000 MXN por limpieza para un sistema de 10 kWp. Este costo puede incluir la limpieza de los paneles, revisión de los inversores y chequeo de conexiones eléctricas.
- **Mantenimiento correctivo:** Aunque más costoso, el mantenimiento correctivo es menos frecuente. Dependiendo de la naturaleza del problema, la reparación de un inversor podría costar entre 10,000 y 20,000 MXN, mientras que la sustitución de un panel dañado podría costar alrededor de 3,000 a 6,000 MXN por panel, dependiendo de la tecnología utilizada.

Garantías y Vida Útil

- Los paneles solares generalmente cuentan con garantías de rendimiento de 20 a 30 años, asegurando que mantendrán alrededor del 80% de su capacidad de producción original al final de su vida útil. Durante este período, los paneles suelen requerir un mantenimiento mínimo.
- Los inversores suelen tener una vida útil de 10 a 15 años y, a menudo, vienen con una garantía de 5 a 10 años. Es posible que deban ser reemplazados al menos una vez durante la vida útil del sistema, lo cual debe considerarse en el análisis económico.

- Los costos de reemplazo de inversores deben considerarse como parte del plan de mantenimiento a largo plazo, dado que su vida útil es más corta que la de los paneles solares.

Comparativa de Mantenimiento vs Ahorros

El mantenimiento de un sistema fotovoltaico es mínimo en comparación con los ahorros que genera. A pesar de los costos de mantenimiento, los ahorros en la factura eléctrica superan con creces estos gastos. Si consideramos que el sistema está diseñado para generar ahorros de más de 1 millón de pesos en 20 años, los costos de mantenimiento son marginales en relación con el beneficio económico total.

Riesgos Potenciales y Mitigación

Degradación de paneles: Aunque los paneles solares tienen una vida útil larga, sufren una degradación gradual con el tiempo. Esta degradación suele ser del 0.5% al 1% anual. Un adecuado mantenimiento preventivo puede minimizar este deterioro.

Desastres naturales: Si bien los sistemas están diseñados para resistir condiciones climáticas adversas, fenómenos como granizo o huracanes pueden dañar los paneles. Es recomendable considerar un seguro para el sistema que cubra este tipo de eventos.

El mantenimiento de un sistema fotovoltaico interconectado a la red es relativamente sencillo y de bajo costo, especialmente si se compara con los ahorros que se obtienen en la factura eléctrica. Un adecuado programa de mantenimiento preventivo y correctivo asegura la longevidad y eficiencia del

sistema, y ayuda a maximizar la rentabilidad económica del proyecto. La combinación de bajos costos de mantenimiento y altos beneficios económicos a largo plazo refuerza la viabilidad económica del sistema fotovoltaico como una inversión estratégica.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN.

En este trabajo de tesis se ha cumplido con éxito el objetivo primordial, que consistía en el diseño, implementación y evaluación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red para un establecimiento comercial.

El sistema ha sido diseñado para maximizar la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar disponible, con el fin de reducir significativamente la dependencia de la red eléctrica convencional y, por ende, los costos asociados a la factura eléctrica.

Los objetivos particulares planteados al inicio de este trabajo también han sido alcanzados, lo que ha permitido desarrollar un proyecto integral y eficaz.

Basado en la demanda energética y los niveles de radiación solar, se dimensionó el sistema fotovoltaico interconectado con una capacidad adecuada para suplir las necesidades del establecimiento. Se realizaron cálculos detallados que incluyeron factores como las pérdidas por temperatura, la inclinación y orientación de los paneles, así como el rendimiento de los inversores. Este dimensionamiento se ajustó para maximizar la producción de energía y minimizar las pérdidas, garantizando que el sistema operara en condiciones óptimas.

Finalmente, se realizó el diseño detallado de la instalación del sistema fotovoltaico, tomando en cuenta las condiciones estructurales del edificio y las normativas vigentes en materia de instalaciones eléctricas y energías renovables.

El sistema fotovoltaico implementado tiene un impacto positivo tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Con un costo de instalación que varió entre \$160,000 MXN y \$240,000 MXN, dependiendo del precio del kWp, se obtuvo un ahorro anual significativo de \$79,950.21 MXN. Esto permitió un rápido periodo de recuperación de la inversión de 2 años en el caso de la opción de menor costo y 3 años para la de mayor costo, lo cual refleja la viabilidad financiera del sistema.

Además de los beneficios económicos, el impacto ambiental de la implementación del sistema fue notable. La reducción de 14,804.8 kg de emisiones de CO₂, el ahorro de 817 árboles y evitar la quema de 5,939.7 kg de carbón confirman el aporte del sistema en términos de sostenibilidad y contribución al medio ambiente. En el aspecto de ahorro en costos de electricidad, el sistema redujo el pago bimestral del recibo eléctrico de un promedio de \$7,000 MXN a solo \$85 MXN, disminuyendo de forma considerable el gasto energético del establecimiento y aportando estabilidad frente al alza de tarifas eléctricas.

El éxito de este trabajo radica en haber integrado de manera efectiva el conocimiento técnico, económico y ambiental para desarrollar un sistema que beneficie tanto al negocio como al entorno. De esta forma, se concluye que el sistema fotovoltaico interconectado a la red es una inversión estratégica y una opción viable para establecimientos comerciales que buscan reducir costos operativos, mejorar su eficiencia energética y contribuir al cuidado del medio ambiente.

REFERENCIAS

[1] POLO OLIVERO, M. L. (2022). SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ALTERNATIVA [Magister en Gestión de la Tecnología de la Innovación, UNIVERSIDAD DE LA GUAJIRA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MAESTRÍA EN GESTIÓN DE LA CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN]. repositoryinst.uniguajira.edu.co. <https://repositoryinst.uniguajira.edu.co/bitstream/handle/uniguajira/581/INFORME%20FINAL%20TESIS%20MARY%20LIA%20POLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[2] Sánchez Guevara, S., & Gil, J. F. (2019). Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a red con soporte de almacenamiento en la universidad tecnológica de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira.

[3] Historia de la Energía Solar Fotovoltaica. (s.f). estudiarenergiasrenovablesonline. <https://estudiarenergiasrenovablesonline.es/historia-energia-solar-fotovoltaica/>

[4] Historia de la energía solar ¿Quién inventó los paneles solares? - IDES. (s.f). IDES. <https://ingenieriasolar.es/historia-de-los-paneles-solares/>

[5] Gómez Hernández, D. (2018). Sistema de monitoreo remoto para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica de CFE [Tesis para ingeniería en electrónica. inédita]. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.

[6] Jiménez Díaz, Á. (2018). *“AUTOMATIZACIÓN DEL MONITOREO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A LA RED DE DISTRIBUCIÓN, DE INMUEBLES DE USOS PROPIOS DE LA DIVISIÓN CENTRO ORIENTE”* [MAESTRO EN INGENIERÍA CON OPCIÓN TERMINAL EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA, Benemérita Universidad Autónoma de

Puebla].

repositorioinstitucional.buap.mx. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/86b7b527-d783-4af1-af5e-1b761ad9cc26/content>

[7] Hernández Mora, J. A., Cortés Borray, A. F., Balaguera Cañola, D. A., & Uruña Saavedra, M. A. (2014). Aplicación de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: estado del arte. *Revista Tecnura*, 18. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.se1.a12>

[8] Herrera Vaca, L. E. (2018). *“Diseño del sistema de generación eléctrica conectado a la red utilizando paneles fotovoltaicos para el autoconsumo del complejo deportivo PLATAFORMA DEPORTIVA ubicada en el cantón Latacunga Provincia de Cotopaxi.”* [Magister en Gestión de Energías, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI DIRECCIÓN DE POSGRADOS]. [repositorio.utc.edu.ec. https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6386/1/MUTC-000614.pdf](https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6386/1/MUTC-000614.pdf)

[9] Gutiérrez Villegas, J. C. (2022). Metodología de prospección técnico-económica para la previsión e implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados [Doctor en Manufactura Avanzada, Centro de Tecnología Avanzada Dirección de Posgrado]. [ciateq.repositorioinstitucional.mx. https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/662/1/GutierrezVillegasJuanC%20DMANAV%202022.pdf](https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/662/1/GutierrezVillegasJuanC%20DMANAV%202022.pdf)

[10] *Tarifas CFE: Para casa, comercio, industria y sus costos 2022.* (s.f.). Paneles Solares en Monterrey. <https://www.greenlux.com.mx/paneles-solares-monterrey/tarifas-cfe-para-casa-negocio-y-sus-costos-2/>

[11] LAPEM. (2008). INTERCONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON CAPACIDAD HASTA 30 kW (CFE G0100-04). <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/pdfs/f/g0100-04.pdf>

[12]SENER. (2012). Instalaciones Electricas (Utilizacion). (Nom-001-Sede-2012). Diario Oficial de la Federación.

[13] Secretaría de Economía. (2002). Sistema General de Unidades de Medida. (NOM-008-SCFI-2002). Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=718870&fecha=27/11/2002&print=true

[14] International Electrotechnical Commission. (2017). (IEC 60364-7-712:2017).

[15]Comisión Reguladora de Energía. (2012). Resolución por la que la Comisión Reguladora de Energía expide las Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías renovables o cogeneración eficiente. (RESOLUCION Núm. RES/119/2012). Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5249086

[16]Este es el marco legal para instalar paneles solares en México. (s.f.). inntecsol. https://www.inntecsol.mx/energia-solar/diario-oficial-de-la-federacion-instalar-paneles-solares/#¿Que_es_la_norma_NOM-001-_SEDE-_Vigente

[17] Renteria, E. (2020, 5 de agosto). Interconexión CFE: ¿Qué trámites realizar al instalar paneles solares en tu empresa? Paneles solares México - Enlight | Paneles solares para industrias. <https://www.enlight.mx/blog/interconexion-cfe>

[18](s.f.).Home. <https://www.cfe.mx/hogar/nuevocontrato/Documents/contratacionconinterconexion.pdf>

[19] ACEVEDO GARCÉS, F. D. J. (2016). DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA CON CAPACIDAD PARA 3 KILOVATIOS [Proyecto de grado presentado para optar al título de Tecnólogo en Electrónica inédita]. UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA CEAD JOSÉ ACEVEDO Y GÓMEZ ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA TECNOLOGÍA EN ELECTRÓNICA.

[20] GENERALIDADES DEL SOL - IDEAM. (s.f.). IDEAM - IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-del-sol>

[21] INSUMOS ENERGÍA RENOVABLE FOTOVOLTAICA EN MÉXICO Y SU PROYECCIÓN AL 2020. (s.f.). gob.mx. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/58849/INSUMOS_DE_ENERG_A_RENOVABLE_FOTOVOLTAICA_Y_SU_PROYECCION_AL_2020_SEC.pdf

[22] Silva Sarasty, J. P. (2015). APLICATIVO PARA DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: PROGRAMACIÓN Y VALIDACIÓN CON SOFTWARE COMERCIAL [PROYECTO DE GRADO, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA FACULTAD DE INGENIERÍAS – INGENIERÍA ELÉCTRICA]. repositorio.utp.edu.co. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/7b98e0ec-f4b9-479b-87b8-4f336437bf4b/content>

[23] Ortiz, P. J. J. D. D. (2018). Propuesta de diseño del sistema solar fotovoltaico para el sistema eléctrico en el anexo de Tinco, distrito de Alis, provincia de Yauyos

y departamento de Lima 2017 [Tesis para optar el título profesional de ingeniero electricista, Universidad Continental]. repositorio.continental.edu.pe.

[24] Valdiviezo Salas, P. D. (2014). DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A 15 COMPUTADORAS PORTÁTILES EN LA PUCP [Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ]. tesis.pucp.edu.pe.

[25] . Bravo Damián, V. Y. (2016). “*DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA SATISFACER LA DEMANDA DE ENERGÍA DE LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO*” [PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA inédita]. Universidad nacional Pedro Ruiz Gallo.

[26] Jihad Ahmed, E. M. (2014). Cálculo y diseño de una instalación fotovoltaica, situada en el polígono Riu Clar de Tarragona [Tesis para ingeniería técnica industrial especialista en electricidad. inédita]. Universidad Rovira I Virgili.

[27] ¿Cómo poner e inclinar mis placas solares? Orientación en México. (s.f.). tarifasdeluz.mx. <https://tarifasdeluz.mx/autoconsumo/instalacion/inclinacion-paneles-solares>

[28] 9 tipos de estructura de paneles solares que debes conocer. (s.f.). Solarama Paneles solares México. <https://solarama.mx/blog/estructura-de-paneles-solares/>

[29] 7 Mejores marcas de paneles solares en México (energiasolarinc.com)

Anexos

JA SOLAR | **DEEP BLUE 3.0**

Version No. : Global-EN-20230530A

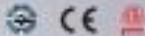
555W MBB **MR**
Series

- 
-  Higher output power
 -  Lower LCOE
 -  Less shading and lower relative loss
 -  Better mechanical loading tolerance
 -  12-year product warranty
 -  25-year linear power output warranty

Half-cell Module
JAM72S30 MR
530-555

Comprehensive Certificates

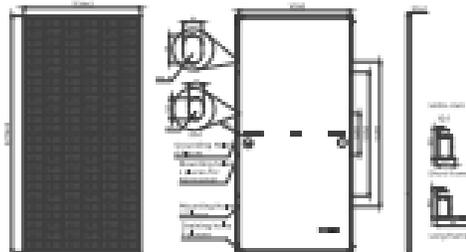
- IEC 61215, IEC 61730, UL 61010, UL 61730
- ISO 9001:2015 Quality management systems
- ISO 14001:2015 Environmental management systems
- ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems
- IEC 62341:2019 Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Quality system for PV module manufacturing





555W MBB

530-555 MR Series
3AM72530



Remarks: customized frame color and cable length available upon request.

Cell	Monocrystalline
Weight	20.8kg
Dimensions	2270±0.2mm×1134±0.2mm×30±0.1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (BC), 12 AWG (UL)
No. of cells	72 (6×12)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4/10-35V MC4-EVQ2A
Cable Length (including Connector)	Partially: 800mm(+)/1400mm(-) 800mm(+)/800mm(-) (Leapfrog) Landscape: 1000mm(+)/1000mm(-)
Packaging Configuration	30pcs/Pallet, 720pcs/40FT Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	3AM72530 -530/MR	3AM72530 -535/MR	3AM72530 -540/MR	3AM72530 -545/MR	3AM72530 -550/MR	3AM72530 -555/MR
Rated Maximum Power(P _{max}) [W]	530	535	540	545	550	555
Open-Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	49.39	49.45	49.60	49.75	49.90	50.02
Maximum Power Voltage(V _{mp}) [V]	41.31	41.47	41.64	41.80	41.96	42.10
Short-Circuit Current(I _{sc}) [A]	13.73	13.79	13.86	13.93	14.00	14.07
Maximum Power Current(I _{mp}) [A]	12.88	12.90	12.97	13.04	13.11	13.18
Module Efficiency (%)	20.3	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5
Power Tolerance	0~+3W					
Temperature Coefficient of I _{sc} (β _{Isc}) [K]	+0.043%/°C					
Temperature Coefficient of Voc (β _{Voc}) [K]	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of P _{max} (β _{Pmp}) [K]	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Remark: Technical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different models types.

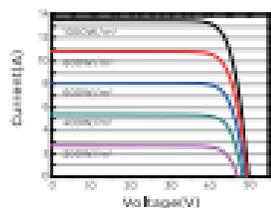
ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

TYPE	3AM72530 -530/MR	3AM72530 -535/MR	3AM72530 -540/MR	3AM72530 -545/MR	3AM72530 -550/MR	3AM72530 -555/MR
Rated Max Power(P _{max}) [W]	409	409	409	412	418	420
Open-Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	48.18	48.31	48.43	48.55	48.68	48.85
Max Power Voltage(V _{mp}) [V]	38.57	38.76	38.99	39.20	39.43	39.66
Short-Circuit Current(I _{sc}) [A]	11.01	11.05	11.09	11.13	11.17	11.21
Max Power Current(I _{mp}) [A]	10.39	10.43	10.47	10.51	10.55	10.59
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G					

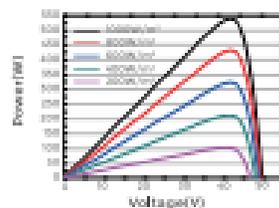
*For best cooler and better performance, maximum static load please take compatibility approval before between JA Solar and Manufacturer for reference.

CHARACTERISTICS

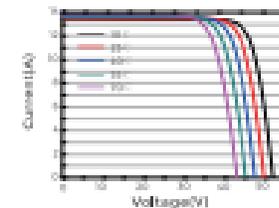
Current-Voltage Curve 3AM72530-540/MR



Power-Voltage Curve 3AM72530-540/MR

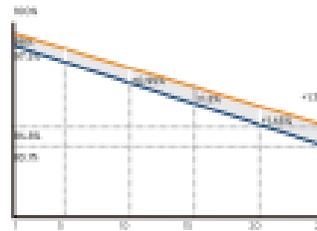


Current-Voltage Curve 3AM72530-540/MR



SUPERIOR WARRANTY

0.35% Annual Degradation Over 25 years



- New linear power warranty
- Standard module linear power warranty

OPERATING CONDITIONS

Maximum System Voltage	1000V/1500V DC
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse Rating	25A
Maximum Static Load(Front)	5400Pa(12.1lb/ft ²)
Maximum Static Load(Back)	3400Pa(7.5lb/ft ²)
NOCT	45±2°C
Safety Class	Class II
Fire Performance	UL Type 1

Hoja de datos	MIN 7000TL-X2	MIN 8000TL-X2	MIN 9000TL-X2	MIN 10000TL-X2
Datos de entrada (CD)				
Máxima potencia PV recomendada	12000W	12000W	12000W	16000W
Máximo voltaje CD			600V	
Voltaje de arranque			80V	
Voltaje nominal			360V	
Rango de voltaje de MPPT			60-550V	
Número de MPPTs			3	
Cadenas por MPPT			1/1/1	
Máxima corriente de salida por MPPT			18A/18A/18A	
Corriente máx. de cortocircuito por MPPT			20A/20A/20A	
Datos de salida (CA)				
Potencia nominal de CA	7000W	8000W	9000W	10000W
Potencia aparente máxima	7000VA	8000VA	9000VA	10000VA
Voltaje nominal CA (Rango*)			230V/140-380V	
Frecuencia de red CA (Rango*)			50/60Hz (54-66Hz/54-66Hz)	
Corriente máxima de salida	33.3A	38.3A	43A	45.5A
Factor de potencia ajustable			0.8 de adelanto... 0.8 de atraso	
Distorsión armónica total			<3%	
Tipo de conexión CA			Monofásico	
Eficiencia				
Máxima eficiencia			98.1%	
Eficiencia europea			97.5%	
Eficiencia de MPPT			99.5%	
Dispositivos de protección				
Protección de polaridad inversa CD			Si	
Interruptor CD			Si	
Protección contra sobretensión CD			Clase II	
Monitores de resistencia de aislamiento			Si	
Protección contra cortocircuitos en CA			Si	
Monitores de falla a tierra			Si	
Monitoreo de red			Si	
Protección anti-ida			Si	
Monitoreo de corriente residual			Si	
AFCI			Si	
Datos generales				
Dimensiones			425/383/180mm	
Peso			20kg	
Rango de temperatura de operación			-30 °C...+40 °C	
Autosuministro (noche)			4.1W	
Topología			Sin transformador	
Enfriamiento			Convección natural	
Grado de protección			IP64	
Humedad relativa			0-100%	
Altitud			4000m	
Conexión CD			Hi/MC(s)opcional	
Conexión CA			Conector	
Pantalla			OLED+LED	
Comunicación: RS485/USB/WiFi/GPRS/RF/LAN			Si/Si/Opc/Opc/Opc/Opc	
Garantía: 10 años / 15 años			Si/Opcional	

IEEE1547, UL1741, la norma G99, EN50464-1, UNE217001, UNE206207, PD12.3

* El rango de voltaje de CA puede variar en función de la norma de red de cada país.
* Todas las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.