GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO

TESCH
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES
CHICOLOAPAN

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLOAPAN

INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

Diseño y simulación de un sistema fotovoltaico residencial interconectado a la red mediante módulos bifaciales.

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Grado de Ingeniera en Energías Renovables

PRESENTA:

GUADALUPE JAZMIN NAVA FLORENCIO

JOSÉ EDUARDO GARCIA MARTINEZ

ASESOR INTERNO:

Dra. Elba Cinthya García Estrada

IER

Fecha:

Presentación y Directorio de Asesores.

El presente trabajo realizado bajo de la modalidad de Proyecto de investigación y/o desarrollo tecnológico, titulado “Diseño y simulación de un sistema fotovoltaico residencial interconectado a la red mediante módulos bifaciales” y que ha sido realizado por el alumno **José Eduardo García Martínez** y **Guadalupe Jazmin Nava Florencio** con matrícula **18020039** y **17020024** bajo la dirección del asesor interno: **Dra. Elba Cinthya García Estrada** ha sido aprobado al igual que aceptado como requisito para obtener el grado de **Licenciatura** en:

Ingeniero en Energías Renovables

Director:

Dra. Elba Cinthya García Estrada

Revisor

Dr. Daniel Hernández Rivera

Revisor

Dr. Michael Jossue Rojas García

I.- Agradecimientos

De José:

En esta etapa de culminación de mi residencia, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en este importante capítulo de mi formación profesional.

“A mi mamá y a mi papá que los quiero y los aprecio mucho”

En este día quiero expresar mi más sincero agradecimiento hacia ustedes, por todo lo que han hecho por mí, su orientación, valores y amor han moldeado mi vida de forma maravillosa, cada día al despertarme me doy cuenta de lo afortunado que soy por tenerlos como padres a mi madre por demostrarme que el coraje y valor que debo afrontar el día con día y a mi padre que me ha aportado su maravillosa sabiduría, gracias por apoyarme y estar ahí en los buenos y malos momentos.

“A mi abuelito”

A ese gran hombre que me encamino a lo que hoy en día soy, quiero tomarme un momento para expresarte cuanto te quiero y cuanto significas para mí, tu amor, sabiduría y cariño han sido una constante luz en mi vida. Gracias por enseñarme esas lecciones valiosas y ser mi modelo para seguir, donde sea que te encuentres te quiero mucho abuelito y siempre estaré agradecido contigo.

“a mi hermana y sobrino”
Quiero agradecerles a ustedes por todo el apoyo, que son una parte muy importante de mi vida y quiero decirles que siempre estaré como hermano y tío, contaran conmigo para lo que sea.

“Para mi personita especial”

Solo quiero decirte que te agradezco por estar conmigo en esta etapa tan importante, desde el momento en que nos conocimos hubo una enorme conexión, aunque la vida

es impredecible de ahora en adelante lo que nos depare espero que seas la mejor en lo que te propongas y espero que todas esas metas de las que me has hablado se hagan realidad y que siempre tendrás un lugar muy importante en mi corazón.

De Jazmín:

Agradezco en primer lugar a Dios, por permitirme avanzar en cada etapa y superar todos los desafíos que se me presentaron en los cinco años de carrera, yo se que, al concluir esta etapa de mi vida, el me abrirá las puertas a algo más grande.

También doy gracias a mi padre. Julio Nava Fernández por nunca dejar que me rindiera así las cosas se pusieran difíciles, nunca dejo que me callera así yo quisiera dejar todo mi avance a lo largo de estos cinco años. Siempre me motivo a seguir y pelear por obtener ese logro de concluir una etapa más que se suma a mi vida.

Doy también las gracias a mi madre Emma; Ella siempre me alentó a ser exitosa y no rendirme, siempre me inculco el no ser conformista y luchar por mí misma así estuviera sola en este camino que fue difícil, pero me enseñó a que puedo por mí misma lograr grandes cosas y no querer ser una más de esas personas que no luchan por sus sueños.

A estas dos personas importantes en mi vida les doy las gracias por su apoyo y esfuerzo, al ayudarme a concluir esta etapa importante de mi vida, sin ellos no hubiera logrado concluir esta etapa de mi vida.

II.-Resumen

El presente trabajo de investigación se centra en el diseño y la simulación de un sistema fotovoltaico residencial interconectado a la red eléctrica mediante módulos bifaciales, con el propósito de evaluar su viabilidad técnica y analizar su desempeño energético. Para ello, se desarrolló una metodología que incluyó el levantamiento del sitio de instalación, el análisis del consumo eléctrico, el dimensionamiento del sistema mediante cálculos eléctricos y energéticos, la selección de los equipos principales y la descripción del proceso de instalación. Asimismo, se abordaron los principales componentes que conforman una instalación fotovoltaica, como los módulos solares, el inversor, las estructuras de soporte, el sistema de cableado y los dispositivos de protección eléctrica, además de los esquemas tarifarios, la normativa vigente en México y los procedimientos requeridos para la interconexión con la red de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Para el análisis del recurso solar se utilizaron datos meteorológicos obtenidos mediante la plataforma NASA POWER, mientras que el comportamiento energético del sistema fue evaluado mediante simulaciones realizadas en el software PVsyst. Estas simulaciones permitieron estimar la generación anual de energía, las pérdidas del sistema y los principales indicadores de rendimiento, además de realizar una comparación entre un sistema bifacial y uno monofacial bajo las mismas condiciones de diseño y operación.

Finalmente, se concluye que los sistemas fotovoltaicos bifaciales constituyen una alternativa con un importante potencial para aplicaciones de generación distribuida; sin embargo, su rendimiento depende en gran medida de factores como la orientación, la inclinación, la altura de montaje, el tipo de superficie reflectante y el análisis de sombras. En consecuencia, un diseño adecuado resulta indispensable para maximizar sus beneficios y garantizar un mejor desempeño energético. Los resultados obtenidos aportan información técnica que puede servir como referencia para el diseño e implementación de futuras instalaciones fotovoltaicas residenciales interconectadas a la red eléctrica.

III.-Abstract

This research focuses on the design and simulation of a grid connected residential photovoltaic system using bifacial photovoltaic modules to evaluate its technical feasibility and analyze its energy performance. A comprehensive methodology was developed, including site assessment, electrical load analysis, system sizing through electrical and energy calculations, selection of the main system components, and a description of the installation process. In addition, the study examines the essential components of a photovoltaic installation, such as solar modules, the inverter, mounting structures, wiring systems, and electrical protection devices, as well as the applicable tariff schemes, current Mexican regulations, and the procedures required for interconnection with the grid operated by the Federal Electricity Commission (CFE).

Solar resource assessment was performed using meteorological data obtained from the NASA POWER platform, while the system's energy performance was evaluated through simulations carried out with PVsyst software. The simulations enabled the estimation of annual energy production, system losses, and key performance indicators, as well as a comparative analysis between bifacial and monofacial photovoltaic systems under identical design and operating conditions.

It is concluded that bifacial photovoltaic systems represent a promising alternative for distributed generation applications. However, their performance depends significantly on factors such as module orientation, tilt angle, mounting height, ground reflectivity, and shading conditions. Therefore, an appropriate system design is essential to maximize their advantages and achieve optimal energy performance. The findings of this research provide technical information that may serve as a reference for the design and implementation of future grid connected residential photovoltaic systems.

Índice

Presentación y Directorio de Asesores..... 2
II.-Resumen 5
III.-Abstract..... 6
1.-Introducción..... 10
2.-Antecedentes. 12
2.1.-Antecedentes de los sistemas fotovoltaicos en México..... 12
2.2.- Proyectos fotovoltaicos Bifaciales en la actualidad..... 14
3.-Marco teórico..... 15
3.1.-La Radiación Solar. 16
3.1.2.-Irradiancia e irradiación..... 17
3.1.3.-Módulos fotovoltaicos..... 18
3.1.4.-Módulos Fotovoltaicos Mono faciales: El Estándar de la Industria. 18
3.1.5.- Composición de los Sistemas Monofaciales..... 18
3.2.- La Revolución Bifacial: Fundamentos y Ganancia de Energía. 20
3.3.-Módulo de silicio monocristalino. 22
3.4.-Módulo de silicio policristalino..... 22
3.4.1.-Módulos de capa fina. 23
4.-Planteamiento del problema..... 24
5.-Hipótesis..... 25
6.-Objetivos..... 27
6.1.-Objetivo general. 27
6.2.-Objetivos específicos. 27
7.-Metodología..... 28
7.1.- Metodología de Instalación de Sistemas Fotovoltaicos..... 28
7.2.- Levantamiento del sitio y dimensionamiento..... 29
7.3.-Selección de equipos y cálculos para el dimensionamiento de nuestro sistema. 32
7.4.-Obtencion de las Horas Pico Solar..... 33
7.4.1.-Acceso a la plataforma de datos solares..... 33

7.4.2.-Selección de la ubicación geográfica..... 34
7.4.3.-Selección de los parámetros de radiación solar..... 34
7.4.4.-Selección del periodo de análisis..... 34
7.4.5.-Descarga de los datos de radiación solar..... 35
7.4.6.-Cálculo de las Horas Pico Solar..... 35
7.4.7.-Interpretación de los resultados..... 36
7.5.-Procedimiento para el cálculo del dimensionamiento eléctrico..... 36
7.5.1.- Cálculos para obtener el consumo diario..... 37
7.5.2.- Selección de modulo fotovoltaico para la obtención de numero de paneles teóricos..... 37
7.5.3.-Corrección de voltaje por temperatura..... 39
7.6.-Selección del inversor..... 40
7.6.1.-Potencia mínima del inversor..... 42
15.1.2.-Protección termomagnética de lado de AC..... 42
7.6.2.-Cableado..... 43
7.6.3.-Cálculos para obtención del calibre para corriente alterna..... 43
7.7.- Fase de Instalación y Puesta en Marcha..... 44
7.8.-Trámites Finales y Entrega..... 45
7.9.-Comparación de Paneles Fotovoltaicos Mono faciales y Bifaciales..... 45
7.9.1.- Paneles Monofaciales..... 46
7.9.2.- Paneles Bifaciales..... 46
7.9.3.-Consideraciones Técnicas y de Diseño para Paneles Bifaciales..... 48
7.10.-Inversores..... 48
7.11.- Tipos de estructuras en sistemas fotovoltaicos existentes..... 51
7.11.2.-Estructuras fijas..... 51
7.11.3.- Estructuras móviles o seguidores solares..... 52
7.12.-Localización y Caracterización del Sitio de Estudio..... 54
7.12.3.-Obtención de Datos Meteorológicos..... 54
7.13.-Albedo del Suelo..... 55
7.14.- Orientación y ubicación..... 57

7.15.- Inclinación. 58
7.16.- Importancia del cableado en sistemas fotovoltaicos. 59
7.17.- Interruptores Termomagnéticos. 60
7.18.-Interruptores Termomagnéticos en Sistemas Fotovoltaicos. 61
7.18.1.-Factor de corto circuito de seguridad 62
7.19.-Tipos de gabinetes o tableros de distribución eléctrica en instalaciones fotovoltaicas. 63
7.19.1.- Tablero de corriente directa o caja combinadora. 63
7.19.2.-Gabinete de desconexión del sistema fotovoltaico. 64
7.19.3.-Tablero de distribución en corriente alterna (AC Distribution Board). 65
7.19.4.- Gabinete de medición y monitoreo del sistema fotovoltaico. 66
7.20.-Instalaciones fotovoltaicas interconectadas a red. 67
7.20.1.- Instalaciones fotovoltaicas aisladas o autónomas. 67
7.20.2.-Instalaciones fotovoltaicas hibridas o mixta (interconectadas a la red con banco de baterías). 68
7.21.-Tarifas de CFE. 69
7.21.1.-Tarifas PDBT. 71
Tarifa DAC 71
7.22.- Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX). 72
7.22.1.-Marco de Interconexión y Generación Distribuida 73
7.22.1.-Medidas de seguridad basadas en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM 74
Norma NOM-009-STPS-2011 74
7.23.-Simulación por PVsyst. 77
8.- Resultados y Discuciones. 85
8.1.-Resultados de la simulación del sistema bifacial. 85
8.2.-Comparación entre sistema monofacial y bifacial. 88
8.3.-Discusión de resultados 90
9.-Conclusiones. 92
10.- BIBLIOGRAFIAS. 94

11.-Anexos..... 96

1.-Introducción.

La necesidad de producir energía eléctrica sin crear más impacto ambiental ha llevado a buscar alternativas que no generan efecto invernadero y gases contaminantes al planeta, nos ha orillado a desarrollar diferentes medios tecnológicos que tienen como propósito aprovechar los recursos naturales, por medio de las energías renovables. Se destaca por su capacidad de adaptabilidad en diversos entornos y condiciones. En este contexto, los módulos solares bifaciales han emergido como una alternativa innovadora frente a los tradicionales sistemas monofaciales, al aprovechar la radiación solar no solo en su cara frontal, sino también en su cara posterior, lo que permite un aumento significativo en la generación de energía bajo condiciones óptimas. Esta tesis se enfoca en el diseño, análisis, y optimización de instalaciones fotovoltaicas bifaciales.

El diseño y la optimización de estos sistemas bifaciales presentan retos particulares, especialmente en lo que respecta a la inclinación óptima de los paneles solares, la cual varía según la latitud y las características del terreno. Una correcta selección del ángulo de inclinación puede maximizar la captación de radiación difusa y reflejada, aumentando así la eficiencia general del sistema. Asimismo, el diseño del sistema de montaje adquiere especial relevancia, ya que debe facilitar una adecuada exposición de la cara trasera del módulo a la luz reflejada, lo que implica considerar factores como la altura del sistema, el tipo de suelo y la distancia entre filas e hileras. La comparación directa entre sistemas monofaciales y bifaciales en las mismas configuraciones permite identificar cuál de los sistemas presentan mejor rendimiento optimo. El uso de herramientas de modelado y simulación como PVsyst es esencial para estimar con precisión el comportamiento energético de estas instalaciones. Estos programas permiten analizar variables clave como el albedo del terreno, la geometría del sistema y las condiciones climáticas locales, generando proyecciones fiables del desempeño anual. La simulación del albedo y su impacto en la generación bifacial es especialmente crítica, ya que incluso pequeñas variaciones en la reflectancia del terreno pueden traducirse en diferencias significativas en la producción energética

total. En consecuencia, el modelado detallado permite no solo optimizar el diseño, sino también evaluar su viabilidad técnica antes de la implementación.

Esta tesis busca abordar el estudio de las instalaciones fotovoltaicas bifaciales, proponiendo estrategias de diseño óptimas, evaluando su desempeño mediante simulación.

2.-Antecedentes.

2.1.-Antecedentes de los sistemas fotovoltaicos en México.

La energía solar fotovoltaica ha cobrado relevancia en México como una alternativa sustentable frente a la creciente demanda energética y los desafíos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles. Cuando comenzaron a implementarse proyectos experimentales principalmente en zonas rurales y aisladas. Estos sistemas fueron utilizados para aplicaciones básicas como la iluminación, el bombeo de agua y las telecomunicaciones respondían tanto a la necesidad de electrificación rural como al interés creciente en fuentes de energía renovable a raíz de la crisis petrolera de esa época.

Durante las décadas de 1980 y 1990, el desarrollo de la energía solar en México estuvo impulsado por instituciones académicas y de investigación, como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL). En este periodo también comenzaron a surgir programas gubernamentales enfocados en la electrificación rural, en colaboración con organismos internacionales como el Banco Mundial y la Cooperación Alemana (GIZ). No obstante, el marco legal aún era limitado y no permitía una integración amplia de la energía solar en la red eléctrica nacional. [1]

A partir de la década de 2010, la energía fotovoltaica comenzó a ganar terreno en el ámbito residencial, comercial e industrial, impulsada por varios factores: la reducción en los costos de los paneles solares, el desarrollo tecnológico y la aprobación de la reforma energética en 2013-2014. Esta reforma transformó el modelo eléctrico del país al permitir la participación de empresas privadas y al fomentar esquemas de generación distribuida y energías limpias. Uno de los instrumentos clave en esta etapa fue la adopción del esquema de Medición Neta, que facilitó la interconexión de sistemas fotovoltaicos con la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE)

En años recientes, México ha experimentado un crecimiento significativo en la capacidad instalada de sistemas solares, tanto a pequeña escala como en grandes centrales solares. Destacan proyectos como la Planta Solar Villanueva, en el estado de Coahuila, una de las más grandes de América Latina [5]. Paralelamente, el sector residencial ha visto una rápida adopción de tecnologías fotovoltaicas gracias a esquemas de financiamiento, arrendamiento solar y programas de apoyo como los impulsados por el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) e Infonavit

Sin embargo, el desarrollo del sector fotovoltaico también ha enfrentado desafíos, particularmente a partir de 2020, cuando el gobierno federal adoptó una política energética más centralizada que prioriza a la CFE. Esto ha generado incertidumbre regulatoria para los inversionistas del sector privado, aunque la generación distribuida continúa creciendo de manera constante y representa una alternativa viable para los consumidores que buscan autonomía energética y reducción de costos. [2]

2.2.- Proyectos fotovoltaicos Bifaciales en la actualidad.

En la actualidad se han creado varios proyectos donde se busca mostrar la eficiencia de los paneles bifaciales, algunos proyectos buscan hacer comparación con los sistemas monofaciales, para comprobar si su eficiencia ente los bifaciales es igual o menor. Se han desarrollado diferentes metodologías y herramientas computacionales para el diseño, dimensionamiento y evaluación del desempeño de sistemas fotovoltaicos. Estas metodologías incorporan modelos matemáticos, bases de datos climáticas y algoritmos de simulación que permiten reducir la incertidumbre en las estimaciones de generación energética, optimizar el diseño de las instalaciones y mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Los proyectos donde se incorporaron estas variables que se mencionaron anteriormente y hacen comparación de ambos sistemas donde muestran y respaldan que los paneles bifaciales tienen mejor eficiencia, teniendo en cuenta ciertas características y modelización. Estos dos proyectos son: Proyecto de planta fotovoltaica con paneles bifaciales del autor Alejandro Torrubia Bercebal. [1]

El segundo es Modelización y estudio de sistemas fotovoltaicos del autor Eladio Francisco Andrea [2]. Ambos son proyectos que muestran que los paneles bifaciales ya sea para una planta fotovoltaica o para la instalación domestica tienen buen rendimiento tomando en cuenta el albedo y la posición, uno nos habla de una instalación modelada en el programa PVsyst para una instalación en una planta fotovoltaica donde se hizo un análisis de eficiencia y se llegó a la conclusión que dependiendo del albedo y posición la eficiencia de producción de energía eléctrica es solamente, y en el segundo se propuso variables y se modelaron en varios sistemas de simulación y programación como PVsyst y Python entre otros, para obtener mejores resultados en la instalación de paneles bifaciales, donde se hizo una comparativa con los monofaciales y se ajustaron las variables para llegar a un resultado favorable.

3.-Marco teórico.

Para conocer los sistemas bifaciales con detalle y su funcionamiento, es importante conocer el estado del arte que componen, para comprender su funcionamiento, los parámetros a continuación son genéricos para cualquier tipo de instalación fotovoltaica, aplicado para todas las tecnologías de paneles bifaciales.

3.1.-La Radiación Solar.

La radiación solar es la energía emitida por el Sol en forma de ondas electromagnéticas. Esta abarca un amplio espectro que va desde las ondas de longitud corta y alta energía, como los rayos gamma, hasta las ondas de longitud larga y baja energía, como las ondas de radio. En el rango intermedio se encuentran los rayos X, la luz visible y la radiación infrarroja (calor), que son las más relevantes para los procesos energéticos en la Tierra. EL Sol libera diversas formas de energía, pero aproximadamente el 40% de la radiación que alcanza la superficie terrestre corresponde a luz visible e infrarroja, las cuales son fundamentales para la generación fotovoltaica y el equilibrio térmico del planeta.

Según la forma en que los rayos solares inciden sobre la superficie terrestre, se distinguen tres tipos de radiación solar:

Directa: es la que se recibe desde el sol sin que se desvié en su paso por la atmosfera.

Difusa: es la que sufre cambios en su dirección principalmente debido a la reflexión y la difusión de la atmosfera.

Albedo o reflejada: es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

Dentro de los tres tipos de radiación la directa es la mayor y la más importante en las aplicaciones fotovoltaicas. Aunque en días nublosos, (cuestiones meteorológicas) en las cuales no se recibe la radiación directa “también puede ver obstáculos o sombras” se continúa recibiendo radiación solar sobre la superficie debido a la radiación difusa. A dichos días se les denomina días de baja radiación. [3]



Imagen 1.- Tipos de Radiación.

3.1.2.-Irradiancia e irradiación.

La irradiancia se define como la potencia radiante incidente sobre una superficie por unidad de área, expresada en W/m². Es una magnitud instantánea que describe la cantidad de energía solar que llega en un momento determinado. Por ejemplo, una irradiancia de 1000 W/m² significa que cada metro cuadrado de superficie recibe esa potencia en ese instante.

Por otro lado, la irradiación corresponde a la energía radiante acumulada sobre una superficie durante un intervalo de tiempo, medida en J/m² o más comúnmente en Wh/m². Se obtiene al integrar la irradiancia a lo largo del tiempo, por lo que refleja la energía total recibida en un día, una hora o cualquier periodo de análisis.

La diferencia fundamental entre ambos conceptos radica en que la irradiancia es una magnitud instantánea, mientras que la irradiación es una magnitud integrada en el tiempo, lo cual resulta esencial para el dimensionamiento y evaluación de sistemas fotovoltaicos.

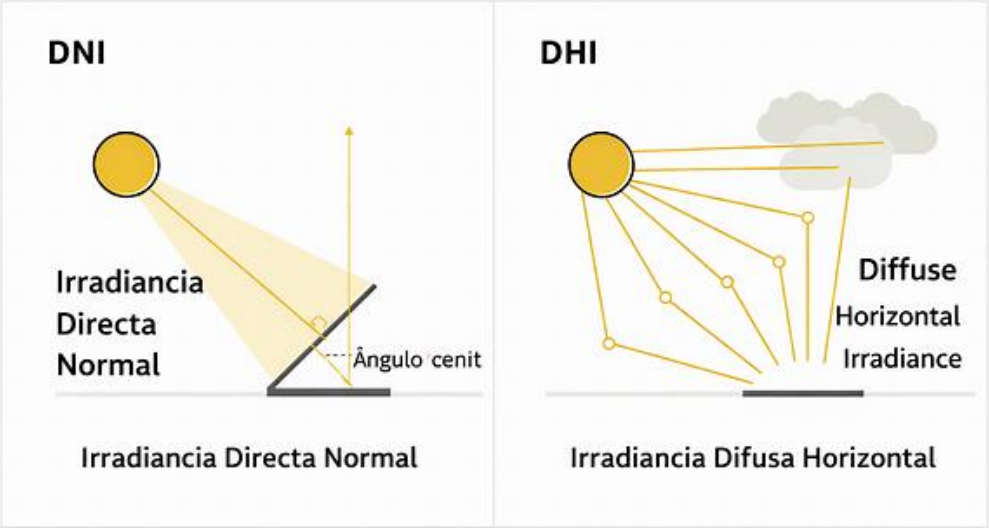


Imagen 2.- Irradiancia y radiación.

La captación de la radiación depende del tipo de semiconductores que se usen. El siguiente aspecto para tratar, es conocer cada uno de estos componentes y su funcionamiento para la captación de radiación a través de un sistema fotovoltaico. [4]

3.1.3.-Módulos fotovoltaicos.

3.1.4.-Módulos Fotovoltaicos Mono faciales: El Estándar de la Industria.

Los paneles monofaciales han sido la columna vertebral de la industria solar durante años. Su funcionamiento se basa en la captación de la radiación solar directa y difusa que incide en su cara frontal, donde se encuentran las celdas fotovoltaicas de silicio. Están compuestos por una lámina de vidrio frontal, las celdas y una lámina posterior opaca (generalmente de un material polimérico como el *tedlar*) que protege el circuito y aísla el panel del entorno

3.1.5.- Composición de los Sistemas Monofaciales.

- Lámina de vidrio exterior: mide aproximadamente 3 mm, proporciona protección a células de ciertos factores externos.
- Material encapsulante: Este material es el encargado de aislar las células que interactúan de manera eléctrica entren si, normalmente a este material se

denomina o nombra EVA (Etileno-Vinil-Acetato) se trata de un material aislante que evita la perdida de la radiación y protector de factores externos como la humedad.

- Células: que van conectadas entre sí formando un circuito eléctrico, se hacen cargo de hacer el efecto fotovoltaico generando electricidad.
- Protección posterior: este material proporciona rigidez y protección al igual que la lámina de vidrio protege frente a factores externos los principalmente fabricados con el tedlar (es un polímero de fluoruro de polivinilo) en el caso de lo monofaciales.
- Marco metálico: principalmente de aluminio anodizado o de acero inoxidable, tiene como función evitar el traspaso de corriente eléctrica además de la protección de factores exteriores como fuertes viento.
- Caja de conexiones: se encuentra ubicada en la parte posterior de los módulos donde se encuentran los bornes terminales para las conexiones del módulo.

A pesar de su madurez tecnológica y su menor costo de producción inicial. Los módulos monofaciales presentan limitaciones en su rendimiento, ya que no aprovechan la radiación reflejada desde el suelo o superficies circundantes. Esto significa que la energía producida depende exclusivamente de la irradiancia frontal, lo que puede limitar la eficiencia en instalaciones con altos índices de albedo (la reflectividad del suelo). [5]

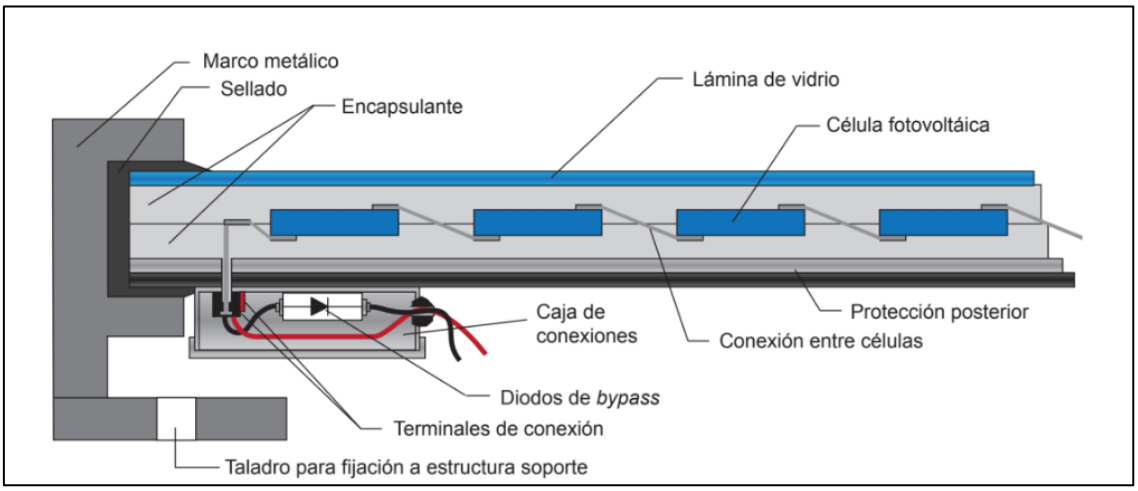


Imagen 3.- Ejemplo de elementos que conforman un panel fotovoltaico mono facial

3.2.- La Revolución Bifacial: Fundamentos y Ganancia de Energía.

Los módulos fotovoltaicos bifaciales representan un avance significativo al permitir la captación de energía por ambas caras del panel. Su diseño incluye celdas fotovoltaicas que son activas tanto en la superficie frontal como en la trasera, con una lámina posterior de vidrio templado o una cubierta transparente en lugar del material opaco de los paneles monofaciales. Esta característica les permite aprovechar tres componentes de la radiación solar: la directa, la difusa y de manera crucial, la reflejada de la superficie del suelo (albedo).

La ganancia de energía adicional de la cara trasera puede variar significativamente, con estudios que reportan un aumento en la producción de entre un 5% y un 30% en comparación con los paneles monofaciales, dependiendo de las condiciones de instalación. Factores como la altura de montaje, la inclinación, la separación entre filas y el albedo del suelo son determinantes en el rendimiento de un sistema bifacial. Un albedo alto, como el de la arena, la nieve o las cubiertas de hormigón claro, puede maximizar la ganancia energética.



Imagen 4.- Ejemplo de módulos fotovoltaicos bifacial.

Los paneles monofaciales solo aprovechan la radiación directa y difusa que llega a su cara frontal. En cambio, los paneles bifaciales están diseñados con una capa trasera de vidrio templado o un material transparente que permite que la radiación reflejada sea captada por las celdas fotovoltaicas en su parte posterior

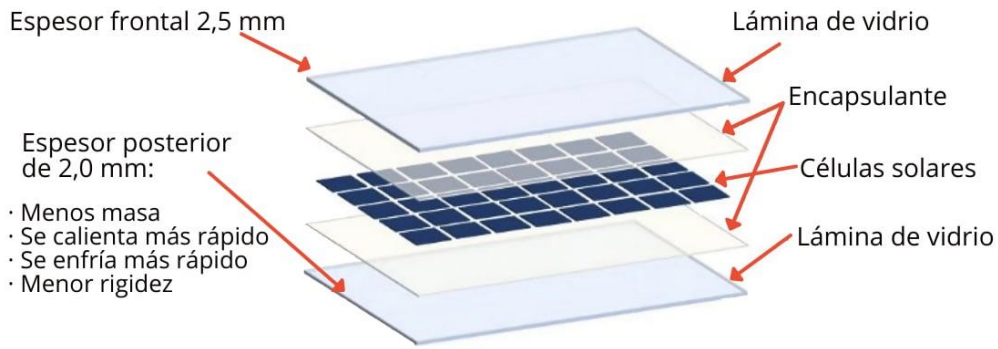


Imagen 5.- Ejemplo de elementos que conforman un panel fotovoltaico bifacial

Uno de sus nuevos avances tecnológicos de este tipo de sistemas son el uso de células solares de perovskita a la cabeza. Este tipo de células se están integrando en estos sistemas para aumentar más su eficiencia, este tipo de células solares, son conocidos por su excelente absorción de luz y facilidad de fabricación. Sin embargo, este tipo de material que se busca implementar próximamente aún sigue en investigación para hallar como combinarlos con la tecnología bifacial, para la mayor captación de luz solar. [6]

3.3.-Módulo de silicio monocristalino.

Su eficiencia es una de las más altas del mercado, de 15% a 18% además tienen una gran durabilidad y sus propiedades se deterioran poco con el paso del tiempo, como ejemplo algunos fabricantes ofrecen 20 años de garantía con la máxima del 15% de perdida de eficiencia respecto al valor nominal. [3]

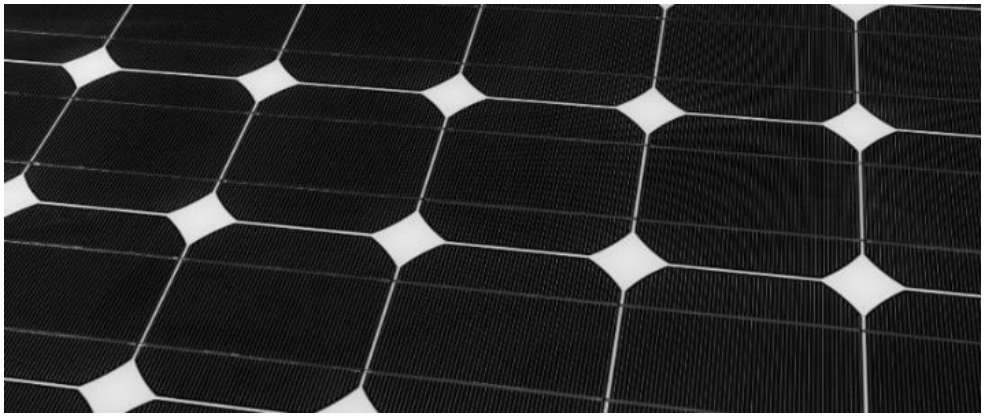


Imagen 6.- Módulo de silicio monocristalino.

3.4.-Módulo de silicio policristalino.

Su eficiencia es menor que la de los módulos encontrándose entre un 13% y 15%, sin embargo, su eficiencia es un 10% inferior. Es notable su durabilidad y rendimiento. que mantiene con los años, es similar a los módulos de silicio monocristalinos. En su superficie pueden identificarse granos cristalinos de diferente tamaño y forma. [3]



Imagen 7.- Módulo de silicio policristalino.

3.4.1.-Módulos de capa fina.

Estos módulos se fabrican añadiendo un material semiconductor sobre otro elemento que funciona como soporte físico. En este caso el ahorro de material es considerable, ya que se usa en menos cantidad, y además tiene la ventaja de que son flexibles, diseño ligero y color oscuro uniforme. Los paneles solares de capa fina se pueden aplicar para techos ligeros, fachadas y dispositivos portátiles. [3]

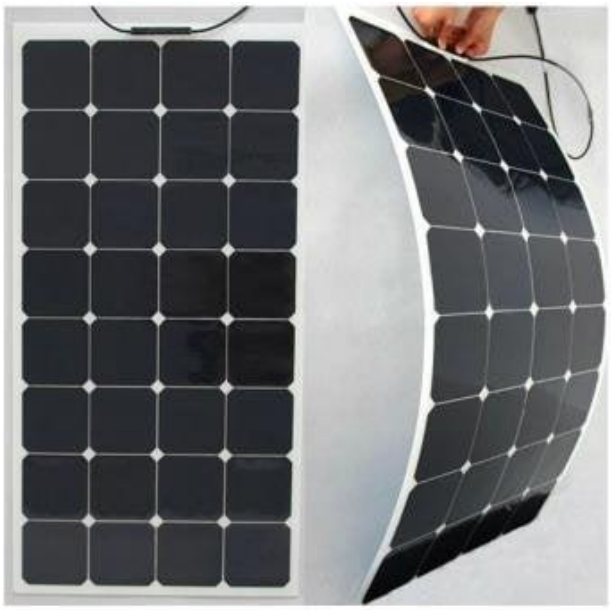


Imagen 8.- Módulo de capa fina.

4.-Planteamiento del problema.

En la actualidad, los avances tecnológicos en el sector energético y el creciente interés por el aprovechamiento de fuentes de energía renovable han impulsado el desarrollo y la implementación de nuevas alternativas para la generación de energía eléctrica. Los paneles solares bifaciales representan una innovación significativa al permitir la captación de radiación solar tanto en su cara frontal como posterior, incrementando potencialmente la generación energética respecto a los módulos convencionales.

Sin embargo, a pesar del avance tecnológico, existe una limitada información técnica aplicada sobre el desempeño real de los sistemas bifaciales interconectados a la red bajo condiciones específicas de instalación, tales como el tipo de superficie reflectante, altura de montaje, inclinación y condiciones climáticas locales. La mayoría de los estudios disponibles se centran en módulos monofaciales, dejando un vacío en cuanto a criterios de diseño, dimensionamiento y análisis de impacto en la red eléctrica para sistemas bifaciales.

Sin embargo, la incorporación de estas tecnologías en sistemas fotovoltaicos residenciales requiere un análisis adecuado de las condiciones de instalación, el recurso solar disponible, el consumo energético, el dimensionamiento de los equipos y el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones climáticas. La falta de un análisis técnico y energético previo puede generar un dimensionamiento inadecuado, afectando el rendimiento del sistema y la cantidad de energía eléctrica que puede producir durante su vida útil. Por lo tanto, surge la necesidad de analizar, evaluar el desempeño técnico y energético de las instalaciones de paneles bifaciales interconectadas a la red, con el fin de establecer criterios de diseño que optimicen su funcionamiento y contribuyan al desarrollo eficiente de sistemas fotovoltaicos.

5.-Hipótesis.

La implementación de un sistema fotovoltaico bifacial interconectado a la red eléctrica, diseñado y analizando su funcionamiento a través de herramientas de simulación como lo es el programa PVsyst, permitirá obtener una mayor observación de su generación anual de energía eléctrica en comparación con un sistema fotovoltaico monofacial de características técnicas similares, instalado bajo las mismas condiciones ambientales y de configuración eléctrica.

Sin embargo, al considerar el proceso completo de instalación interconectada a la red que incluye la selección del sitio, orientación e inclinación de los módulos, configuración eléctrica del sistema, selección de inversores, análisis de sombras, así como la consideración del albedo del terreno. Así mismo al considerar cada uno de los pasos a seguir para su correcta instalación, los módulos bifaciales presentarán un aprovechamiento energético superior debido a su capacidad de captar radiación solar tanto por la cara frontal como por la posterior.

A través de la simulación del sistema bifacial en el software PVsyst, se espera obtener datos confiables de generación energética anual, pérdidas del sistema, factores de desempeño y producción específica, los cuales servirán como base para el análisis comparativo. De igual forma, se realizará la simulación de un sistema fotovoltaico monofacial con la misma potencia instalada, tipo de inversor, ubicación geográfica y condiciones climáticas, garantizando así la validez del estudio comparativo

Por lo consiguiente, la hipótesis de este tema de investigación sostiene que los resultados obtenidos de la plataforma de simulación reflejarán un incremento porcentual significativo en la generación anual del sistema bifacial frente al sistema monofacial, atribuible principalmente a la contribución energética de la radiación reflejada en la cara posterior de los módulos bifaciales.

Así mismo, se espera que las diferencias observadas en los resultados obtenidos del programa PVsyst permitan evaluar la consistencia y precisión de dichas herramientas en la modelación de tecnologías bifaciales.

En consecuencia, se plantea que el uso de sistemas fotovoltaicos bifaciales interconectados a la red representa una alternativa técnicamente viable y energéticamente más eficiente que los sistemas monofaciales convencionales, especialmente en aplicaciones donde las condiciones del entorno favorecen la reflexión solar, todo dependiendo de la zona donde se hará su ubicación. Esta investigación permitirá sustentar, mediante simulación y análisis comparativo, cuál de los dos modelos de paneles representa una opción óptima para proyectos fotovoltaicos interconectados a la red.

6.-Objetivos.

6.1.-Objetivo general.

Desarrollar una propuesta para una instalación fotovoltaica mediante diseño y simulación de un sistema fotovoltaicos bifacial y comparar el rendimiento del sistema con el fin de obtener resultados y evaluar la viabilidad técnica de una instalación fotovoltaica interconectada a la red en una ubicación específica de México.

6.2.-Objetivos específicos.

1. Investigar tipos de sistemas fotovoltaica monofacial y bifacial, incluyendo sus principios de funcionamiento, ventajas, desventajas y el marco regulatorio para la interconexión a la red en México.

2. Recopilar datos: Obtener y analizar datos meteorológicos y geográficos detallados de la ubicación de estudio, prestando especial atención a la radiación solar y el albedo del suelo.

3. Modelar el sistema: Utilizar un software de simulación especializado (PVsyst) para crear un modelo digital de la instalación fotovoltaica bifacial, ajustando variables clave como la altura, el ángulo de inclinación y la separación entre los paneles.

4. Analizar el rendimiento: Se analizará el rendimiento de los paneles bifaciales instalados, donde se observará su eficiencia energética, de los modelos monofaciales y bifaciales en el transcurso de un año para poder observar cuál de los dos tiene mejores resultados en una instalación interconectada a la red en residencia.

7.-Metodología.

7.1.- Metodología de Instalación de Sistemas Fotovoltaicos.

La presente metodología describe los procesos y procedimientos rigurosos seguidos para el diseño e instalación de sistemas fotovoltaicos, ya sean interconectados a la red eléctrica. El proceso se divide en cuatro fases secuenciales: levantamiento recaudación de datos, diseño, simulación y trámites finales.

Esta fase inicial es crucial, ya que se recolecta la información técnica y de consumo necesaria para un diseño preciso y la viabilidad del proyecto.

Se realiza una visita técnica para evaluar las condiciones físicas de la ubicación. Esta inspección incluye:

- **Análisis del recurso solar**: Se evalúa la orientación y la inclinación óptimas para los paneles, y se utilizan herramientas como la brújula para determinar el azimut y el ángulo de inclinación.
- **Inspección de sombreado**: Se identifican y documentan posibles obstáculos (árboles, edificios, etc.) que puedan generar sombras en cualquier momento del día o del año, ya que una sombra parcial puede reducir drásticamente la producción del sistema.
- **Revisión eléctrica y de infraestructura**: Se miden los voltajes en el tablero de distribución principal y se inspecciona el estado de la mufa y el medidor para asegurar que cumplen con las normativas de CFE, evitando contratiempos futuros.

Se analiza el recibo de luz del cliente para entender su patrón de consumo y dimensionar el sistema de manera precisa. Se identifican el esquema tarifario y el consumo histórico de al menos el último año. Con esta información, se calcula el consumo promedio y el objetivo de producción anual en kWh.

7.2.- Levantamiento del sitio y dimensionamiento.

En la primera etapa del desarrollo del proyecto se llevó a cabo el proceso de dimensionamiento del sistema fotovoltaico, cuyo objetivo fue determinar la viabilidad

espacial y técnica para la instalación de módulos fotovoltaicos bifaciales en el área de estudio. Para ello, se realizó inicialmente un levantamiento del sitio con el fin de identificar las dimensiones reales del espacio disponible, así como los elementos estructurales presentes que pudieran influir en la ubicación de los módulos.

Se comienza con la descripción y el conocimiento de área donde se pretende realizar la instalación en este caso nos encontramos en la NOTARIA 28 Av. Sor Juana Inés de La Cruz 411, Evolución, 57700 Cdad. Nezahualcóyotl, Méx.

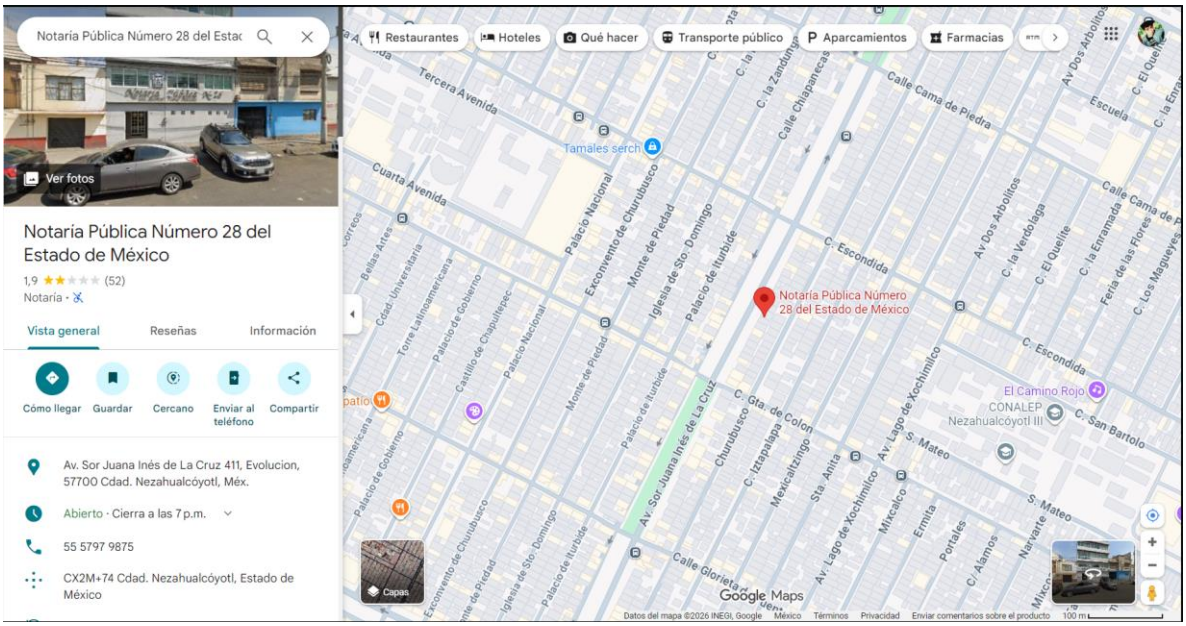


Imagen 9. Imagen ilustrativa del mapa del sitio atravez de google maps

Sus coordenadas geográficas son:

- Latitud: 19°24'02"N
- Longitud: 99°01'01"W

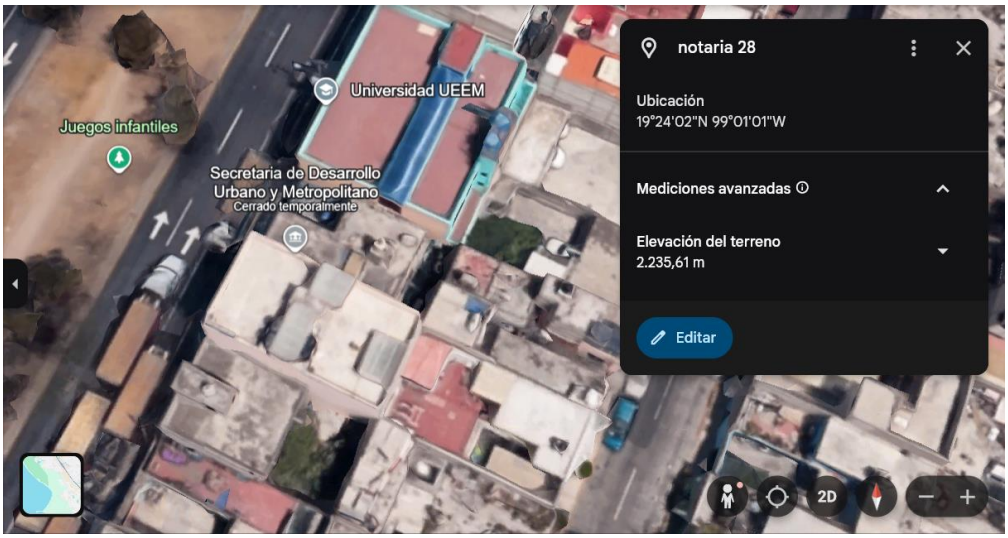


Imagen 10.- *Ubicación del sitio, fuente Google earth.*

Con la información obtenida se elaboró un plano técnico mediante el software AutoCAD, herramienta ampliamente utilizada en el diseño asistido por computadora para la representación precisa de planos arquitectónicos y de ingeniería. En este plano se definieron las dimensiones del área disponible para la instalación, permitiendo identificar las zonas potencialmente aprovechables para el montaje del sistema fotovoltaico

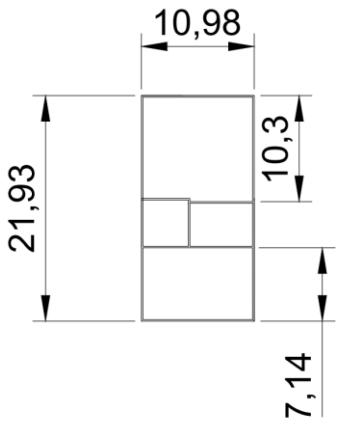


Imagen 11.- Dimensionamiento del área de trabajo, generado en AutoCAD

Posteriormente, con el objetivo de obtener una visualización más detallada del sistema propuesto, se desarrolló un modelo tridimensional del área de instalación mediante el software SketchUp. Este modelo permitió generar un renderizado que facilitó la

interpretación espacial del proyecto y permitió analizar de forma más precisa la disposición de los módulos dentro del área disponible.

El modelo tridimensional permitió evaluar diferentes configuraciones de instalación considerando factores como la orientación de los módulos, la inclinación óptima en la cual serán 21° y la separación entre filas. De igual forma, se pudieron identificar de manera visual los posibles efectos de sombreado generados por estructuras cercanas, lo cual resulta fundamental en el diseño de sistemas fotovoltaicos, ya que las sombras pueden provocar pérdidas significativas en la generación de energía.

Uno de los aspectos más relevantes observados durante el proceso de modelado fue la existencia de una estructura elevada dentro del área de estudio. Esta característica permitió proponer una configuración de montaje que aprovecha dicha altura para optimizar el desempeño de los módulos bifaciales. A diferencia de los módulos fotovoltaicos convencionales monofaciales, su rendimiento puede incrementarse cuando se instalan a una mayor altura respecto a la superficie del suelo.

El aumento de la altura de instalación favorece la captación de radiación solar reflejada, fenómeno conocido como albedo, el cual consiste en la reflexión de la radiación solar en superficies como concreto, grava, arena o pintura clara. Esta radiación reflejada puede incidir en la parte posterior del módulo bifacial, contribuyendo a incrementar la producción de energía del sistema.

A través del análisis realizado en el modelo tridimensional se determinó que la instalación de los módulos sobre una estructura elevada permite una mayor exposición de la cara posterior a la radiación reflejada, lo cual mejora el aprovechamiento energético del sistema.

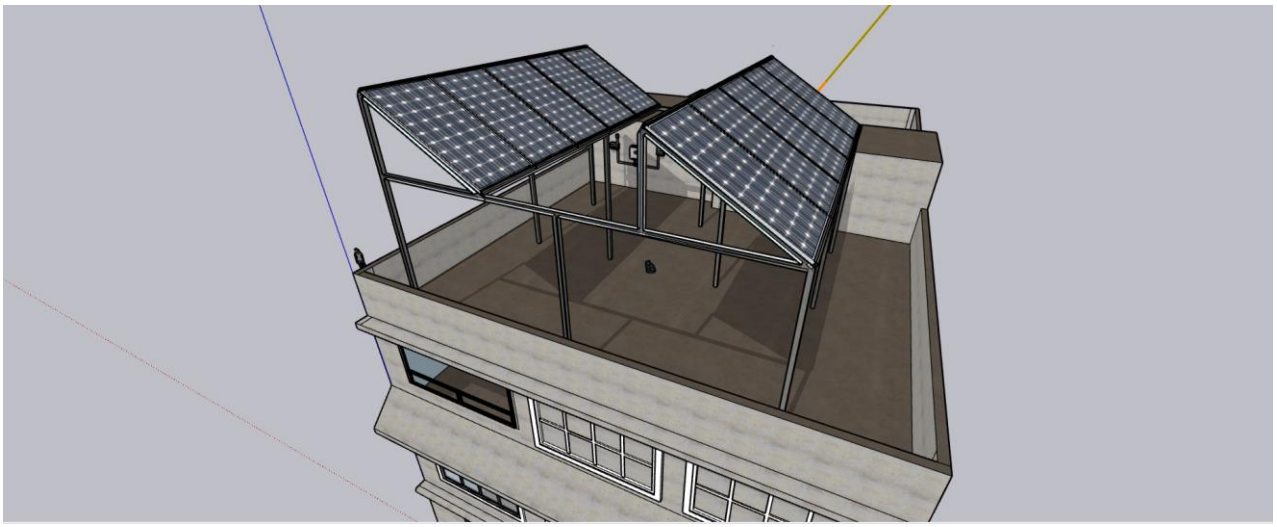


Imagen 12.- Representación de estructura elevada para instalación de módulos imagen generada en SketchUp.

7.3.-Selección de equipos y cálculos para el dimensionamiento de nuestro sistema.

En el proceso de dimensionamiento de un sistema fotovoltaico interconectado a la red, uno de los elementos fundamentales para el análisis del consumo energético es el recibo de energía eléctrica proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Este documento permite conocer el comportamiento histórico del consumo eléctrico del usuario, lo cual es indispensable para estimar la capacidad del sistema fotovoltaico requerido. El recibo de energía eléctrica contiene información relevante relacionada con el consumo de electricidad durante un periodo determinado, generalmente de carácter bimestral en el caso de usuarios domésticos en México. A partir de estos datos es posible determinar la cantidad de energía eléctrica que demanda el inmueble, lo cual sirve como base para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Período	kWh	Importe	Pagos	Pendientes de Pago
del 20 JUN 25 al 20 AGO 25	2522	$1,599.00	$1,599.00	
del 23 ABR 25 al 20 JUN 25	2510	$1,530.00	$1,530.00	
del 19 FEB 25 al 23 ABR 25	2518	$1,556.00	$1,556.00	
del 19 DIC 24 al 19 FEB 25	2249	$484.00	$484.00	
del 21 OCT 24 al 19 DIC 24	2849	$730.00	$730.00	
del 20 AGO 24 al 21 OCT 24	2349	$2,919.00	$2,919.00	
del 20 JUN 24 al 20 AGO 24	2333	$2,775.00	$2,775.00	
del 22 ABR 24 al 20 JUN 24	2497	$3,795.00	$3,795.00	
del 19 FEB 24 al 22 ABR 24	2569	$4,482.00	$4,482.00	
del 20 DIC 23 al 19 FEB 24	2532	$4,247.00	$4,247.00	
del 20 OCT 23 al 20 DIC 23	2628	$4,972.00	$4,972.00	

Imagen 13.- Recibo de luz donde muestra el consumo bimestral del sitio.

Una vez obtenido el recibo de energía eléctrica, se procede a analizar el consumo registrado durante el periodo de facturación. Este consumo generalmente se expresa en kilowatt-hora (kWh), unidad que representa la cantidad de energía utilizada por los equipos eléctricos del inmueble.

Para obtener un valor representativo del consumo energético se debe tener en cuenta los parámetros:

- Horas pico solares
- Consumo anual

7.4.-Obtencion de las Horas Pico Solar

A continuación, se mostrará el cómo obtener las horas pico solar a través de la plataforma NASA POWER.

7.4.1.-Acceso a la plataforma de datos solares.

El primer paso consiste en ingresar al portal web de la base de datos solares: NASA POWER, el cual permite consultar información climatológica y de radiación solar para cualquier ubicación geográfica del planeta.

Dentro de la plataforma se accede al apartado de Data Access Viewer, donde es posible seleccionar la ubicación geográfica del sitio de estudio mediante coordenadas geográficas o mediante la búsqueda directa del lugar en el mapa interactivo.

7.4.2.-Selección de la ubicación geográfica.

Posteriormente se procede a definir la ubicación exacta del sitio donde se pretende instalar el sistema fotovoltaico. Esto puede realizarse mediante dos métodos:

- Introduciendo las coordenadas de latitud y longitud del sitio.
- Seleccionando el punto directamente sobre el mapa interactivo de la plataforma.

La correcta selección de la ubicación es fundamental, ya que los datos de radiación solar varían dependiendo de la posición geográfica y de las condiciones climáticas de cada región.

7.4.3.-Selección de los parámetros de radiación solar.

Una vez definida la ubicación del sitio de estudio, se procede a seleccionar los parámetros meteorológicos necesarios para el análisis del recurso solar. En este caso se selecciona el parámetro correspondiente a la radiación solar global horizontal (GHI). Este parámetro representa la cantidad total de radiación solar que incide sobre una superficie horizontal y generalmente se expresa en unidades de kWh/m² por día.

La radiación global horizontal es uno de los indicadores más utilizados en el análisis de sistemas fotovoltaicos, ya que permite estimar el potencial de generación energética en un sitio determinado.

7.4.4.-Selección del periodo de análisis.

Posteriormente se define el intervalo de tiempo para el cual se desean obtener los datos de radiación solar. Generalmente, para estudios de sistemas fotovoltaicos se utilizan datos promedio de varios años, lo cual permite obtener valores representativos de las condiciones climáticas del sitio.

En muchos casos se emplean promedios históricos de 10 a 20 años, lo cual permite reducir la influencia de variaciones climáticas anuales y obtener estimaciones más confiables del recurso solar disponible.

7.4.5.-Descarga de los datos de radiación solar.

Una vez definidos los parámetros y el periodo de análisis, la plataforma permite generar un archivo de datos que puede descargarse en diferentes formatos, como:

- CSV
- Excel
- JSON

Este archivo contiene información mensual o diaria sobre los niveles de radiación solar en el sitio seleccionado.

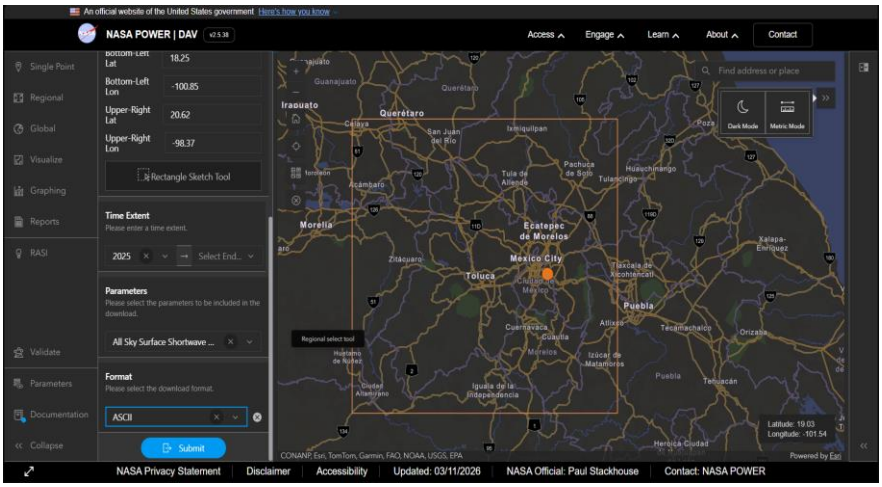


Imagen 14.- ilustrativa de la obtención de la irradiación vía la página de la NASA POWER.

7.4.6.-Cálculo de las Horas Pico Solar.

Con los datos obtenidos de radiación solar se procede a calcular las Horas Pico Solar. Este cálculo se realiza considerando que 1 kWh/m²/día de radiación solar equivale aproximadamente a 1 Hora Pico Solar.

De esta manera, el valor promedio de radiación solar diaria puede interpretarse directamente como el número de Horas Pico Solar disponibles en el sitio de estudio.

Por ejemplo, si el valor promedio de radiación solar diaria es de 5.5 kWh/m²/día, entonces el sitio cuenta aproximadamente con 5.5 Horas Pico Solar por día.

Este valor es posteriormente utilizado para estimar la producción energética del sistema fotovoltaico mediante cálculos de generación eléctrica.

7.4.7.-Interpretación de los resultados.

Finalmente, los valores obtenidos de Horas Pico Solar permiten evaluar el potencial energético del sitio de instalación. A partir de estos datos es posible realizar estimaciones de producción anual de energía y determinar la viabilidad del sistema fotovoltaico.

En general, los sitios con mayores valores de Horas Pico Solar presentan un mayor potencial de generación energética, lo cual resulta favorable para la implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red.

A continuación, por medio de la siguiente tabla mostramos los datos de irradiación anual del municipio de Nezahualcóyotl, con el fin de generar un promedio anual y calcular las horas solares pico.

PARAMETER	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
SI_TILTED_AVG_HORIZONTAL	4.668	5.4274	6.0653	6.2083	5.7936	5.1055	4.9082	4.9745	4.391	4.7746	4.7472	4.614	5.1398
SI_TILTED_AVG_LAT_MINUS15	4.9022	5.6239	6.1793	6.2282	5.7559	5.0556	4.8734	4.9721	4.4292	4.8982	4.9663	4.8737	5.2298
SI_TILTED_AVG_LATITUDE	5.5063	6.078	6.3446	6.0876	5.4511	4.7412	4.6164	4.8178	4.4263	5.1478	5.5178	5.561	5.358
SI_TILTED_AVG_LAT_PLUS15	5.8097	6.2018	6.1745	5.6402	4.8926	4.2206	4.1585	4.4484	4.2245	5.1362	5.7679	5.9412	5.2181
SI_TILTED_AVG_VERTICAL	4.2197	3.9026	3.0535	2.0657	1.6526	1.6382	1.6474	1.8259	2.1079	3.0302	4.031	4.4998	2.8061
SI_TILTED_AVG_OPTIMAL	5.8418	6.205	6.3446	6.2287	5.8056	5.1413	4.9236	4.9759	4.453	5.1754	5.7811	6.0101	5.358
SI_TILTED_AVG_OPTIMAL_ANG	41	32.5	19.5	5.5	-4.5	-8	-5.5	1.5	12	26.5	39	44	19
SI_TILTED_AVG_OPTIMAL_ANG_ORT	S	S	S	S	N	N	N	S	S	S	S	S	S
T2M_MAX	23.62	27.17	29.48	29.95	30.98	30.27	26.25	24.9	24.14	23.45	23.86	23.55	30.98
T2M_MIN	-4.54	-3.96	-4.58	0.95	3.14	3.75	3.53	5.25	0.39	-1.51	-4.2	-4.12	-4.58

irradiancia solar	HPS
MAXIMO	6.3446
PROMEDIO VERANO	4.7412
PROMEDIO DEL AÑO	5.358
PROMEDIO EN INVIERNO	5.5178
MINIMO	4.4263

$$HPS = \frac{Irradiancia\ Wh/m^2}{1000w/m^2} \qquad HPS = \frac{5358\ Wh/m^2}{1000w/m^2}$$

$$HPS = 5.35\ HORAS$$

Imagen 15.- Datos generados por la NASA POWER en la irradiación en el estado de México y CDMX en los años 2024- 2025 y cálculos de HSP.

$$hsp = \frac{irradiacion\ Wh/m^2}{1000W/m^2} = \frac{5558Wh/m^2}{1000W/m^2} = 5.35$$

7.5.-Procedimiento para el cálculo del dimensionamiento eléctrico.

Para el desarrollo del sistema fotovoltaico interconectado a la red, fue necesario realizar el dimensionamiento eléctrico del arreglo fotovoltaico con el objetivo de garantizar la compatibilidad entre los módulos fotovoltaicos y el inversor seleccionado. Este proceso permite determinar la cantidad de módulos que pueden conectarse. asegurando que los parámetros eléctricos del sistema se mantengan dentro de los rangos de operación establecidos por el fabricante del inversor.

El procedimiento de cálculo se llevó a cabo considerando las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos y las especificaciones técnicas del inversor. Para ello se utilizaron módulos fotovoltaicos del fabricante Trina Solar, con una potencia nominal de 710 W bifaciales, así como un inversor Growatt MIN 7000–10000 TL-X[E], el cual

presenta características adecuadas para su uso en sistemas fotovoltaicos interconectados a la red de generación distribuida.

7.5.1.- Cálculos para obtener el consumo diario.

$$consumo\ anual = bimestral\ 1 + bimestre\ 2 + bimestral\ \ldots . n = [kwh]$$

$$consumo\ anual = 2349 + 2849 + 2249 + 2518 + 2510 + 2522 = 14997\ kwh$$

$$comsumo\ bimestral\ = \frac{consumo\ diario\ (kwh)}{no.\ bimestres} = (kwh)\ \therefore = \frac{14997\ kwh}{6} = 2449 kwh$$

$$consumo\ duario = \frac{consumo\ bimestral}{2\ meses} = (kwh)\ \therefore \frac{2449\ kwh}{60 dias} = 41.65\ Kwh/dia$$

Calculo para la potencia fotovoltaica diaria: teniendo en cuenta el consumo diario calculado, con las horas pico solares en el país, se puede obtener cual es la potencia requerida de nuestro sistema que necesitamos inyectar en la red para cubrir el consumo que se realiza la residencia de la red de CFE.

$$\text{potencia fotovoltaica} = \frac{\text{consumo diario (kwh)}}{\text{horas solares pico (h)}} = \text{kw}\ \therefore \frac{41.65 Kwh/dia}{5.35\text{h}} = 7.78\text{kw}$$

7.5.2.- Selección de modulo fotovoltaico para la obtención de numero de paneles teóricos.

Esta instalación interconectada a la red está conformada por paneles de 715w bifaciales. se utilizarán paneles de la marca TrinaSolar precisamente el modelo “PV-PS-715BI-TWS” conformado por células de modelo monocristalino.

En la tabla siguiente se muestran las especificaciones eléctricas del módulo Trina solar- PS-715BI-TWS-715W para una radiación estándar de 1000 W/m2 y 25 °C son las siguientes características:

Potencia Nominal-Pmax (Wp)	710 W
Tensión en Máxima Potencia-Vmpp (V)	40.9 V

Corriente en Máxima Potencia-Impp (A)	17.36 A
Tensión de Circuito Abierto-Voc (V)	49V
Corriente de Corto Circuito-Isc (A)	18.40A
Eficiencia η (%)	22.0%

Los módulos bifaciales cuentan además con unas especificaciones contemplando una ganancia adicional del 5% a 10 % en su parte posterior, en la tabla podemos observar estos valores.

Potencia Nominal-Pmax (Wp)	746w
Tensión en Máxima Potencia-Vmpp (V)	40.9
Corriente en Máxima Potencia-Impp (A)	18.23
Tensión de Circuito Abierto-Voc (V)	49.0
Corriente de Corto Circuito-Isc (A)	19.32
Relación de Ganancia de potencia en la parte trasera	5%

Estas especificaciones serían las principales, pero sin embargo es de vital importancia tener conocimiento de sus dimensiones y especificaciones las cuales están en la siguiente tabla.

Altura	2384mm
Ancho	1303mm
Profundidad en marcos	33mm

Peso del modulo	38.3kg
Numero de celdas por modulo	132 celdas

Se calcula el número de módulos fotovoltaicos necesarios. Se usarán unos módulos trina solar de 710w los cuales son módulos bifaciales, pero, sin embargo, en nuestra ficha técnica se muestra que en la simulación que se realizó, nuestro modulo tiene un rendimiento de 751w con la parte posterior del panel.

$$no.\,de\ modulos\ teoricos = \frac{potencia\ fotovoltaica\ (kwh) * 1000}{} \therefore \frac{7.78kwh * 1000}{746w}$$

$$= \frac{7786.6wh}{746} = 10.42\ paneles\ \approx 11\ paneles$$

Se tiene que generar un balance entre el número de módulos instalados ya que el inversor propuesto, cuenta con dos cadenas MPPT por lo cual es necesario instalar 12 módulos a manera de que se dividan en dos cadenas o strings. El cual quedaría:

MPPT 1= 6 Módulos por strings en serie y MPPT 2 = 6 Módulos por string en serie.

7.5.3.-Corrección de voltaje por temperatura.

La corrección del voltaje por temperatura es un aspecto fundamental en el diseño y funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, ya que permite garantizar un desempeño eficiente ante las variaciones de las condiciones ambientales. Además, este procedimiento es indispensable para cumplir con lo establecido en el artículo 690-7 de la Norma Oficial Mexicana de instalaciones eléctricas, el cual considera el efecto de la temperatura sobre el voltaje de los módulos fotovoltaicos.

Importancia de cumplir con el artículo 690-7

- Compensación de la variación del voltaje por efecto de la temperatura: Los módulos fotovoltaicos presentan un coeficiente de temperatura, lo que significa que el voltaje que generan cambia conforme aumenta o disminuye la temperatura.

Por ello, la corrección de voltaje permite estimar con mayor precisión el comportamiento eléctrico de los paneles bajo distintas condiciones climáticas.

- **Optimización del diseño del sistema:** Durante el diseño de una instalación fotovoltaica es necesario considerar las variaciones de voltaje ocasionadas por la temperatura. Esto permite:

1. Seleccionar y dimensionar adecuadamente los inversores y demás componentes eléctricos para que operen de forma segura dentro del rango de voltaje esperado.
2. Prevenir condiciones de sobretensión que puedan afectar el rendimiento del sistema o provocar daños en los equipos.
3. Asegurar la operación en el Punto de Máxima Potencia (MPP): Los sistemas fotovoltaicos están diseñados para trabajar cerca del Punto de Máxima Potencia (MPP), donde la producción de energía es mayor. La corrección de voltaje por temperatura facilita que el sistema mantenga su funcionamiento próximo a este punto, incluso cuando la temperatura ambiental cambia, favoreciendo así un mejor aprovechamiento de la energía generada.

7.6.-Selección del inversor.

Para determinar la selección del inversor es de vital importancia considerar diferentes aspectos los cuales son:

Tensión y corriente en su punto máximo de potencia se debe tener en cuenta al seleccionar un inversor que se asumirá que en circunstancias normales de operación se ofrecerá la potencia máxima a una tensión específica indicada en el documento de características. La tensión de operación estándar, o tensión de máxima potencia, del generador fotovoltaico se determina a partir de las características eléctricas requeridas por el sistema. Para ello, es necesario considerar la configuración de los módulos fotovoltaicos, tomando en cuenta su conexión en serie y en paralelo, ya que esta disposición determina la tensión y la corriente de operación del generador fotovoltaico., se obtendrá al multiplicar la tensión del punto de máxima potencia ($VMPPTOTAL$) de

cada panel por la cantidad de paneles que estén en serie dentro de cada rama del generador:

Teniendo en cuenta que nuestra instalación es en serie nuestro voltaje VMPP (potencia máxima de voltaje) se sumará o multiplicará dependiendo la cantidad de módulos que instalemos, sin embargo, en una conexión en paralelo entre estos el VMPPTOTAL será una constante.

La instalación está conformada por dos cadenas o strings cada una conformada por 6 módulos

Calculo para voltaje por String:

$VMPPTOTAL$ = $VMPP\ x\ NS$ = 40.9v x 6 $paneles$ =299.4 v

La corriente que es suministrada por los módulos fotovoltaicos cuando esta proporciona la máxima potencia se obtendrá al multiplicar la corriente de punto de máxima potencia ($IMPPTOTAL$) de cada panel por el número de paneles en paralelo o ramales, a continuación, se realizará el siguiente procedimiento para calcular el amperaje:

Calculo para amperaje por cadena de string que se inyectara al módulo.

$IMPPTOTAL$ = 18.23 A

En caso de conectar los strings en paralelo

$IMPPTOTAL$ = $IMPP\ x\ NP$ = 18.23 A x 2 $ramales$ =36.46 A

Para la presente instalación fotovoltaica, se seleccionó el inversor Growatt MIN 7000–10000 TL-X[E] de “8000W” debido a que sus características eléctricas y operativas resultaron compatibles con los requerimientos del arreglo fotovoltaico conformado por módulos bifaciales de 710 Wp.

7.6.1.-Potencia mínima del inversor.

$$\text{factor de sobredesimiento} = 7.78\ \text{kwp} * 0.85 = 6.61\text{wp}$$

Por consiguiente, se determina que el inversor podría ser desde un modelo de 7 kWp, pero sin embargo por temas de rendimiento, no se cree que sea indicado abaratar costos preferimos que en la instalación tenga un buen inversor eficaz más que nada por cuestiones de seguridad y productividad con el objetivo de que esta inyecte el 100% de nuestro consumo con CFE. Por eso escogemos el inversor.

Selección de protecciones termomagnéticos de lado de DC.

En la instalación fotovoltaica se deberán colocar dos interruptores termomagnéticos de dos polos.

Interruptor por string = 2 de 25ª en DC

$$itotalxstring = 18.23A$$

$$\text{Iproteccion} = 1.25 \text{ x } 18.23 \text{ A} = 22.78 \text{ A}$$

15.1.2.-Protección termomagnética de lado de AC

$$maxima\ corriente\ de\ salida\ total = 38.3x1.25 = 47.87A$$

En este caso se llevarán 2 termomagnéticos DC 25A siemens, entre el sistema fotovoltaico y el inversor central y 1 termomagnético AC de la marca SQUARE D de 50A este termomagnético estará entre el inversor y tablero de distribución principal.

7.6.2.-Cableado.

Uno de los componentes fundamentales en estos sistemas es el cableado eléctrico, ya que de él depende el transporte seguro y eficiente de la energía generada. En México, la NOM-001-SEDE-2012 regula las instalaciones eléctricas y establece los requisitos mínimos para garantizar la seguridad, eficiencia y cumplimiento técnico de estos sistemas.

Criterios para la Selección de Cables según la NOM-001-SEDE-2012

Con base al factor de corto circuito, tomando en cuenta los cálculos para la selección de los termos de la misma forma se obtendrá la impedancia o amperaje por string que es de 22.83A con esto y con forme a la norma se puede utilizar cable calibre 14AWG.

Sin embargo, los módulos cuentan con calibre 12AWG. Además, este calibre debe respetarse para la realización de las conexiones en serie con sus respectivos ms4 (+, -) en el lado de CD que va desde nuestros sistemas FV a nuestro inversor central.

7.6.3.-Cálculos para obtención del calibre para corriente alterna.

Se tomará en cuenta el amperaje de salida del inversor central que va directo al tablero principal de distribución, donde se encuentran las fases de CFE. En este caso la selección de inversor da un amperaje de 38.3A en una fase, a lo cual se debe calcular el factor de corto circuito que en la mayoría de los casos se dimensiona al 125%.

$$maxima\ corriente\ de\ salida\ total = 38.3x1.25 = 47.87A$$

Con estos datos y tomando en cuenta el amperaje total de salida se debe revisar la tabla de norma en cuanto a calibre la norma nos dice que el adecuado sería un calibre 8AWG.

Tamaño o designación		Temperatura nominal del conductor [Véase la tabla 310-104(a)]					
		60 °C	75 °C	90 °C	60 °C	75 °C	90 °C
mm²	AWG o kcmil	TIPOS TW, UF	TIPOS RHW, THHW, THHW-LS, THW, THW-LS, THWN, XHHW, USE, ZW	TIPOS TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THHW-LS, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	TIPOS UF	TIPOS RHW, XHHW, USE	TIPOS SA, SIS, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2
		COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE		
0.824	18	—	—	14	—	—	—
1.31	16	—	—	18	—	—	—
2.08	14	15	20	25	—	—	—
3.31	12	20	25	30	—	—	—
5.26	10	30	35	40	—	—	—
8.37	8	40	50	55	—	—	—
13.3	6	55	65	75	40	50	55
21.2	4	70	85	95	55	65	75
26.7	3	85	100	115	65	75	85
33.6	2	95	115	130	75	90	100
42.4	1	110	130	145	85	100	115
53.49	1/0	125	150	170	100	120	135
67.43	2/0	145	175	195	115	135	150
85.01	3/0	165	200	225	130	155	175
107.2	4/0	195	230	260	150	180	205
127	250	215	255	290	170	205	230
152	300	240	285	320	195	230	260
177	350	260	310	350	210	250	280
203	400	280	335	380	225	270	305
253	500	320	380	430	260	310	350
304	600	350	420	475	285	340	385
355	700	385	460	520	315	375	425
380	750	400	475	535	320	385	435
405	800	410	490	555	330	395	445
456	900	435	520	585	355	425	480
507	1000	455	545	615	375	445	500
633	1250	495	590	665	405	485	545
760	1500	525	625	705	435	520	585
887	1750	545	650	735	455	545	615
1013	2000	555	665	750	470	560	630

Imagen. 16.- tabla para selección de cableado de acuerdo con la Nom sede 2012 instalaciones eléctricas.

7.7.- Fase de Instalación y Puesta en Marcha.

Esta etapa comprende la adquisición de materiales, la ejecución física de la instalación y las pruebas finales. La instalación es llevada a cabo por un equipo de especialistas (electricistas, estructuristas, etc.) y sigue un procedimiento estandarizado.

- **Montaje de la estructura**: Se arma y se fija la estructura de soporte de los paneles con materiales de alta calidad y tornillería de acero inoxidable.
- **Instalación eléctrica y cableado**: Se utilizan conectores MC4 para uniones seguras y a prueba de agua, y se instalan canalizaciones para proteger el cableado. Este cableado se realiza con protecciones de corriente directa (CD) y alterna (CA) en cada etapa.
- **Conexión a la red**: Se montan los inversores, se conectan al sistema de paneles y se cablean hasta el tablero principal para la interconexión.
- **Pruebas de funcionamiento y monitoreo**: Se realizan pruebas de continuidad y polaridad, y se configuran las plataformas de monitoreo del inversor. Esto permite supervisar la producción del sistema en tiempo real y recibir alertas en caso de fallas.

7.8.-Trámites Finales y Entrega.

La última fase es la gestión de los trámites legales y administrativos para la interconexión con CFE.

- Proceso de Interconexión ante CFE

Se recaba y se presenta la documentación necesaria para la aprobación. Esta documentación incluye el Anexo 2. La siguiente documentación es establecida por CFE las cuales son: solicitud, el diagrama unifilar del sistema, el croquis de ubicación, las fichas técnicas de los equipos y los certificados de seguridad (como el UL 1741), carta poder en caso de gestión, identificaciones oficiales y recibo al cual se realizará el trámite. La correcta presentación de estos documentos agiliza la aprobación para

que CFE pueda reemplazar el medidor por uno bidireccional, permitiendo la formalización de la operación del sistema.

Para proceder con estos aspectos para llevar a cabo una instalación fotovoltaica, debemos primero conocer estos conceptos que son de vital importancia al momento de seleccionar y dimensionar el sistema.

7.9.-Comparación de Paneles Fotovoltaicos Mono faciales y Bifaciales.

Los paneles fotovoltaicos monofaciales y bifaciales son las dos tecnologías principales en el mercado para la captación de energía solar. La principal diferencia radica en su capacidad para captar la luz solar.

7.9.1.- Paneles Monofaciales.

Un panel monofacial solo puede generar electricidad a partir de la luz que incide directamente sobre su cara frontal. La parte posterior está cubierta con un material opaco (como una lámina de polímero) que protege las celdas y el cableado interno.

- **Eficiencia**: La eficiencia de estos paneles se mide únicamente por la radiación solar directa que reciben.
- **Instalación**: Son más sencillos de instalar y requieren estructuras de soporte más básicas.
- **Costo**: Generalmente tienen un costo inicial más bajo por vatio que los paneles bifaciales.
- **Aplicaciones**: Son la opción estándar para la mayoría de las instalaciones residenciales y comerciales en tejados, donde la radiación reflejada no es un factor significativo.

7.9.2.- Paneles Bifaciales.

Un panel bifacial puede generar electricidad a partir de la luz que recibe tanto por su cara frontal como por su cara posterior. La parte posterior utiliza una lámina

transparente o vidrio, lo que permite que la luz solar que se refleja desde la superficie subyacente (conocida como albedo) llegue a las celdas.

- **Eficiencia**: La eficiencia bifacial puede aumentar la producción de energía del panel entre un 5% y un 30% en comparación con un panel mono facial, dependiendo de las condiciones de instalación.
- **Instalación**: Su instalación requiere estructuras elevadas y superficies de alta reflectividad (como arena, grava blanca o techos claros) para maximizar la captación de luz reflejada. La altura de montaje es crucial.
- **Costo**: Tienen un costo inicial más alto por unidad que los paneles mono-faciales. Sin embargo, su mayor producción de energía puede resultar en un menor costo nivelado de la energía (LCOE) a largo plazo.
- **Aplicaciones**: Son ideales para instalaciones en el suelo, parques solares a gran escala, tejados claros, y estructuras como marquesinas, donde la luz reflejada es abundante.

En la siguiente tabla se presentan las diferencias más relevantes entre los paneles bifaciales y monofaciales.

Característica	Módulos Monofaciales	Módulos Bifaciales
Generación de Energía	Unilateral (frontal)	Bilateral (frontal y trasera)
Eficiencia	Depende de la irradiancia frontal	Mayor eficiencia por la ganancia adicional de la cara trasera

Durabilidad	Vidrio frontal y lámina trasera	Diseño de doble vidrio, mayor resistencia a la degradación
Costo inicial	Generalmente menor	Mayor, aunque se compensa con la mayor producción
Garantía	Típicamente de 25 años	Mayor, a menudo de 30 años
Factor de Instalación	Más ligeros y sencillos de instalar	Más pesados, requieren estructuras más robustas y consideraciones de albedo

Tabla1.- tabla comparativa de beneficios entre módulos bifaciales y monofaciales.

7.9.3.-Consideraciones Técnicas y de Diseño para Paneles Bifaciales.

Dado que no existe una regulación mexicana específica para la tecnología bifacial, los ingenieros y proyectistas deben basarse en las mejores prácticas de la industria y en las recomendaciones de los organismos internacionales, como el IEEE y la IEC. Las principales consideraciones incluyen:

Medición y Validación de la Potencia: Los diseñadores deben solicitar a los fabricantes la hoja de datos técnicos que incluya la medición de potencia tanto en la cara frontal como en la posterior. Es crucial que esta información esté respaldada por certificaciones de laboratorios acreditados bajo los estándares IEC (como la IEC 60904-1-2).

Diseño del Sistema:

- Albedo: El diseño del sistema debe tomar en cuenta el albedo del suelo (la reflectividad). La ganancia bifacial es directamente proporcional a este factor.
- Altura de Montaje: Se debe diseñar la estructura de montaje con la altura adecuada para maximizar la luz reflejada en la cara posterior y evitar el sombreado entre filas.

- Distancia entre Filas: Al diseñar la separación entre los módulos, se debe considerar el sombreado y la distribución de la luz reflejada para optimizar la ganancia total del sistema.

7.10.-Inversores.

El inversor fotovoltaico es un sistema de conversión de potencia que transforma la corriente continua en corriente alterna, este es uno de los componentes más importantes de las instalaciones fotovoltaicas ya que la corriente alterna es la forma más fácil de transportar la potencia eléctrica a grandes distancias y se ha convertido en la forma convencional y estandarizada en la que ocupamos la energía eléctrica, los electrodomésticos más comunes o cargas están diseñadas para funcionar con corriente alterna (CA). Sin embargo, como sabemos los módulos fotovoltaicos generan corriente directa (DC). En casos de ser instalaciones aisladas las baterías cuentan con la capacidad de almacenar DC. Pero para ser más específicos la corriente alterna y directa por su misma naturaleza son incompatibles, por lo tanto, este apartado de las instalaciones fotovoltaicas es importante tener en cuenta su funcionamiento, un dato importante que debemos conocer es que el puente entre los módulos que generan DC y la red eléctrica que nos suministra AC con el fin de transformar la DC en AC para ser inyectada en el suministro eléctrico.

Los inversores están conformados por transistores, su función es cortar la corriente continua con el fin de crear ondas cuadras, sin embargo, después de este proceso pasa por un transformador y este convierte la DC en AC haciendo que las ondas cuadradas pasen de forma senoidal esta misma debe sincronizarse con la corriente eléctrica a una frecuencia funcional de 60Hz o 50hz. [7]

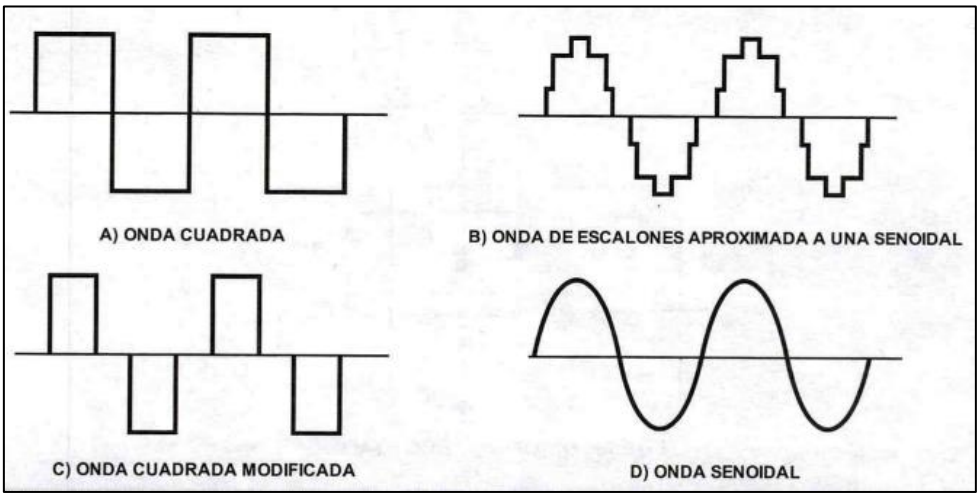


Imagen 17.- Ejemplo de módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino.

En el mercado podemos encontrar dos tipos de variantes de los inversores (centrales y micro), y cada uno de ellos cuentan con ventajas y desventajas al momento de determinar cuál es el que mejor se adapta a las necesidades, en la siguiente tabla se puede observar algunas de ellas. (Tabla 1)

INVERSOR CENTRAL	MICRO-INVERSOR
	
Ventajas: • El mantenimiento es más fácil ya que solo es la unidad central. • Tiene mayor eficiencia al momento de transformar la CD a CA	Ventajas: • Evita la perdida de eficiencia a consecuencia de las sombras • Se monitorea y es más fácil de reconocer un posible daño en los módulos de forma independiente

• Se conectan más módulos en un solo inversor por lo cual el monitoreo es en general • Reducción de costos ya que solo se adquiere un equipo	• Es más seguro al momento de tener sobretensiones
Desventajas: • No cuenta con un control de sombreado así que se si en un módulo pierde eficiencia los demás se regulan • Son más espaciosos ya que son de un dimensionamiento mayor.	Desventajas: • Se coloca en las estructuras y puede tener afectaciones con el paso del tiempo • Son más costosos • Solo se puede conectar hasta cuatro módulos en cada micro inversor

Tabla 2.- Comparativa de los inversores y micro inversores.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores se debe considerar que para su elección e instalación cuanto es su potencia nominal de entrada y salida y la impedancia para la elección de un inversor.

7.11.- Tipos de estructuras en sistemas fotovoltaicos existentes.

Las estructuras fotovoltaicas son los soportes que sostienen y orientan los paneles solares para maximizar su eficiencia. Existen varios tipos según su forma de instalación, orientación, movilidad y uso. A continuación, se mostrará los principales tipos de estructuras fotovoltaicas:

7.11.2.-Estructuras fijas.

Son las más comunes y económicas.

Sobre superficies inclinadas o corta agua: Se instalan directamente en techos inclinados, siguiendo la pendiente del tejado.



Imagen 18.- Ejemplo de estructuras de aluminio o PTR anclados directamente a la superficie del suelo

Sobre superficie plana: Utilizan soportes inclinados para orientar los paneles. Pueden ser:

- Lastradas (sin perforaciones)
- Ancladas (fijadas al techo)



Imagen 19.- Ejemplo de una estructura de aluminio o PTR sobre superficie plana

7.11.3.- Estructuras móviles o seguidores solares.

Permiten que los paneles sigan el movimiento del sol.

Seguidor de un eje: Se mueve de este a oeste, siguiendo el sol durante el día para mejor captación directa.



Imagen 20.- ejemplo de una estructura fotovoltaica de ejes

Seguidor de dos ejes: Se mueve tanto de este a oeste como de norte a sur (más preciso).



Imagen 21.- ejemplo de una estructura fotovoltaica de dos ejes

- Ventajas: Aumentan la producción (hasta un 30-40%).
- Desventajas: Más caras, requieren mantenimiento y energía para moverse.

Obtención y Análisis de Datos Meteorológicos y Geográficos

El análisis de datos meteorológicos y geográficos constituye la base para evaluar la viabilidad de una instalación fotovoltaica, ya que determina la cantidad de energía solar

disponible y las condiciones físicas que influyen en el rendimiento del sistema. En particular, para el caso de México y del Estado de México, la variabilidad climática, la altitud y las características del suelo requieren una atención detallada.

7.12.-Localización y Caracterización del Sitio de Estudio.

El primer paso consiste en establecer con precisión la ubicación del sitio donde se proyecta instalar el sistema fotovoltaico:

- Coordenadas geográficas: se determinan mediante GPS o plataformas digitales (Google Earth, GIS, cartografía del INEGI).
- Altitud y relieve: se extraen a partir de modelos digitales de elevación (INEGI o NASA SRTM), ya que la altura sobre el nivel del mar influye en la densidad del aire y, por ende, en la radiación incidente.
- Condiciones geográficas regionales**:** se identifican factores como cercanía a centros urbanos, cuerpos de agua o zonas boscosas, que pueden modificar el microclima y la reflectancia del suelo.

7.12.3.-Obtención de Datos Meteorológicos.

Para el análisis del recurso solar en México se emplean diferentes fuentes de información confiables:

- **Servicio Meteorológico Nacional (SMN):** proporciona registros históricos de temperatura, nubosidad y radiación solar en estaciones distribuidas en el territorio.
- **Bases internacionales:** Meteonorm, SolarGIS, PVGIS y NASA POWER ofrecen series temporales horarias de radiación (global, difusa y directa), temperatura ambiente y velocidad del viento.

Radiación Solar

La radiación solar constituye el insumo principal de los sistemas fotovoltaicos. El análisis metodológico incluye:

- **Radiación Global Horizontal (GHI):** mide la energía solar total recibida por unidad de área en un plano horizontal.
- **Radiación Directa Normal (DNI):** componente de radiación que incide directamente en un plano perpendicular a los rayos solares, relevante para seguidores solares.
- **Radiación Difusa Horizontal (DHI):** energía que llega dispersada por la atmósfera, importante en condiciones de nubosidad y en sistemas bifaciales.

En el Estado de México, debido a la altitud (>2200 msnm), la radiación suele ser mayor que en zonas bajas del país, aunque la nubosidad estacional puede reducir los niveles efectivos.

7.13.-Albedo del Suelo.

El albedo es la fracción de radiación solar reflejada por la superficie terrestre y es un parámetro clave en sistemas fotovoltaicos bifaciales. Para determinarlo se siguen dos enfoques:



Imagen 21 Tipos de albedo y sus valores.

- **Mediciones directas:** mediante radiómetros o albedómetros instalados en el sitio de estudio, que miden simultáneamente la radiación incidente y la reflejada.

- **Estimaciones indirectas:** utilizando literatura técnica y bases de datos:

    - Suelo árido o seco: 0.15 – 0.25.
    - Césped o vegetación: 0.20 – 0.30.
    - Superficies urbanas o pavimento claro: 0.25 – 0.40.
    - Nieve (ocasional en zonas altas del Estado de México): 0.60 – 0.80.

En proyectos bifaciales, es común simular distintos valores de albedo para analizar su impacto en la ganancia trasera de los módulos.

Albedo es una palabra proveniente del latín y que significa ‘blancura’. Su definición por la RAE y en el ámbito de la física es la siguiente: proporción existente entre la energía luminosa que incide en una superficie y la que se refleja.

Dicha definición nos hace pensar, ¿todas las superficies reflejan lo mismo? La respuesta es no, no todas reflejan la misma cantidad de energía luminosa. El albedo se mide con una variable comprendida entre 0, que significa que la superficie no refleja nada de radiación, y 1, que indica que la superficie refleja la misma radiación que incide en ella.

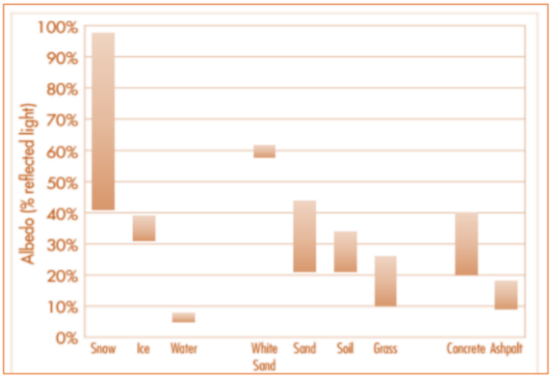


Imagen. 22 valores de albedo de acuerdo con diferentes superficies

Por lo tanto, la figura indica que, instalaciones fotovoltaicas bifaciales serán más eficientes o producirán más energía, si la superficie que refleja la radiación incidente

es nieve, arena (o superficies de colores claros, en especial el blanco) frente a superficies como el asfalto o colores oscuros. [8]

7.14.- Orientación y ubicación.

Al momento de diseñar este tipo de instalaciones solares, es muy importante decidir la orientación de los paneles, ya que lo que se busca es que los paneles capten la mayor cantidad de radiación solar posible.

Tomando en cuenta la ubicación de los módulos, un factor importante es la orientación para su ubicación en la que se instalará. Este factor busca una inclinación adecuada a las 12 horas del día de la mañana es la hora en la que el sol alcanza su punto más alto de elevación sobre el horizonte con esto tomamos en cuenta la “irradiación global horizontal”. Esta orientación puede ser impuesta por el emplazamiento donde vamos a instalar los paneles, como es el caso de tejados con una cierta orientación e inclinación o una superficie libre si la ubicación lo permite. el ángulo llamado azimut α y las horas pico solares (HSP)

Azimut describe la orientación de la superficie.

En el hemisferio norte, un ángulo significa que el panel mira **exactamente al Sur, que es la orientación ideal para maximizar la producción anual total, ya que el sol siempre está al Sur del ecuador.

- Un ángulo negativo significa Este
- Un ángulo positivo significa Oeste

Horas Pico Solares (HSP) es una medida de la irradiación solar total recibida por una superficie en un día, expresada como el número de horas en las que el sol brillaría con su máxima intensidad. [4]

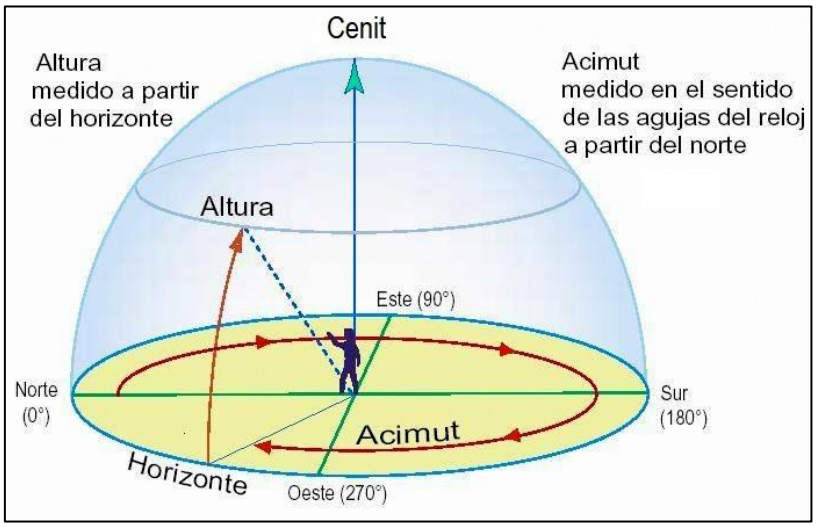


Imagen 23.- Orientación y ubicación.

México se ubica en el hemisferio norte geográficamente, la orientación de los módulos y los captadores, deben apuntar hacia el sur geográfico (no hacia el sur magnético) si no, es decir el Angulo de azimut (α) debe ser 0°.

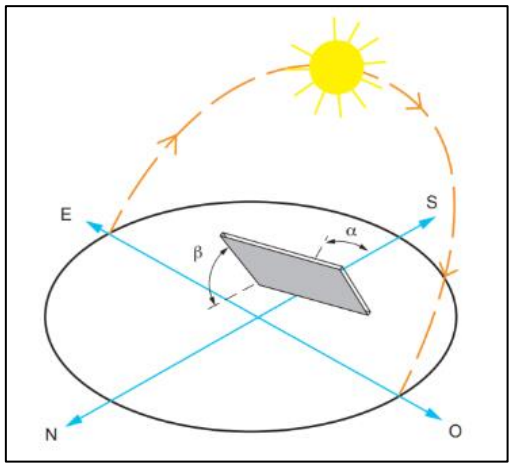


Imagen 24.- Ejemplo de la orientación e inclinación de los módulos

7.15.- Inclinación.

La inclinación de los paneles solares depende directamente del lugar o sitio a instalar. Esto se refiere a la posición geográfica del lugar donde se va a considerar, la latitud con dirección al ecuador que divide la mitad a los meridianos del lugar que buscamos que la irradiación del sol incida a los módulos lo más perpendicular posible, esto con el propósito de alcanzar la mayor eficiencia posible. Es la inclinación del módulo solar

será con la latitud del lugar con respecto del plano del suelo y siempre con la orientación hacia el ecuador para que esta inclinación cumpla su propósito.

Se define como el ángulo que forma el plano de la superficie captadora y la horizontal del suelo. Corresponde con el ángulo β de figura. [4]

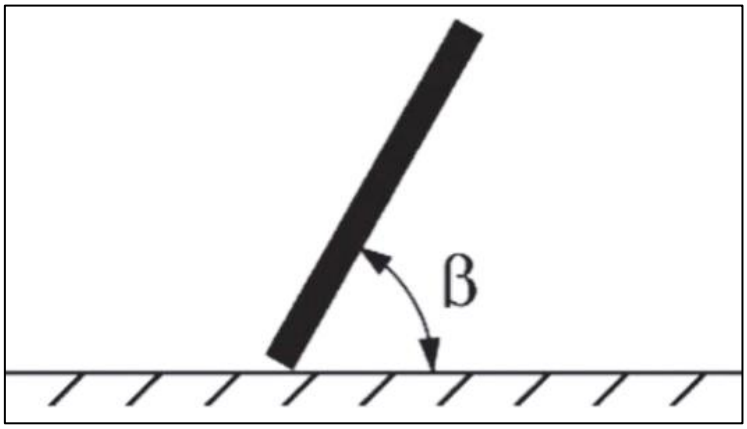


Imagen 25.- inclinación desde el ángulo β

7.16.- Importancia del cableado en sistemas fotovoltaicos.

La correcta selección del cableado en instalaciones fotovoltaicas es fundamental para garantizar:

- Seguridad eléctrica del sistema
- Reducción de pérdidas por caída de tensión
- Durabilidad frente a condiciones ambientales
- Cumplimiento de normas eléctricas

Además, el dimensionamiento del conductor debe realizarse considerando la corriente del sistema y factores de seguridad, de modo que la capacidad del cable sea al menos 1.25 × 1.25 veces la corriente de cortocircuito del arreglo fotovoltaico, tal como lo establecen las normas de diseño eléctrico.

7.17.- Interruptores Termomagnéticos.

Los interruptores termomagnéticos son dispositivos fundamentales en los sistemas eléctricos, ya que se encargan de proteger los circuitos ante sobrecargas y cortocircuitos. Esto lo logran mediante dos sistemas de detección integrados:

Sistema térmico:

Consiste en una lámina bimetálica que, al calentarse debido al exceso de corriente, se deforma y provoca la apertura automática del circuito, evitando daños por sobrecarga.

Sistema magnético:

Emplea un electroimán que reacciona instantáneamente ante un cortocircuito, desconectando el flujo eléctrico para prevenir consecuencias mayores.

Clasificación según número de polos

- **Unipolar**: Protege un solo conductor (generalmente la fase).
- **Bipolar**: Actúa sobre fase y neutro o dos fases
- **Tripolar**: Protege tres fases (sistemas trifásicos).
- **Tetrapolar**: Cubre tres fases y el neutro en una sola unidad.

Beneficios y propósito

- **Seguridad**: Disminuyen el riesgo de incendios y accidentes eléctricos.
- **Protección de equipos**: Evitan que los cables y dispositivos sufran daños por corrientes anómalas.
- **Confiabilidad operativa**: Contribuyen al funcionamiento continuo y seguro de la instalación eléctrica.

Los interruptores termomagnéticos son componentes clave en cualquier red eléctrica. Su capacidad de detectar condiciones peligrosas y desconectar automáticamente el

suministro eléctrico los convierte en una herramienta confiable para proteger tanto a las personas como a los equipos.

7.18.-Interruptores Termomagnéticos en Sistemas Fotovoltaicos.

En instalaciones solares, los interruptores termomagnéticos son elementos clave para proteger los circuitos eléctricos frente a sobrecargas y cortocircuitos. Aunque suelen utilizarse principalmente en sistemas de corriente alterna, también existen versiones específicas para corriente continua, que es común en la parte del sistema entre los paneles y el inversor. [9]

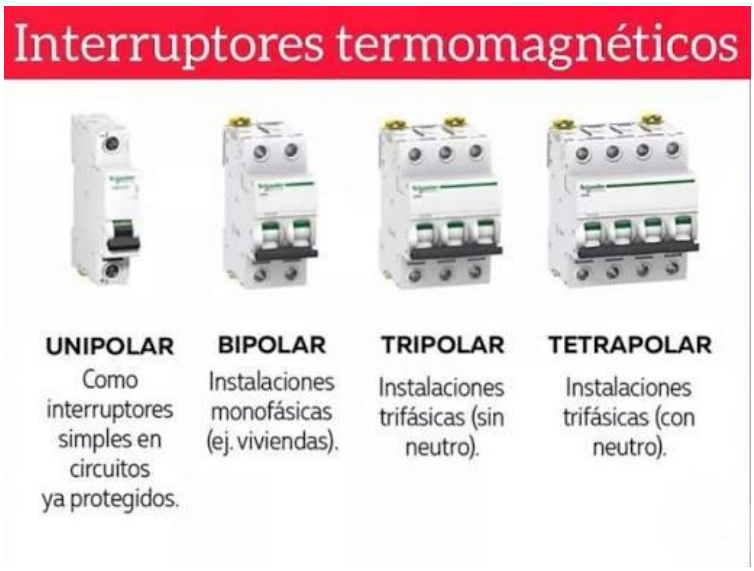


Imagen 26 - Tipos de interruptores termomagnéticos.

Su principal funcionamiento es encargarse de proteger los circuitos ante sobrecargas y cortocircuitos. Esto lo logran mediante dos sistemas de detección integrados:

Lado de corriente continua (DC):

Se instalan entre los paneles solares y el inversor, protegiendo las cadenas (string) de módulos solares contra sobre corrientes o fallos eléctricos. Es importante usar interruptores específicos para DC, ya que la corriente continua no se interrumpe igual que la alterna y requiere contactos diseñados para ese tipo de arco eléctrico.

Lado de corriente alterna (AC).

Se utilizan después del inversor, en la conexión con la red eléctrica o con la carga, protegiendo el circuito de salida como cualquier instalación convencional en CA.

Beneficios de su uso en fotovoltaica

- Seguridad del sistema: Interrumpen el flujo eléctrico en caso de una anomalía, evitando daños mayores.
- Protección de componentes costosos: Evitan que fallos eléctricos afecten al inversor, módulos solares o baterías.
- Facilidad de mantenimiento: Permiten desconectar partes del sistema para trabajar de forma segura.

7.18.1.-Factor de corto circuito de seguridad.

Por norma (NEC/IEC), señala que los dispositivos sobre corriente ya sean termomagnéticos o fusibles, deben soportar una corriente 125% superior a la corriente máxima se recomienda multiplicar la corriente de cortocircuito por 1.25 para protección térmica, y a veces hasta 1.56 (1.25 × 1.25) para protección total.

Fórmula para calcular las protecciones termomagnéticas pon string:

- Corriente nominal del interruptor:

$$Inom = 1.25\ x\ Isc = 1.25\ x\ 9A = 11.25\ A$$

La NOM establece:

“El conductor debe tener una capacidad de corriente no menor al 125% de la corriente de operación continua del sistema” (Artículo 690 Sistemas fotovoltaicos).

Tabla de referencia: 310.15(B)(16) y tablas de corrección en condiciones de alta temperatura ambiente.

La ampacidad calculada se obtendrá de esta manera

AMPICIDAD POR RAMA = CORRIENTE MÁXIMA x 1.25 = 15.6 A x 1.25 = 19.5 A

Y de acuerdo con nuestros resultados se obtendrá el calibre adecuado para nuestra instalación y se revisar la tabla siguiente para su selección.

7.19.-Tipos de gabinetes o tableros de distribución eléctrica en instalaciones fotovoltaicas.

En los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red o en sistemas aislados, los gabinetes o tableros de distribución eléctrica cumplen una función fundamental en la protección, control y distribución de la energía eléctrica generada por los módulos solares. Estos dispositivos permiten organizar las conexiones del sistema y garantizar una operación segura del conjunto fotovoltaico.

Los gabinetes eléctricos en sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse principalmente en cajas combinadoras de corriente directa, gabinetes de desconexión, tableros de distribución en corriente alterna y gabinetes de medición o monitoreo. [10]

7.19.1.- Tablero de corriente directa o caja combinadora.

El tablero de corriente directa, conocido también como caja combinadora fotovoltaica, es un gabinete utilizado para concentrar la energía generada por varias cadenas de módulos fotovoltaicos (string) y conducirla hacia el inversor del sistema.

Este dispositivo permite conectar varios arreglos fotovoltaicos en paralelo dentro de un mismo punto de distribución, simplificando el cableado y facilitando la protección del sistema. Generalmente, estos gabinetes incluyen componentes como:

- Fusibles de protección para cada cadena de paneles
- Interruptores automáticos de corriente directa
- Dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS)
- Barras de conexión positiva y negativa
- Terminales de puesta a tierra

La caja combinadora pueden trabajar con tensiones de hasta 1000 V o 1500 V en corriente directa, dependiendo del tamaño y diseño del sistema fotovoltaico. Su principal función es agrupar, proteger y distribuir la energía proveniente de los módulos fotovoltaicos antes de su conversión a corriente alterna mediante el inversor. [10]

7.19.2.-Gabinete de desconexión del sistema fotovoltaico.

En una instalación fotovoltaica es necesario contar con dispositivos de desconexión o seccionamiento, los cuales permiten aislar eléctricamente el sistema durante operaciones de mantenimiento o en situaciones de emergencia.

Estos gabinetes pueden instalarse en dos puntos principales del sistema:

- Desconexión en corriente directa (DC Disconnect) entre los paneles solares y el inversor.
- Desconexión en corriente alterna (AC Disconnect) entre el inversor y el tablero de distribución del inmueble.

Dentro de estos gabinetes se encuentran normalmente los siguientes dispositivos:

- Interruptores termomagnéticos
- Interruptores de corte bajo carga
- Seccionadores eléctricos
- Protección contra sobretensiones

La función principal de estos tableros es garantizar la seguridad del sistema y permitir la interrupción del flujo de energía eléctrica cuando sea necesario realizar mantenimiento o en caso de presentarse alguna falla.

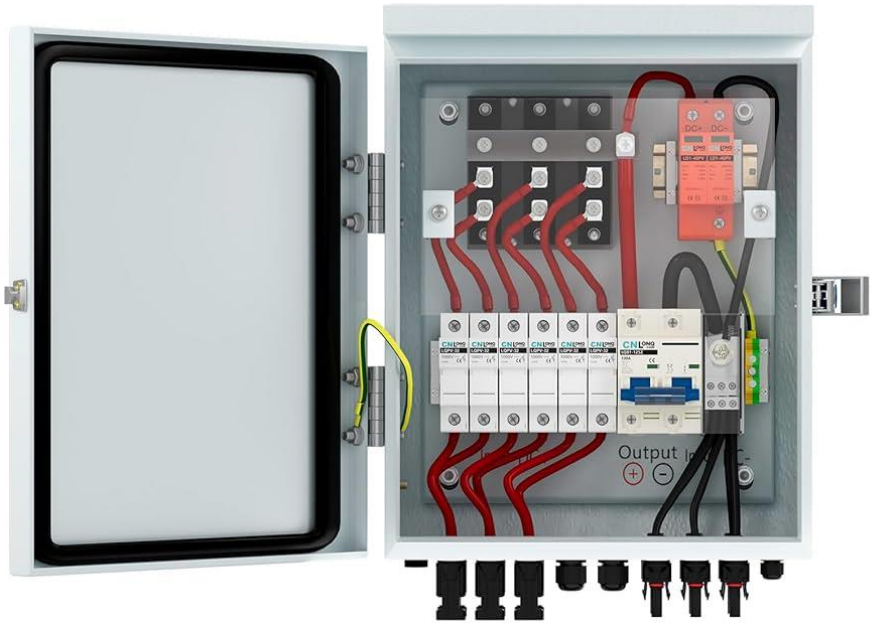


Imagen 22.- gabinete ilustrativo de termos

7.19.3.-Tablero de distribución en corriente alterna (AC Distribution Board).

Una vez que la energía generada por los módulos fotovoltaicos es convertida por el inversor de corriente directa (DC) a corriente alterna (AC), esta debe ser distribuida hacia las cargas eléctricas de la instalación o hacia la red eléctrica.

Para esta función se utiliza un tablero de distribución en corriente alterna, el cual es similar a los tableros eléctricos utilizados en instalaciones convencionales.

Entre los dispositivos que normalmente se encuentran en este tipo de gabinetes se incluyen:

- Interruptores termomagnéticos
- Interruptores diferenciales
- Barras de distribución eléctrica
- Dispositivos de protección contra sobretensiones

En sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, este tablero representa el punto de conexión entre el sistema fotovoltaico y la instalación eléctrica del usuario, permitiendo

que la energía generada sea utilizada dentro del inmueble o enviada hacia la red de distribución eléctrica. [10]



Imagen 27.- tableros de distribución principal.

7.19.4.- Gabinete de medición y monitoreo del sistema fotovoltaico.

En muchos sistemas fotovoltaicos modernos se incorpora un gabinete adicional destinado a la medición y monitoreo del desempeño del sistema. Estos gabinetes pueden alojar diversos equipos electrónicos que permiten supervisar la generación eléctrica del sistema, tales como:

- Medidores bidireccionales de energía
- Sistemas de monitoreo del inversor
- Registradores de datos
- Equipos de comunicación para monitoreo remoto

El uso de estos dispositivos permite evaluar el rendimiento energético del sistema fotovoltaico, detectar posibles fallas y optimizar la operación del sistema a lo largo del tiempo.

7.20.-Instalaciones fotovoltaicas interconectadas a red.

Este es el tipo más popular y de gran importancia para el proyecto de la instalación fotovoltaica. Se colocan paneles en los techos de las residencias, edificios, y es necesario la presencia de inversores centrales o micro inversores para convertir la corriente directa generada por los paneles a corriente alterna, la energía eléctrica generada por los módulos es inyectada a la red que subministra la energía de consumo por parte del distribuidor que suministra la energía eléctrica, esto mismo conlleva a que reducir el consumo bimestral. [3]

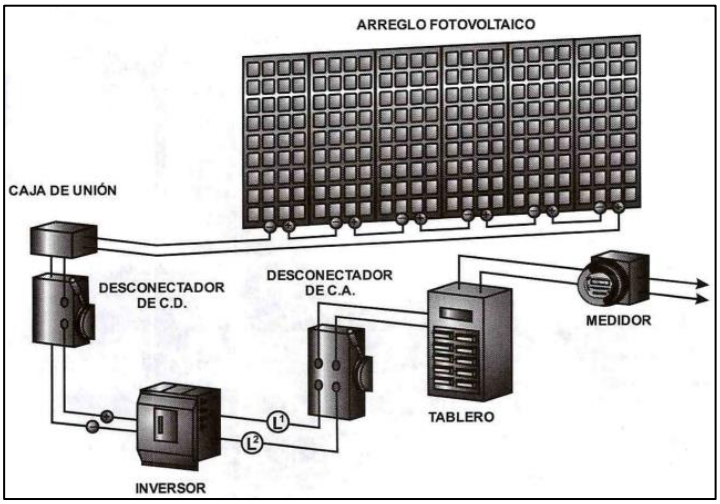


Imagen 28.- Ejemplo de una instalación FV interconectada a la red, ABC DE LAS ENERGIAS RENOVABLES en los sistemas eléctricos

7.20.1.- Instalaciones fotovoltaicas aisladas o autónomas.

Estos sistemas se instalan en áreas de difícil acceso a la red eléctrica, normalmente zonas rurales y en este caso la energía fotovoltaica es la única fuente de electricidad y se requiere de un respaldo, como por ejemplo los bancos de baterías. Tales sistemas pueden ser de generación, ya sea para residencia o bien, pueden ser instalados en mini red para la atención de comunidades pequeñas [3]

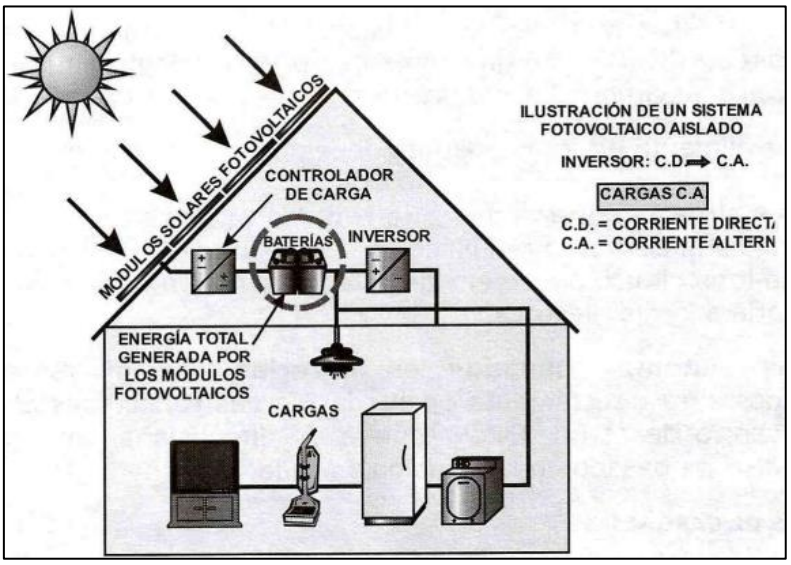


Imagen 29. Ejemplo de la conexión de un sistema FV aislado

7.20.2.-Instalaciones fotovoltaicas hibridas o mixta (interconectadas a la red con banco de baterías).

Una instalación fotovoltaica interconectada a la red con banco de baterías es un sistema híbrido que combina la generación de energía solar mediante paneles fotovoltaicos, el almacenamiento de energía en baterías y la conexión a la red eléctrica pública. Este tipo de sistema permite un suministro energético continuo, eficiente y confiable, optimizando el uso de fuentes renovables y reduciendo la dependencia de la red eléctrica convencional.

Durante las horas de sol, los paneles solares captan la radiación solar y la convierten en electricidad en corriente continua (DC), que es gestionada por un inversor híbrido para abastecer directamente los consumos del lugar, cargar las baterías y, si hay excedente, inyectar energía a la red eléctrica. la producción solar es insuficiente (por ejemplo, en la noche o días nublados), el sistema utiliza la energía almacenada en las baterías. Si las baterías se agotan, se recurre automáticamente a la energía de la red eléctrica. En caso de un corte en el suministro de la red, el sistema puede entrar en modo isla, utilizando las baterías y la energía solar para mantener en funcionamiento cargas críticas. [3]

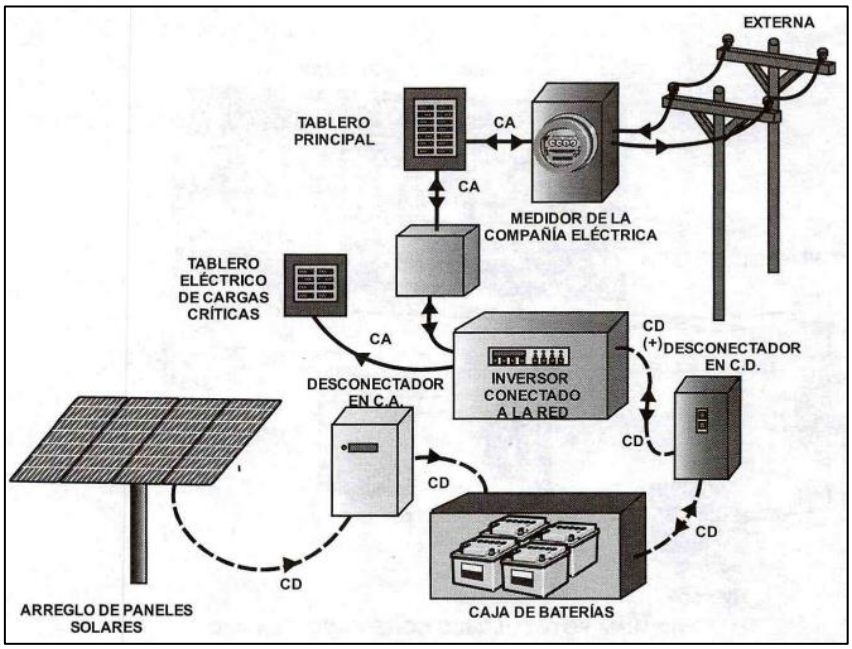


Imagen 30. Ejemplo de la conexión de un sistema FV híbrido

Para realizar una interconexión a la red se necesita considerar los tipos de tarifa establecida por la CFE, para llevar con legalidad su instalación.

7.21.-Tarifas de CFE.

La energía eléctrica es un servicio de primera necesidad al cual todos los mexicanos tenemos derecho. Sin embargo, este tiene un costo de producción y gestión del cual el organismo encargado de distribuir la energía eléctrica en este caso CFE determina una serie de tarifas, normalmente al decir consumos podemos pensar en baja tensión, media y alta de la siguiente imagen podemos observar un ejemplo de cada uno de estos grupos de consumo, observando a que tipo de esquema tarifario corresponde.

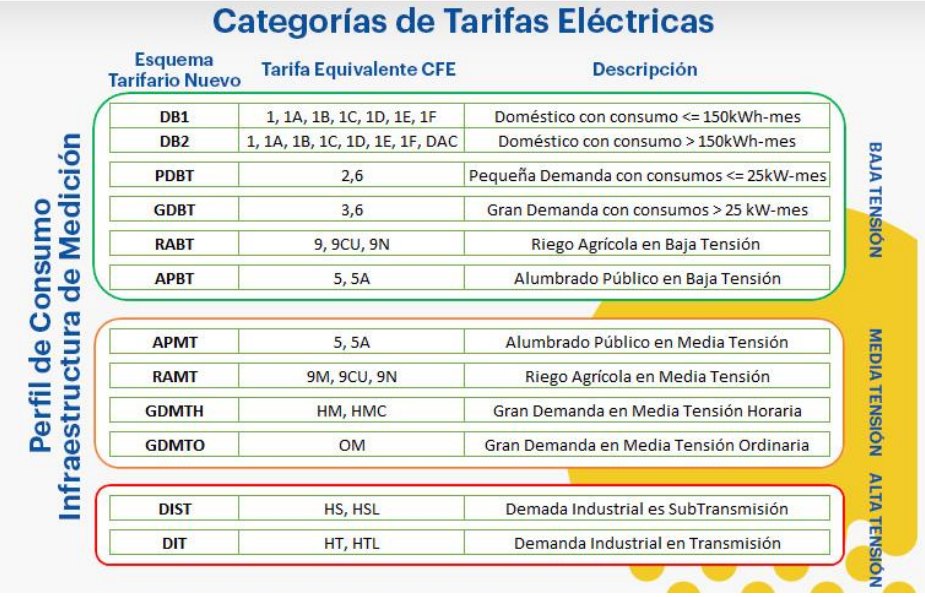


Imagen 31.-Tarifas CFE https://solar-pro.mx/tipos-de-tarifas-cfe-02

En la tabla anterior se muestra las diferentes tarifas que maneja CFE, en baja tensión media tensión y alta tensión.



Imagen 32.-recibo de CFE

7.21.1.-Tarifas

Tarifa PDBT.

Este precio corresponde a la pequeña demanda bajo tensión hasta 25 KW por mes.

Este costo concierne al consumo que se hace en cada hogar de la población mexicana. es el importe con subsidio del gobierno, esta es la tarifa 1, a la que en muchos casos se le agrega una letra (A, B, C, D, E, F), esta letra depende de la zona en la que uno reside.

Tarifa DAC

Esta cuota está destinado a servicios que utilicen la energía exclusivamente para fines domésticos, aplicándose de forma individual a cada casa, departamento, unidad habitacional o vivienda que se clasifique como de alto consumo. A continuación, se mostrarán algunas especificaciones de la Tarifa DAC.

1.- Alto Consumo

Un servicio se considera de alto consumo cuando el promedio mensual de energía consumida supera el umbral establecido para esa región específica.

2.- Consumo mensual promedio

El promedio mensual de consumo se calcula tomando en cuenta el consumo de los últimos 12 meses, utilizando un promedio móvil.

3.-Límite de alto consumo

El límite de alto consumo se define para cada localidad en función de la tarifa en la que se encuentre clasificada a continuación se muestra la siguiente tabla con el límite de consumo de cada localidad dependiendo de su localización. [11]

Tarifa 1:	250 (doscientos cincuenta)	kWh/mes.
Tarifa 1A:	300 (trescientos)	kWh/mes.
Tarifa 1B:	400 (cuatrocientos)	kWh/mes.
Tarifa 1C:	850 (ochocientos cincuenta)	kWh/mes.
Tarifa 1D:	1,000 (un mil)	kWh/mes.
Tarifa 1E:	2,000 (dos mil)	kWh/mes.
Tarifa 1F:	2,500 (dos mil quinientos)	kWh/mes.

Imagen 33.- Tarifas de consumo de cada localidad según su clasificación.
https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/TarifaDAC.aspx

El marco regulatorio para la instalación de paneles solares bifaciales en México no cuenta con una norma específica y exclusiva para esta tecnología, sino que se rige por las mismas regulaciones que aplican a todas las instalaciones fotovoltaicas, con la consideración de que los diseñadores e instaladores deben aplicar los principios técnicos para maximizar su rendimiento y cumplir con las normas de seguridad.

A continuación, se describen los principales pilares de este marco normativo:

7.22.- Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX).

La base del marco regulatorio en México para las instalaciones fotovoltaicas es la NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización). Esta norma es de carácter obligatorio y establece los requisitos de seguridad que deben cumplir todas las instalaciones eléctricas, incluidas las de energía solar.

- NOM-001-SEDE-2012, Artículo 690: Sistemas Solares Fotovoltaicos. Este es el capítulo más relevante para las instalaciones de paneles solares. Contiene las especificaciones técnicas para el diseño, instalación y seguridad de los sistemas fotovoltaicos. Aunque no menciona explícitamente la tecnología bifacial, los principios que establece (como protección contra sobre corriente, puesta a tierra,

desconectadores y cableado) son aplicables y deben ser seguidos al pie de la letra. [7]

- NMX-J-ANCE: Las Normas Mexicanas (NMX) son de carácter voluntario, pero a menudo referencian los estándares de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), que son la base para la certificación y el aseguramiento de la calidad de los productos. Un ejemplo es la NMX-J-643/1-ANCE-2011, que es equivalente a la norma internacional IEC 60904-1, y se refiere a la medición de la característica corriente-tensión (I-V) de los dispositivos fotovoltaicos. Para los paneles bifaciales, los fabricantes suelen mostrar certificaciones basadas en la norma IEC 60904-1-2, que es la versión específica para módulos bifaciales, lo cual valida la calidad del producto y su medición de potencia.

7.22.1.-Marco de Interconexión y Generación Distribuida

Para las instalaciones que se interconectan a la red de la CFE (Comisión Federal de Electricidad), se deben seguir los procedimientos y regulaciones establecidos por las autoridades del sector energético.

- Manual de Interconexión de Centrales de Generación con Capacidad Menor a 0.5 MW**:** Este documento, emitido por la Secretaría de Energía (SENER) y el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), establece los lineamientos generales para la interconexión de pequeños generadores, incluyendo sistemas fotovoltaicos. El procedimiento de interconexión implica la presentación de un proyecto técnico a la CFE, el cual debe cumplir con los requisitos de la NOM-001-SEDE.

- Especificación CFE G0100-04: Esta especificación técnica de la CFE define los requerimientos para el diseño e instalación de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red de baja tensión, con capacidades de hasta 30 kW. Al igual que con la NOM, los lineamientos de esta especificación se aplican a los sistemas bifaciales, aunque no se haga una distinción explícita.

7.22.1.-Medidas de seguridad basadas en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM

Norma NOM-009-STPS-2011

Esta norma tiene como objetivo establecer medidas de seguridad para trabajos en alturas, como lo es en este caso la instalación de paneles solares.

Esta norma exige que:

1.- Cualquier actividad que se realice en altura, deberá utilizar sistemas de protección debidamente certificados, sobre todo cuando exista la posibilidad de caídas mayores a 1.80 metros.

2.- Asimismo, será necesario instalar líneas de vida horizontales o puntos de anclaje, de acuerdo con el análisis de riesgos correspondiente al área de trabajo.

3.- El personal deberá contar con la capacitación adecuada, emplear el equipo de protección personal (EPP) necesario y mantener una distancia segura para la correcta ejecución de las maniobras.

4.-Es indispensable que la capacitación del personal esté respaldada con la constancia DC-3.

A continuación, se mostrará una tabla extraída de la NOM-009-STPS-2011. [3]

Voltaje (fase a fase) (V)	Distancia mínima de seguridad (m)
Hasta 50 000	3.10
73 000	3.33
85 000	3.45
115 000	3.75
140 000	4.00
230 000	4.90
400 000	6.60
600 000	8.60

Imagen 34.- distancias de seguridad a líneas eléctricas energizadas.

En esta tabla se da a conocer la distancia que debe una persona estar, al estar elaborando trabajos eléctricos.

Otro punto importante que establece la NOM-009-STPS-2011:

Los sistemas de restricción solo deben utilizarse para evitar que el trabajador se acerque a zonas con riesgo de caída, manteniendo una distancia mínima de 1.20 m del borde. Para ello, se emplea un arnés o cinturón de seguridad conectado a una línea de vida fija, sin usarse como sistema de detención de caídas. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo del uso de las líneas de vida y lo que se debe evitar hacer. [4]

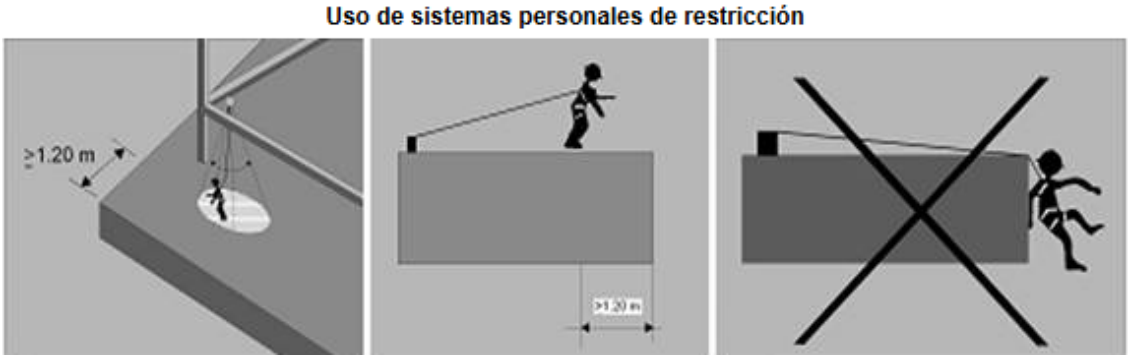


Imagen 35.- Uso de sistemas personales de restricción.

El uso de sistemas personales para detener caídas es obligatorio en trabajos en altura donde no existan protecciones colectivas, como en bordes, estructuras elevadas, andamios mayores a 3.5 m, plataformas y escaleras. Estos sistemas deben incluir lo siguiente:

- Arnés
- Línea de vida
- Conectores
- Absorbedor de energía y anclajes

Además, deben instalarse correctamente por personal capacitado, minimizar la distancia de caída y contar con puntos de anclaje seguros ubicados por encima del

nivel de trabajo. Todas estas medidas de seguridad son parte de la NOM-009-STPS-2011 la cual es importante conocer para evitar algún accidente al realizar instalaciones fotovoltaicas. [4]

En resumen, el marco regulatorio mexicano para los paneles bifaciales no es una serie de leyes y normas dedicadas a esta tecnología, sino que se integra a través de las regulaciones existentes para todas las instalaciones fotovoltaicas.

- Seguridad y Diseño Eléctrico: La base es la NOM-001-SEDE-2012 (INSTALACIONES ELECTRICAS) y la CFE G0100-04 (INTERCONEXIÓN LA RED ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CON CAPACIDAD HASTA 30 kW.)

- Permisos y Trámites: Se deben seguir los procedimientos de interconexión de la CFE, que incluyen la presentación de un proyecto que cumpla con las normas de seguridad.

- Especificaciones del Producto: Se basan en las NMX mexicanas que adoptan los estándares internacionales (IEC), y la validación de la potencia de los módulos bifaciales se realiza bajo certificaciones de laboratorio que aplican la norma IEC 60904-1-2 (describe procedimientos para medir las características de corriente-voltaje (IV) de dispositivos fotovoltaicos bifaciales en luz solar natural o simulada).

Por lo tanto, cualquier proyecto de paneles bifaciales en México requiere un diseño cuidadoso que incorpore las mejores prácticas de la industria, asegurándose de que la instalación final cumpla con todos los requisitos de seguridad y de interconexión establecidos por las autoridades mexicanas.

7.23.-Simulación por PVsyst.

Para el dimensionamiento en PVsyst de la instalación ya se han calculado y seleccionado los parámetros en cantidad y equipos como modelo de inversor y módulos fotovoltaicos, así como también una vez obtenida la información del sitio, se

creó un nuevo proyecto en PVsyst seleccionando la modalidad de sistema fotovoltaico conectado a la red (Grid Connected System).

Como primera etapa se recopiló la información geográfica y meteorológica correspondiente al lugar donde se proyectó la instalación fotovoltaica. Para ello se obtuvieron los siguientes parámetros por medio de:

- Latitud y longitud del sitio.
- Altitud sobre el nivel del mar.
- Zona horaria.
- Irradiación solar global.
- Temperatura ambiente promedio.
- Velocidad del viento (cuando estuvo disponible).

Datos meteorológicos

Lo primero que debemos ver en el simulador es los datos meteorológicos ya que se pueden obtener de manera manual o también a través de PVsyst cabe la posibilidad de obtener diferentes fuentes de datos, sin embargo, es necesario empezar con el emplazamiento del sitio de instalación.

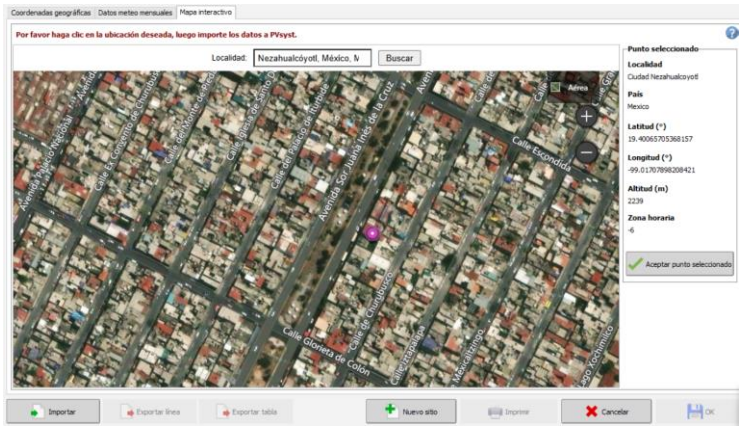


Imagen 36.- selección del sitio de instalación

Selección de fuentes de datos meteorologicos en los cuales se pueden importar los generados atravez de la pagina de NASA POWER o comparar.

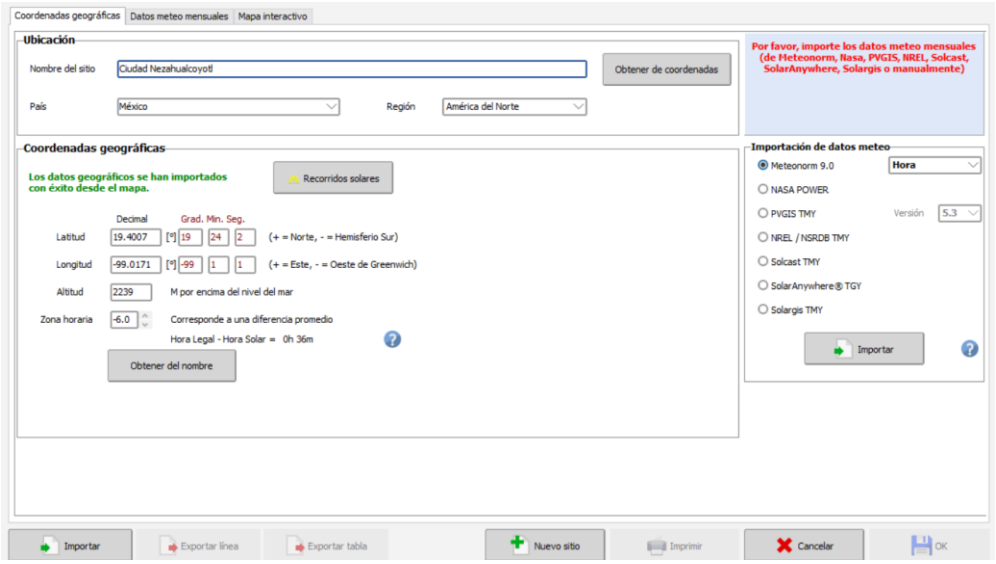


Imagen 37.- parámetros de emplazamiento por medios de coordenadas geográficas y selección de fuente de datos meteorológicos.

Una vez seleccionado los parámetros de emplazamiento del sitio y selección de fuente de datos meteorológicos se procede a seleccionar la base de datos por la NASA dado a que en el dimensionamiento se realizaron los cálculos con esta fuente.

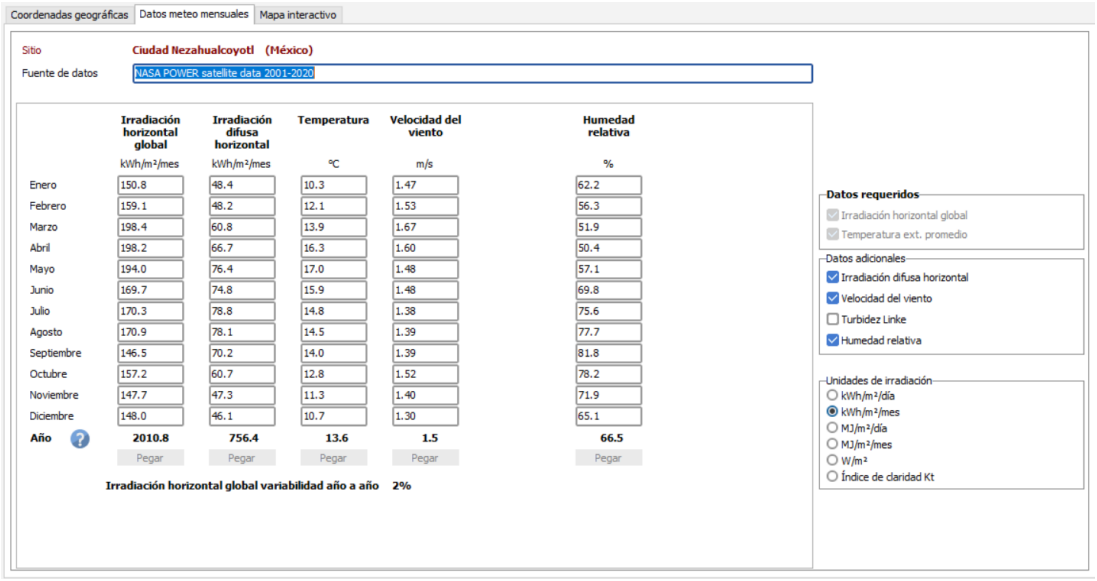


Imagen 38.- Datos meteorológicos por medio de la fuente de la nasa.

Orientación

En esta etapa se establecieron las características físicas del arreglo fotovoltaico, considerando:

- Inclinación de los módulos.
- Ángulo de orientación (azimut).
- Tipo de montaje.
- Altura de instalación.
- Separación entre filas (cuando fue necesaria).
- Valor de albedo del terreno.

Estos parámetros permiten que el software determine la cantidad de radiación incidente sobre la superficie del generador durante todo el año.

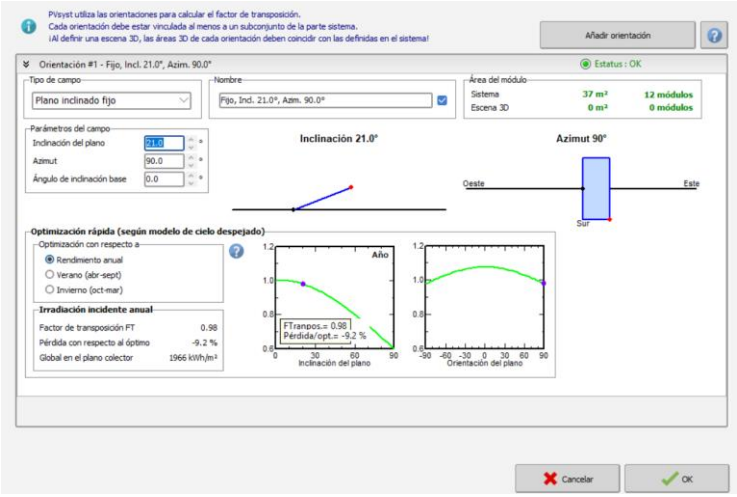


IMAGEN 39.- orientación e inclinación de los módulos

Sistema

A continuación, se introducirá los parámetros seleccionados para la instalación fotovoltaica de los cuales están conformado por el inversor y los módulos que se van a configurar los strings y el número de módulos.

Selección y configuración de los módulos.

Posteriormente se seleccionó el módulo fotovoltaico desde la biblioteca de componentes de PVsyst. En caso de no encontrarse disponible, se pueden ingresar manualmente las especificaciones técnicas del fabricante, incluyendo:

- Potencia nominal.
- Voltaje de circuito abierto (Voc).
- Corriente de cortocircuito (Isc).
- Voltaje y corriente en el punto de máxima potencia.
- Coeficientes de temperatura.
- Eficiencia del módulo.
- Tipo de tecnología fotovoltaica.

Una vez seleccionado el módulo, se definió el número total de paneles que conforman el sistema, así como la configuración eléctrica de los mismos en serie.

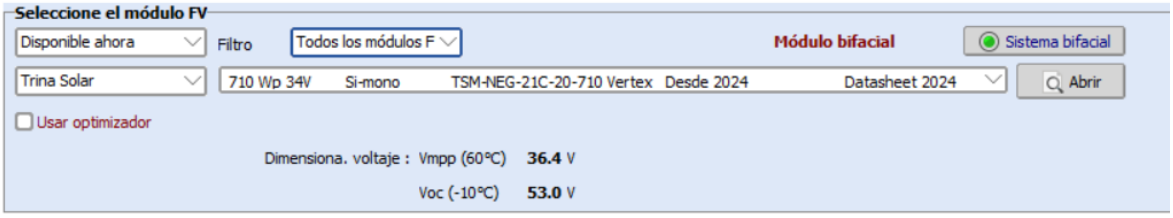


IMAGEN 40.- selección de módulos

Selección y configuración del inversor

Posteriormente se seleccionó el inversor considerando la capacidad instalada del generador fotovoltaico.

Durante esta etapa se verificó la compatibilidad eléctrica entre el arreglo fotovoltaico y el inversor mediante la comprobación de:

- Voltaje máximo permitido por la entrada MPPT.

- Corriente máxima de entrada.
- Rango de operación del MPPT.
- Relación entre la potencia del generador y la potencia nominal del inversor.

El software validó automáticamente que la configuración eléctrica cumpliera con los límites de operación establecidos por el fabricante.



IMAGEN 41.- selección del inversor.

Una vez que se ingresan los parámetros es de vital importancia en el caso de modificar valores importantes en el caso de los modelos bifaciales ya con esto se visualiza mejor rendimiento de ambos.

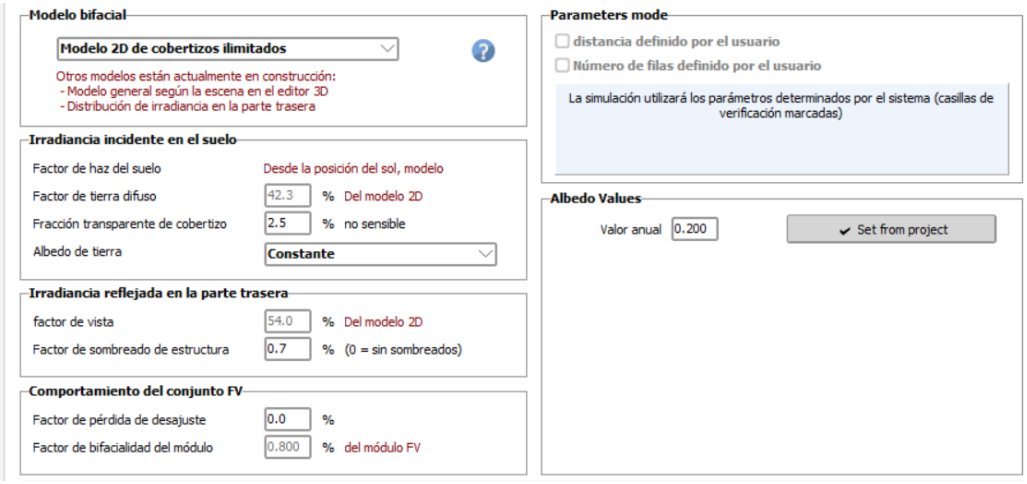


Imagen 42.- Parámetros que afectan a la captación de la parte posterior de nuestros módulos bifaciales.

Como se mostró anterior mente los valores en superficies de concreto el promedio esta entre un 30% y 40% de luz reflejada. Entonces se modifica el valor estándar, por un valor mínimo, en la cual se encontrará los valores mínimos de luz reflejada en superficies de concreto.

También se debe establecer más factores como las cadenas o strings que llevara en el sistema, ya que con el diseño teórico que se lleva con anterioridad se establece que son dos strings y cada una conformado por 6 paneles obteniendo un total de 12 módulos instalados.



Imagen 43.- Configuración de los módulos por inversor

Ya que se establecen todos los parámetros en cuanto a sistema se puede visualizar un apartado de resumen en el cual muestral las características siguientes:

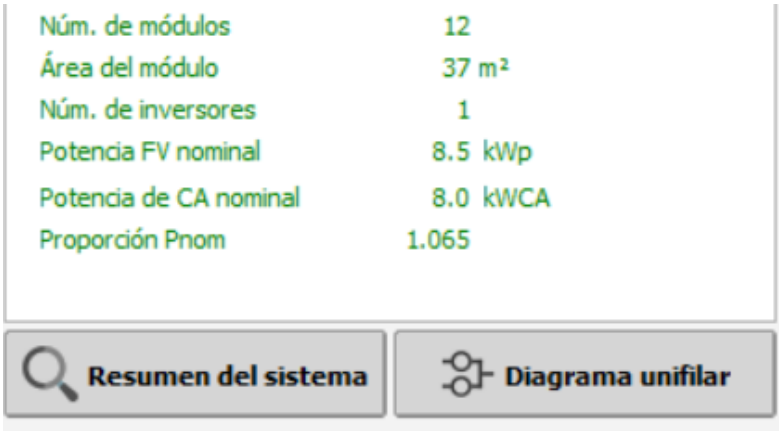


Imagen 44.- Resumen del sistema con opción de obtener un diagrama

Simulación energética

Una vez configurados todos los parámetros del sistema, se ejecutó la simulación anual.

El software realizó el cálculo horario de la producción de energía considerando las condiciones meteorológicas del sitio, la posición solar durante cada día del año y las características eléctricas de los componentes del sistema.

Como resultado se obtuvo la estimación de la generación eléctrica anual, mensual y diaria.

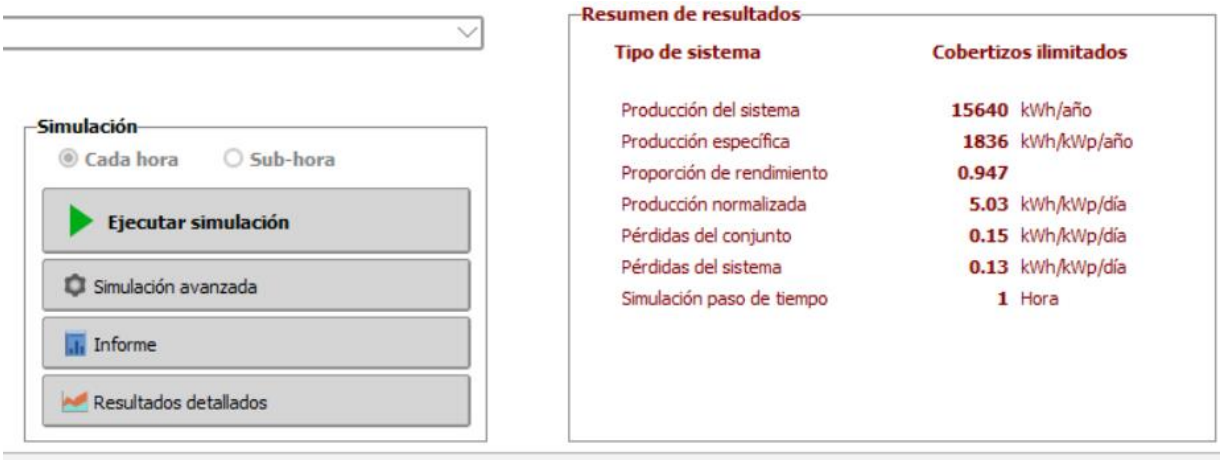


Imagen 44.- Apartado de simulación y resumen general

8.- Resultados y Discuciones.

8.1.-Resultados de la simulación del sistema bifacial.

El sistema fotovoltaico que se analizó y se diseñó para una instalación interconectado a red, cuya configuración geométrica consideró una inclinación de 21°, una altura de montaje de 2 m sobre el nivel del suelo y un coeficiente de albedo de 0.30(este valor siendo un estimado estándar en losas de concreto), mediante el programa PVsyst, utilizando información meteorológica de NASA POWER (2001-2020) para la localidad de Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México. El sistema fue diseñado con una capacidad instalada de 7.78 kWp, sin embargo, es necesario integrar 12 módulos bifaciales Trina Solar Vertex TSM-NEG-21C.20 de 710 W y un inversor Growatt MIN 8000TL-X[E] de 8 kW, con una relación DC/AC de 1.07 para que sen encuentre en equilibrio las cadenas y no estén desbalanceadas.

Los resultados obtenidos indican que el sistema presenta un desempeño satisfactorio durante todo el año, alcanzando una producción anual de energía de 16,764 kWh, equivalente a una producción específica de 1,968 kWh/kWp/año}

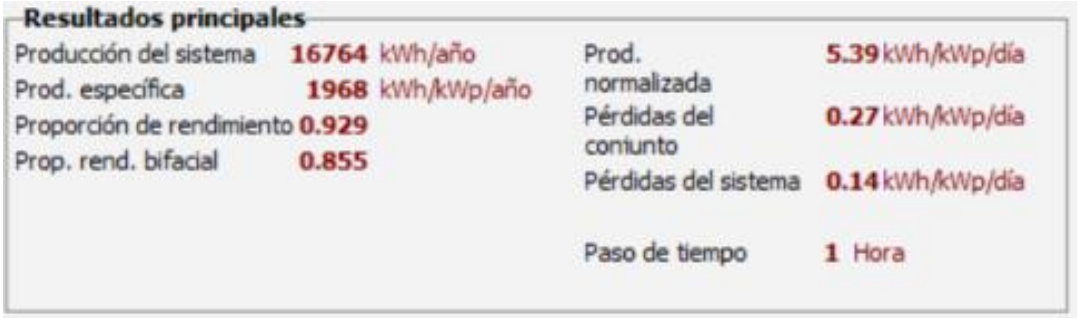


Imagen 45.- Resultados generales de producción anual generados por PVsyst

A continuación, Según PVsyst se puede observar en tabla el índice de rendimiento global de la instalación, así como una gráfica que nos muestra la relación *de rendimiento o performance ratio.*

Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio	PRBifi ratio
January	150.8	48.37	10.25	186.8	181.4	1500	1462	0.919	0.866
February	159.1	48.21	12.10	185.1	180.4	1464	1427	0.905	0.845
March	198.4	60.79	13.93	210.1	204.7	1684	1641	0.917	0.845
April	198.2	66.68	16.26	195.4	189.6	1594	1553	0.933	0.849
May	194.0	76.39	16.97	179.1	173.1	1487	1448	0.949	0.853
June	169.7	74.74	15.90	152.7	146.8	1285	1251	0.962	0.860
July	170.3	78.76	14.79	156.8	150.9	1317	1283	0.960	0.863
August	170.9	78.14	14.54	162.5	156.8	1343	1308	0.944	0.854
September	146.5	70.18	13.95	148.4	143.6	1230	1198	0.947	0.866
October	157.2	60.65	12.84	174.4	169.2	1393	1358	0.914	0.847
November	147.7	47.30	11.29	178.5	173.1	1430	1395	0.917	0.860
December	148.0	46.10	10.67	187.5	181.8	1478	1441	0.902	0.852
Year	2010.7	756.32	13.63	2117.4	2051.4	17205	16764	0.929	0.855

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane	PRBifi	Bifacial Performance Ratio
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

Imagen 46.- Tabla de balance y resultados generales.

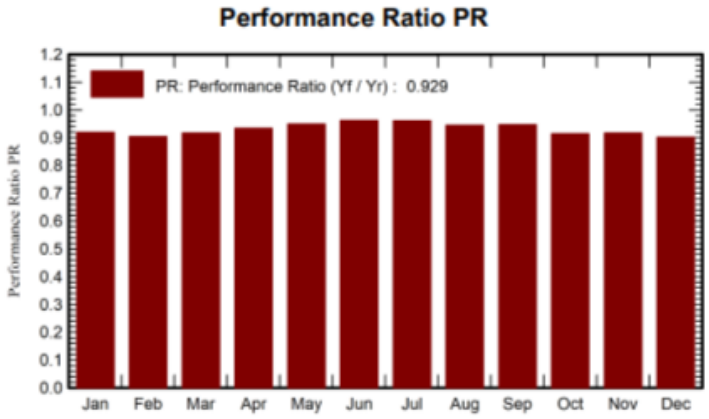


Imagen 47.- Tabla de balance y resultados generales.

De acuerdo con los datos obtenidos el sistema obtuvo un Performance Ratio (PR) de 92.9 %, lo que demuestra un adecuado aprovechamiento de la energía solar disponible bajo las condiciones de diseño consideradas. El índice de desempeño bifacial (PRBifi)

fue de 85.5 %, reflejando la contribución de la captación de irradiancia por la cara posterior de los módulos.

En los meses con mayor generación fueron marzo (1,641 kWh) y abril (1,553 kWh), coincidiendo con los valores más altos de irradiación global incidente (más de 200 kWh/m²). Los meses de menor producción fueron septiembre (1,198 kWh) y junio (1,251 kWh), debido a una mayor nubosidad y menor radiación directa.7

4. Pérdidas del sistema

El diagrama de pérdidas muestra que las principales reducciones de energía se deben a:

- Pérdidas por temperatura: −5.33 %
- Pérdidas por irradiancia: −0.55 %
- Pérdidas por cableado DC: −1.50 %
- Pérdidas por inversor: −2.51 %
- Pérdidas por sombreado: −2.26 %

El sistema mantiene una eficiencia global del 22.86 % a condiciones estándar (STC).

Conclusiones técnicas

- El sistema bifacial presenta un rendimiento superior al 85 %, lo que confirma su viabilidad para zonas urbanas con buena irradiación solar.
- La bifacialidad aporta un incremento notable en la captación de energía, especialmente en meses de alta reflectancia del suelo

8.2.-Comparación entre sistema monofacial y bifacial.

Con el objetivo de evaluar el impacto del uso de módulos bifaciales en el rendimiento energético del sistema fotovoltaico, se realizó una comparación entre dos configuraciones de simulación bajo condiciones idénticas de instalación. Dichas simulaciones fueron desarrolladas mediante el software especializado PVsyst el cual permite estimar la producción energética de sistemas fotovoltaicos considerando variables como radiación solar, orientación, inclinación de los módulos y posibles pérdidas por sombreado.

En la primera configuración se emplearon módulos monofaciales, los cuales únicamente captan la radiación solar en su cara frontal. En la segunda configuración se utilizaron módulos bifaciales, capaces de aprovechar la radiación solar incidente tanto en la cara frontal como en la parte posterior del módulo.

Para garantizar una comparación objetiva entre ambas tecnologías, las dos simulaciones se realizaron bajo las mismas condiciones de diseño, considerando la misma ubicación geográfica, orientación de los módulos, inclinación, separación entre filas y configuración del inversor. De esta manera, el único factor variable dentro del análisis fue el tipo de módulo fotovoltaico utilizado.

Los resultados obtenidos en la simulación mostraron que el sistema con módulos bifaciales presentó una mayor generación energética anual en comparación con el sistema monofacial. De acuerdo con los datos obtenidos, el sistema monofacial alcanzó una generación aproximada de 15785 kW anuales.

Resumen de resultados

Paso de simulación	Cada hora				
Energía producida	15785 kWh/año	Producción específica	1853 kWh/kWp/año	Proporción rend. PR	86.85 %

Imagen 48.- Resultados generales de producción de la simulación de sistema monofaciales en las mismas condiciones

Mientras que el sistema bifacial como vimos en los resultados anteriores registró una producción energética de aproximadamente 16764 kW al año.

En la siguiente tabla podemos observar las diferencias que nos muestra el simulador PVsyst

Aspecto	Sistema Bifacial	Sistema Monofacial	Diferencia
Energía anual inyectada (E_Grid)	16,764 kWh/año	15,785 kWh/año	+979 kWh (+6.2 %)
Producción específica	1,968 kWh/kWp/año	1,853 kWh/kWp/año	+115 kWh/kWp/año
Performance Ratio (PR)	92.93 %	86.85 %	+6.08 %
PR bifacial (PRBifi)	85.46 %	—	—
Irradiación efectiva anual (GlobEff)	2,051.4 kWh/m²	2,084.9 kWh/m²	Monofacial ligeramente mayor
Mes de mayor generación	Marzo (1,641 kWh)	Marzo (1,557 kWh)	Bifacial +84 kWh
Mes de menor generación	Septiembre (1,198 kWh)	Septiembre (1,118 kWh)	Bifacial +80 kWh

Tabla 3.- Tabla de comparativa de resultados entre módulos bifaciales y monofaciales.

- Generación anual: El sistema bifacial produce casi 1 MWh adicional al año, lo que representa un incremento del 6.2 % respecto al monofacial.
- Eficiencia global: El PR del bifacial es superior, lo que indica un mejor aprovechamiento de la radiación solar y menores pérdidas relativas.
- Captación trasera: El bifacial logra este rendimiento extra, gracias a la reflexión del suelo (albedo) y la captación por la cara posterior de los módulos, incluso cuando la irradiación efectiva frontal es ligeramente menor que en el monofacial.

- Estacionalidad: Ambos sistemas muestran picos de generación en primavera (marzo–abril) y mínimos en verano–otoño (junio–septiembre). Sin embargo, el bifacial mantiene una ventaja constante en todos los meses.
- Pérdidas: El monofacial presenta mayores pérdidas por temperatura y colección (0.64 kWh/kWp/día frente a 0.27 en el bifacial), lo que explica parte de la diferencia en PR.

8.3.-Discusión de resultados

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación permiten analizar el comportamiento de un sistema fotovoltaico bifacial interconectado a la red bajo las condiciones particulares del sitio de estudio. A partir del dimensionamiento eléctrico y de la simulación realizada mediante PVsyst, fue posible identificar el efecto que tienen diferentes factores de diseño sobre la producción energética y comparar el desempeño de los módulos bifaciales con respecto a los módulos monofaciales.

Al comparar ambas tecnologías bajo las mismas condiciones de ubicación, orientación, inclinación, separación entre filas y configuración del inversor, se observó una diferencia favorable para los módulos bifaciales. El sistema monofacial alcanzó una generación anual de 15,785 kWh, mientras que el sistema bifacial produjo 16,764 kWh. Esto representa un incremento de 979 kWh al año, equivalente aproximadamente a un 6.2 % adicional de energía. Debido a que las condiciones de diseño fueron mantenidas constantes, esta diferencia puede relacionarse principalmente con la capacidad de los módulos bifaciales para aprovechar la radiación que llega a su cara posterior.

Finalmente, los resultados permiten considerar que la selección entre módulos monofaciales y bifaciales no debe realizarse únicamente tomando como referencia la potencia nominal del módulo. Es necesario analizar las características específicas del lugar donde se instalará el sistema, principalmente el albedo, la altura de montaje, la orientación, la inclinación, las sombras y la separación entre módulos. En este sentido, la simulación mediante PVsyst constituye una herramienta útil para anticipar el comportamiento energético del sistema antes de llevar a cabo su instalación física.

En términos generales, los resultados obtenidos respaldan la utilización de módulos bifaciales en el caso de estudio, debido a que se obtuvo una generación anual superior y un mejor Performance Ratio respecto al sistema monofacial. Sin embargo, también se demuestra que las ventajas de esta tecnología dependen directamente de las condiciones de diseño e instalación. Por ello, para futuras aplicaciones residenciales sería conveniente realizar un análisis previo detallado del sitio y evaluar diferentes configuraciones de altura, separación, orientación y albedo con el propósito de determinar aquella que permita obtener el mayor aprovechamiento posible de la radiación solar.

9.-Conclusiones.

La investigación realizada permitió analizar el comportamiento y rendimiento de un sistema fotovoltaico bifacial interconectado a la red eléctrica, comparándolo con un sistema monofacial bajo condiciones similares de instalación. Los resultados obtenidos muestran de manera consistente que la tecnología bifacial ofrece un mayor aprovechamiento energético y una generación anual superior, consolidándose como una alternativa más eficiente frente a los sistemas tradicionales.

El sistema bifacial demostró una producción anual de 16,764 kWh, superando en casi 1 MWh al sistema monofacial, que alcanzó 15,785 kWh. Este incremento, equivalente a un 6.2 % más de energía, refleja la capacidad de los módulos bifaciales para captar radiación tanto por la cara frontal como por la posterior, lo que se traduce en un mejor desempeño global. Además, el Performance Ratio (PR) del bifacial fue de 92.93 %, significativamente mayor al 86.85 % del monofacial, confirmando una mayor eficiencia en la conversión de la irradiancia en energía útil.

Si bien la irradiación efectiva frontal fue ligeramente mayor en el sistema monofacial, el bifacial logró compensar esta diferencia gracias al aporte de la radiación reflejada en la parte trasera del módulo. Esto evidencia que, incluso en escenarios residenciales con condiciones de reflectancia moderada, la tecnología bifacial puede ofrecer ventajas tangibles en términos de generación y eficiencia.

En un contexto más amplio, los sistemas bifaciales presentan un potencial aún mayor en instalaciones industriales o comerciales, donde las condiciones de montaje como estructuras elevadas, superficies altamente reflectantes o el uso de seguidores solares permiten maximizar la captación trasera y reducir las pérdidas por sombra. Sin embargo, los resultados de esta investigación demuestran que incluso en aplicaciones residenciales, los módulos bifaciales superan a los monofaciales en rendimiento energético.

En conclusión, la implementación de módulos bifaciales representa una opción más eficiente y rentable para proyectos fotovoltaicos interconectados a la red. Su capacidad

de generar más energía y aprovechar mejor la irradiancia disponible los posiciona como una tecnología con ventajas claras frente a los sistemas monofaciales, y su evolución futura promete ampliar aún más su viabilidad en distintos sectores, desde el residencial hasta el industrial.

10.- BIBLIOGRAFIAS.

[1] C. O. y. R. Arivilca, «Conceptos basicos,» de *Energia Solar Fotovoltaica* , Peru , Green Energy y ded , 2010, p. 50.

[2] G. E. Harper, EL ABC DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS, Primera ed., MEXICO: LIMUSA, 2018.

[3] «SGM(Safety Group Mexico),» 2016. [En línea]. Available: https://sgmx.mx/seguridad-paneles-solares/?v=b045741c8e2f. [Último acceso: 19 Marzo 2026].

[4] J. L. A. S. D. T. Y. P. SOCIAL, «Norma Oficial Mexicana NOM-009-STPS-2011, Condiciones de seguridad para realizar trabajos en altura,» 2011. [En línea]. Available: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4377/stps/stps.htm. [Último acceso: 19 Marzo 2026].

[5] J. CANTOS SERRANO, Configuracion de las instalaciones solares fotovoltaicas, Ediciones Paraninfo, S.A. ed., españa: Ediciones Paraninfo, S.A., 2016.

[6] «AEMET,» [En línea]. Available: https://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf.

[7] «solarpedia.com,» 2012. [En línea]. Available: https://www.solarpedia.info/.

[8] «GREEN LUX ENERGIA SOLAR,» [En línea]. Available: https://www.greenlux.com.mx/paneles-solares-monterrey/tarifas-cfe-para-casa-negocio-y-sus-costos/#:~:text=La%20tarifa%20PDBT%20est%C3%A1%20por,estas%20tarifas%20tambi%C3%A9n%20son%20rentables. [Último acceso: 5 Julio 2025].

[9] «CFE,» 2025. [En línea]. Available: https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/TarifaDAC.aspx. [Último acceso: 10 Julio 2025].

[10] J. M. B. A. G. &. O. L. S. Oviedo-Salazar, Historia y Uso de Energías Renovables, N.L., México: International Journal of Good Conscience., 18. Abril 2015.

[11] A. Sánchez, Historia de la energía solar en México, 2ª ed., MEXICO: UNAM, 2012.

[12] «Gobierno de Mexico,» Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 20 Marzo 2014. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/energia-termica-calentamiento-solar-de-agua. [Último acceso: 5 Septiembre 2025].

[13] «el blog energia,» 3 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://elblogenergia.com/energiasolar/energia-solar-termica. [Último acceso: 5 Septiembre 2025].

[14] C. A. B. y. R. B. y. Brown, «Energia del Sol,» *Ciencia ,* nº 10, p. 8, 2010.

[15] «HelioEsfera,» Febrero 2025. [En línea]. Available: https://www.helioesfera.com/diferencia-entre-efecto-fotoelectrico-y-efecto-fotovoltaico/. [Último acceso: 20 Agosto 2025].

[16] «Solarnplus,» 3 febrero 2025. [En línea]. Available: https://www.solarnplus.com/unlocking-the-potential-understanding-the-technology-behind-bifacial-solar-panels/. [Último acceso: 10 Noviembre 2025].

[17] F. Padilla, «Generación Distribuida en México, ¿Cómo Vamos? RIC Energy - Suministro De Energía,» 2021. [En línea]. Available: https://www.ric.mx/cultura/energia/generacion-distribuidaen-mexico/ .

[18] M. B. &. V. M. C. López, El ABC de las energias renovables en los sistemas electricos, 201.

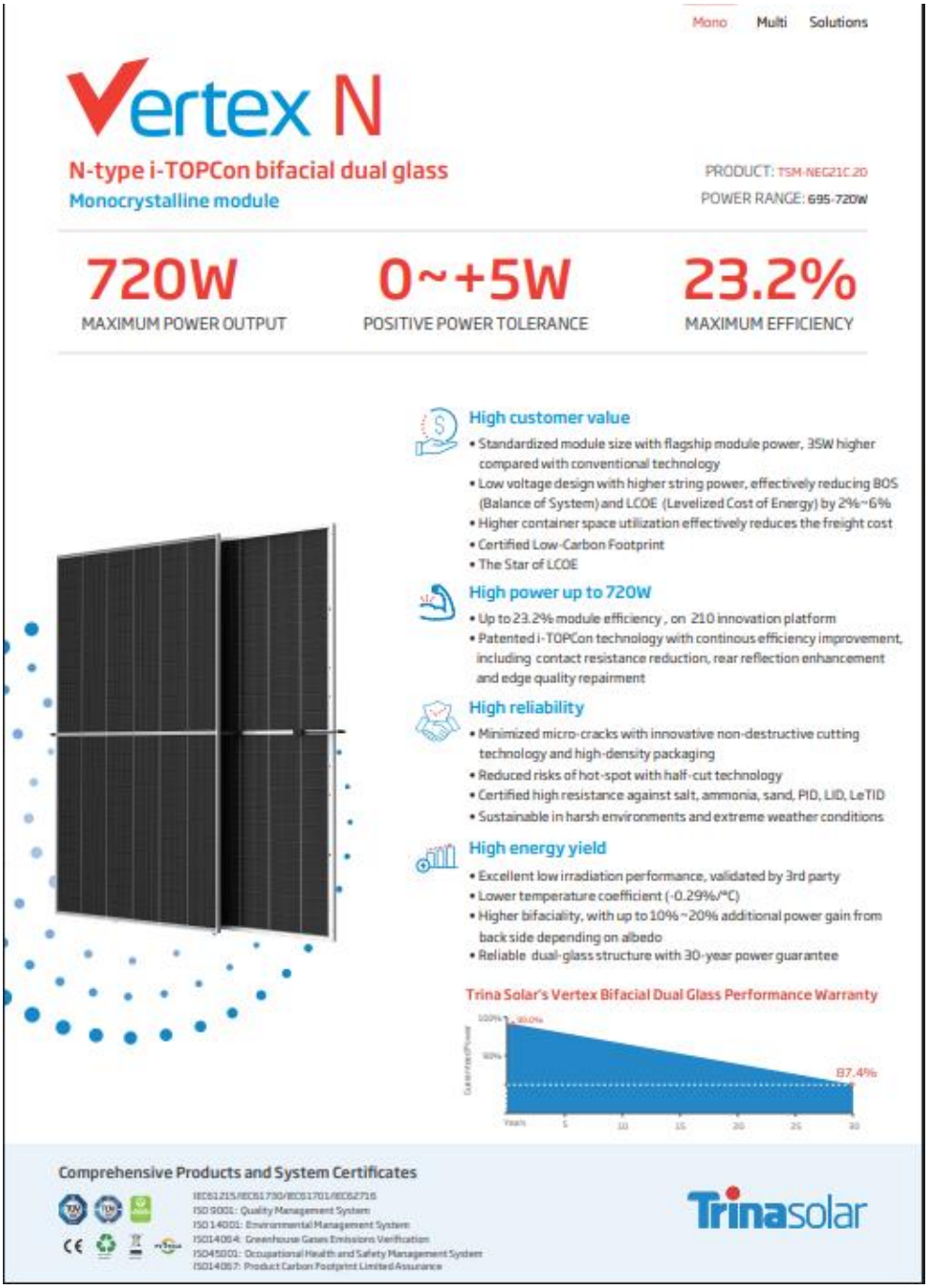
[19] P. G. Martín, Instalaciones solares fotovoltaicas., 2022.

[20] Marcombo, Energía solar fotovoltaica para todos 2ED, 2013.

[22] «GROTTWAT PROVVEDOR,» [En línea]. Available: https://latam.growatt.com/products/min-7000-10000tl-x2.

11.-Anexos.

ANEXO. - 1 FICHAS TECNICAS Y CERTIFICACIONES



Mono Multi Solutions

Vertex N

N-type i-TOPCon bifacial dual glass
Monocrystalline module

PRODUCT: TSM-NEG21C.20
POWER RANGE: 695-720W

720W
MAXIMUM POWER OUTPUT

0~+5W
POSITIVE POWER TOLERANCE

23.2%
MAXIMUM EFFICIENCY

High customer value
- Standardized module size with flagship module power, 35W higher compared with conventional technology
- Low voltage design with higher string power, effectively reducing BOS (Balance of System) and LCOE (Levelized Cost of Energy) by 2%~6%
- Higher container space utilization effectively reduces the freight cost
- Certified Low-Carbon Footprint
- The Star of LCOE

High power up to 720W
- Up to 23.2% module efficiency , on 210 innovation platform
- Patented i-TOPCon technology with continous efficiency improvement, including contact resistance reduction, rear reflection enhancement and edge quality repairment

High reliability
- Minimized micro-cracks with innovative non-destructive cutting technology and high-density packaging
- Reduced risks of hot-spot with half-cut technology
- Certified high resistance against salt, ammonia, sand, PID, LID, LeTID
- Sustainable in harsh environments and extreme weather conditions

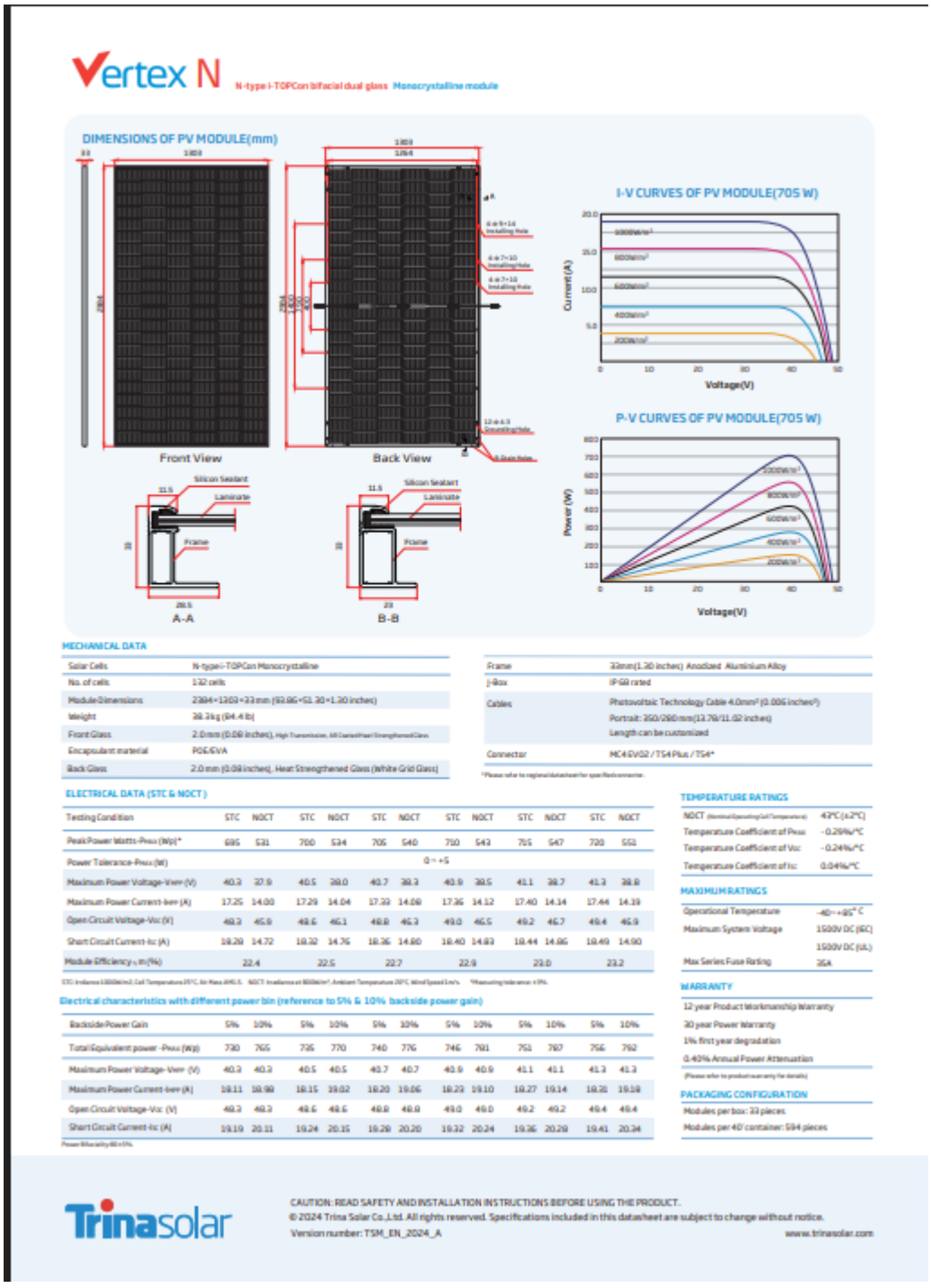
High energy yield
- Excellent low irradiation performance, validated by 3rd party
- Lower temperature coefficient (-0.29%/°C)
- Higher bifaciality, with up to 10%~20% additional power gain from back side depending on albedo
- Reliable dual-glass structure with 30-year power guarantee

Trina Solar's Vertex Bifacial Dual Glass Performance Warranty

Comprehensive Products and System Certificates

IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716
ISO 9001: Quality Management System
ISO 14001: Environmental Management System
ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification
ISO45001: Occupational Health and Safety Management System
ISO14067: Product Carbon Footprint Limited Assurance

Trinasolar



Vertex N

N-type i-TOPCon bifacial dual glass Monocrystalline module

DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)

Front View

Back View

A-A

B-B

I-V CURVES OF PV MODULE(705 W)

Current (A)

Voltage(V)

P-V CURVES OF PV MODULE(705 W)

Power (W)

Voltage(V)

MECHANICAL DATA

Solar Cells	N-type i-TOPCon Monocrystalline
No. of cells	132 cells
Module Dimensions	2384×1303×33 mm (93.86×51.30×1.30 inches)
Weight	38.2 kg (84.4 lb)
Front Glass	2.0 mm (0.08 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	POE/EVA
Back Glass	2.0 mm (0.08 inches), Heat Strengthened Glass (White Grid Glass)

Frame	33mm(1.30 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm² (0.006 inches²) Portrait: 350/280 mm(13.78/11.02 inches) Length can be customized
Connector	MC4 EVO2 / TS4 Plus / TS4*

*Please refer to regional datasheet for specific connector.

ELECTRICAL DATA (STC & NOCT)

Testing Condition	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Peak Power Watts-Pmax (Wp)*	695	531	700	534	705	540	710	543	715	547	720	551
Power Tolerance-Pmax (W)	0~+5											
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	40.3	37.9	40.5	38.0	40.7	38.3	40.9	38.5	41.1	38.7	41.3	38.8
Maximum Power Current-Impp (A)	17.25	14.00	17.29	14.04	17.33	14.08	17.36	14.12	17.40	14.14	17.44	14.19
Open Circuit Voltage-Voc (V)	48.3	45.9	48.6	46.1	48.8	46.3	49.0	46.5	49.2	46.7	49.4	46.9
Short Circuit Current-Isc (A)	18.29	14.72	18.32	14.76	18.36	14.80	18.40	14.83	18.44	14.86	18.49	14.90
Module Efficiency η m (%)	22.4		22.5		22.7		22.9		23.0		23.2	

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. NOCT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s. *Measuring tolerance: ±3%.

Electrical characteristics with different power bin (reference to 5% & 10% backside power gain)

Backside Power Gain	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
Total Equivalent power-Pmax (Wp)	730	765	735	770	740	776	746	781	751	787	756	792
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	40.3	40.3	40.5	40.5	40.7	40.7	40.9	40.9	41.1	41.1	41.3	41.3
Maximum Power Current-Impp (A)	18.11	18.98	18.15	19.02	18.20	19.06	18.23	19.10	18.27	19.14	18.31	19.18
Open Circuit Voltage-Voc (V)	48.3	48.3	48.6	48.6	48.8	48.8	49.0	49.0	49.2	49.2	49.4	49.4
Short Circuit Current-Isc (A)	19.19	20.11	19.24	20.15	19.28	20.20	19.32	20.24	19.36	20.29	19.41	20.34

Power Bifaciality 80 ± 5%.

TEMPERATURE RATINGS

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	42°C (±2°C)
Temperature Coefficient of Pmax	-0.29%/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.24%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.04%/°C

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40~+85° C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC) 1500V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	35A

WARRANTY

12 year Product Workmanship Warranty
30 year Power Warranty
1% first year degradation
0.40% Annual Power Attenuation
(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 33 pieces
Modules per 40' container: 594 pieces

Trinasolar

CAUTION: READ SAFETY AND INSTALLATION INSTRUCTIONS BEFORE USING THE PRODUCT.
© 2024 Trina Solar Co.,Ltd. All rights reserved. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.
Version number: TSM_EN_2024_A
www.trinasolar.com

Imagen 49.- FICHA TECNICA DEL PANEL SOLAR


MIN 7000~10000 TL-X
· Maximum efficiency 98.1%
· 2/3 MPP trackers
· Type II SPD on DC side
· Supports export control
· Touch key and OLED display
GROWATT
POWER
-INGO
TOMO-
RROW
GROWATT
www.ginverter.com

Datasheet	MIN 7000TL-X(E)	MIN 8000TL-X(E)	MIN 9000TL-X	MIN 10000TL-X
Input data (DC)				
Max. recommended PV power (for module STC)	12000W	12000W	13500W	15000W
Max. DC voltage	600V			
Start voltage	100V			
Nominal voltage	360V			
MPP voltage range	60-550V			
No. of MPP trackers	2		3	
No. of PV strings per MPP tracker	1/2		1/1/2	
Max. input current per MPP tracker	13.5A/27A		13.5A/13.5A/27A	
Max. short-circuit current per MPP tracker	16.9A/33.8A		16.9A/16.9A/33.8A	
Output data (AC)				
AC nominal power	7000W	8000W	9000W	10000W
Max. AC apparent power	7000VA	8000VA	9000VA	10000VA
Nominal AC voltage(range*)	Default:240V split-phase, optional:208V & 240V single phase , 183-228@208V 211-264V@240V			
AC grid frequency(range*)	50/60 Hz (45-55Hz/59.5-60.5Hz)			
Max. output current	33.5A	38.3A	43A	45.5A
Adjustable power factor	0.8leading...0.8lagging			
THDi	<3%			
AC grid connection type	Single phase			
Efficiency				
Max.efficiency	98.1%			
European efficiency	97.3%		97.6%	
MPPT efficiency	99.5%			
Protection devices				
DC reverse polarity protection	Yes			
DC switch	Yes			
DC/AC surge protection	Type II / Type III			
Insulation resistance monitoring	Yes			
AC short-circuit protection	Yes			
Ground fault monitoring	Yes			
Grid monitoring	Yes			
Anti-islanding protection	Yes			
Residual-current monitoring unit	Yes			
AFCI protection	Yes			
General data				
Dimensions (W / H / D)	425/387/180mm			
Weight	18.2kg			
Operating temperature range	- 25 °C ... +60 °C			
Nighttime power consumption	< 1W			
Topology	Transformerless			
Cooling	Natural convection			
Protection degree	IP66			
Relative humidity	0-100%			
Altitude	4000m			
DC connection	H4/MC4(Optional)			
AC connection	Cable gland +OT terminal			
Display	OLED+LED/WIFI+APP			
Interfaces: RS485 / USB/WI-FI/ GPRS/ RF/LAN	Yes/Yes/Optional/Optional/Optional /Optional			
Warranty: 5 years / 10 years	Yes/Optional			
CE, IEC 62116, IEC 61727,IEC62109,INMETRO,AS4777,UL1741,IEEE1547				

* The AC voltage and frequency range may vary depending on specific country grid standard.
All specifications are subject to change without notice.

SHENZHEN GROWATT NEW ENERGY CO.,LTD. A: 4-13/F,Building A,Sino-German(Europe)Industrial Park,Hangcheng Ave,Bao'an District,Shenzhen,China
T: + 86 755 2747 1900 F: + 86 755 2749 1460 E: info@ginverter.com

Imagen 50.- Ficha técnica del inversor

intertek
Total Quality. Assured.

AUTHORIZATION TO MARK

This authorizes the application of the Certification Mark(s) shown below to the models described in the Product(s) Covered section when made in accordance with the conditions set forth in the Certification Agreement and Listing Report. This authorization also applies to multiple listee model(s) identified on the correlation page of the Listing Report.

This document is the property of Intertek Testing Services and is not transferable. The certification mark(s) may be applied only at the location of the Party Authorized To Apply Mark.

Applicant:	Shenzhen Growatt New Energy Co., Ltd.	**Manufacturer:**	Guangdong Growatt New EnergyCo., Ltd
Address:	4-13/F, Building A, Sino-German(Europe) Industrial Park, Hangcheng Ave, BAO'AN DISTRICT, Shenzhen	**Address:**	Growatt Industrial Park, No.17Pingheng Road Pingtan Town,Huiyang District, Huizhou, Guangdong
Country:	CHINA	**Country:**	CHINA

Party Authorized To Apply Mark: Same as Manufacturer
Report Issuing Office: Intertek Testing Services Shenzhen Limited Guangzhou Branch

Control Number: *4003184* **Authorized by:** for L. Matthew Snyder, Certification Manager

ETL LISTED US
Intertek

This document supersedes all previous Authorizations to Mark for the noted Report Number.

This Authorization to Mark is for the exclusive use of Intertek's Client and is provided pursuant to the Certification agreement between Intertek and its Client. Intertek's responsibility and liability are limited to the terms and conditions of the agreement. Intertek assumes no liability to any party, other than to the Client in accordance with the agreement, for any loss, expense or damage occasioned by the use of this Authorization to Mark. Only the Client is authorized to permit copying or distribution of this Authorization to Mark and then only in its entirety. Use of Intertek's Certification mark is restricted to the conditions laid out in the agreement and in this Authorization to Mark. Any further use of the Intertek name for the sale or advertisement of the tested material, product or service must first be approved in writing by Intertek. Initial Factory Assessments and Follow up Services are for the purpose of assuring appropriate usage of the Certification mark in accordance with the agreement, they are not for the purposes of production quality control and do not relieve the Client of their obligations in this respect.

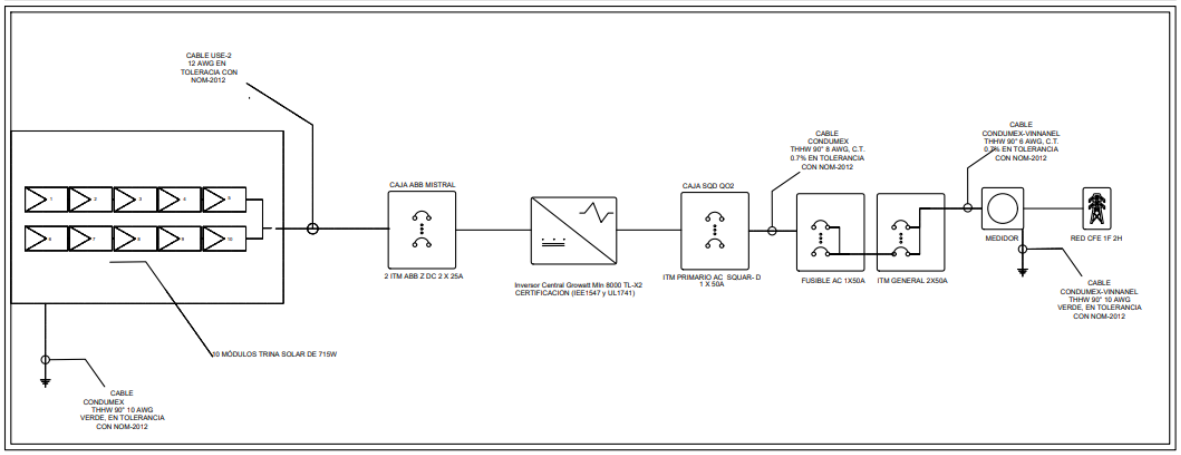
Intertek Testing Services NA Inc.
545 East Algonquin Road, Arlington Heights, IL 60005
Telephone 800-345-3851 or 847-439-5667 Fax 312-283-1672

Standard(s):	Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for use with Distributed Energy Resources [UL 1741:2021 Ed.3] Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems (R2008) [IEEE 1547:2003] Amendment 1 to IEEE 1547 - Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems [IEEE 1547a:2014] IEEE Standard Conformance Test Procedures For Equipment Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems [IEEE 1547.1:2005]
Product:	PV Grid Inverter
Brand Name:	GROWATT
Models:	MIN 2500TL-X, MIN 3000TL-X, MIN 3600TL-X, MIN 4200TL-X,MIN 4600TL-X, MIN 5000TL-X, MIN 6000TL-X MIN 2500TL-X2, MIN 3000TL-X2, MIN 3600TL-X2, MIN 4200TL-X2,MIN 4600TL-X2, MIN 5000TL-X2, MIN 6000TL-X2

IMAGEN 53.- CERTIFICACION DE INVERSOR CENTRAL

ANEXO 2 DIAGRAMA Y RESULTADOS DE LA SIMULACION

VALENTIN SOTO G
RPU: 9890 2040 3138
NOTARIA 28 Av. Sor Juana Inés de La Cruz 411, Evolucion, 57700 Cdad. Nezahualcóyotl, Méx.



Module Specifications	
5 MÓDULOS TRINA SOLAR 715W BIFACIAL	
STC Rating	715 W
Vmp	41.1V
Imp	17.40A
Voc	49.2 V
Isc	18.40 A

INVERSOR CENTRAL	
GROTWARE MIN TL-X2	
Max Potencia FV Recomendada	8000 W
Max Input Voltage	600V
Maxima Corriente de Entrada	18 A
Min Input Voltage	80V

Wire Schedule DC		
Tier	Wire	Length
USE- 2	12 AWG	30 METROS

Wire Schedule AC		
Tier	Wire	Length
VINNANEL THHW 90°	10 AWG	25 METROS

SIMBOLOGIA	
	Módulo fotovoltaico
	Tierra física
	Interruptor termomagnético
	Microinversor
	Medidor CFE
	Red de CFE

Imagen 52.- DIAGRAMA DE LA INTALACION Y COMPONENTES

Proyecto: notaria 28
Variante: bifacial 710

PVsyst V8.1.3
VC0, Fecha de simulación:
26/07/26 19:23
con V8.1.3

PVsyst PRUEBA

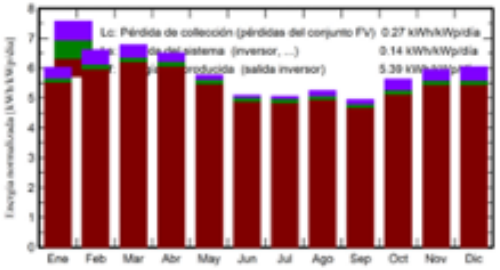
Resultados principales

Paso de simulación
Cada hora

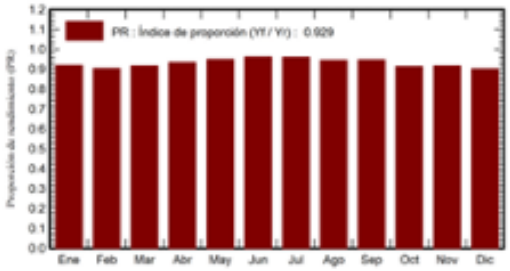
Producción del sistema

Energía producida	16764 kWh/año	Producción específica	1968 kWh/kWp/año
		Proporción rend. PR	92.93 %
		Prop. rend. bifacial	85.46 %

Producciones normalizadas (por kWp instalado)



Proporción de rendimiento (PR)



Balances y resultados principales

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR proporción	PRBifi proporción
Enero	150.8	48.37	10.25	186.8	181.4	1500	1462	0.919	0.866
Febrero	159.1	48.21	12.10	185.1	180.4	1464	1427	0.905	0.845
Marzo	198.4	60.79	13.93	210.1	204.7	1684	1641	0.917	0.845
Abril	198.2	66.68	16.26	195.4	189.6	1594	1553	0.933	0.849
Mayo	194.0	76.39	16.97	179.1	173.1	1487	1448	0.949	0.853
Junio	169.7	74.74	15.90	152.7	146.8	1285	1251	0.962	0.860
Julio	170.3	78.76	14.79	156.8	150.9	1317	1283	0.960	0.863
Agosto	170.9	78.14	14.54	162.5	156.8	1343	1308	0.944	0.854
Septiembre	146.5	70.18	13.95	148.4	143.6	1230	1198	0.947	0.866
Octubre	157.2	60.65	12.84	174.4	169.2	1393	1358	0.914	0.847
Noviembre	147.7	47.30	11.29	178.5	173.1	1430	1395	0.917	0.860
Diciembre	148.0	46.10	10.67	187.5	181.8	1478	1441	0.902	0.852
Año	2010.7	756.32	13.63	2117.4	2051.4	17205	16764	0.929	0.855

Leyendas

GlobHor	Irradiación horizontal global	EArray	Energía efectiva a la salida del conjunto
DiffHor	Irradiación difusa horizontal	E_Grid	Energía inyectada en la red
T_Amb	Temperatura ambiente	PR	Proporción de rendimiento
GlobInc	Global incidente plano receptor	PRBifi	Coeficiente de rendimiento bifacial
GlobEff	Global efectivo, corr. para IAM y sombreados		

Imagen 53.- Resultados del sistema bifacial.

PVsyst V8.1.3
VC1, Fecha de simulación:
26/07/26 18:46
con V8.1.3

PVsyst PRUEBA

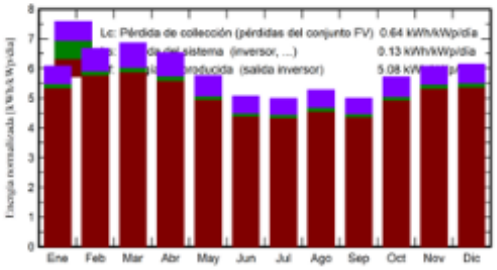
Resultados principales

Paso de simulación
Cada hora

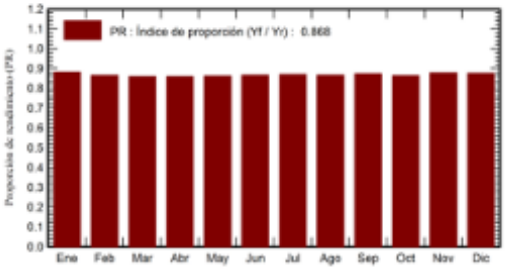
Producción del sistema

Energía producida	15785 kWh/año	Producción específica	1853 kWh/kWp/año
		Proporción rend. PR	86.85 %

Producciones normalizadas (por kWp instalado)



Proporción de rendimiento (PR)



Balances y resultados principales

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR proporción
Enero	150.8	48.37	10.25	188.4	185.0	1452	1416	0.882
Febrero	159.1	48.21	12.10	187.1	183.7	1415	1379	0.865
Marzo	198.4	60.79	13.93	212.7	208.3	1597	1557	0.859
Abril	198.2	66.68	16.26	195.8	191.1	1471	1433	0.859
Mayo	194.0	76.39	16.97	178.5	173.9	1346	1311	0.862
Junio	169.7	74.74	15.90	152.2	147.7	1154	1124	0.867
Julio	170.3	78.76	14.79	154.8	150.3	1180	1148	0.870
Agosto	170.9	78.14	14.54	163.6	159.2	1241	1208	0.866
Septiembre	146.5	70.18	13.95	150.1	146.5	1148	1118	0.874
Octubre	157.2	60.65	12.84	177.0	173.3	1337	1303	0.864
Noviembre	147.7	47.30	11.29	182.4	178.8	1399	1365	0.878
Diciembre	148.0	46.10	10.67	190.6	187.1	1458	1422	0.876
Año	2010.7	756.32	13.63	2133.2	2084.9	16198	15785	0.868

Leyendas

GlobHor	Irradiación horizontal global	EArray	Energía efectiva a la salida del conjunto
DiffHor	Irradiación difusa horizontal	E_Grid	Energía inyectada en la red
T_Amb	Temperatura ambiente	PR	Proporción de rendimiento
GlobInc	Global incidente plano receptor		
GlobEff	Global efectivo, corr. para IAM y sombreados		

Imagen 54.- Resultados del sistema monofacial.