



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD

**Implementación de un Sistema Fotovoltaico  
Bifacial para un Negocio con Alto Consumo**

TESIS

Que para obtener el título de Ingeniero en Energía y  
Sustentabilidad

Presenta

Jonathan Adán Mejía Martínez

Director

Dr. Antonio Ramos Paz

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer es uno de los actos más importantes para mí, y en un trabajo de práctica tan arduo y especial hay algunas personas a las cuales agradecer.

Agradezco primeramente a mi asesor, el Dr. Antonio Ramos Paz, pues sin su guía, su accesibilidad y su invaluable ayuda, este trabajo no hubiera sido posible.

Quiero agradecer a la empresa e-pro por haberme permitido hacer mis prácticas profesionales y enseñarme bastantes cosas como de instalación de paneles, así como de instalaciones eléctricas en residencias.

También quiero agradecer a mis profesores de la Carrera de Ingeniería en Energía y Sustentabilidad, por los conocimientos que me brindaron.

Agradecer asimismo a mi familia, el núcleo que me ha apoyado a lo largo de mi carrera, que se enorgullece conmigo de mis logros y me brinda total respaldo.

Quiero agradecer a todos mis amigos, a mis compañeros de escuela, a las personas, que se han convertido en parte muy importante de mi vida, a todos ellos vayan mis más sinceros agradecimientos, pues de una u otra forma, contribuyeron con esta investigación.

## INDICE

RESUMEN .....	V
ABSTRACT.....	VI
DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS .....	VII
CAPÍTULO 1.....	- 1 -
INTRODUCCIÓN Y ENERGÍA SOLAR .....	- 1 -
1.1 Introducción .....	- 1 -
1.2 Objetivo.....	- 2 -
1.3 Objetivos Particulares.....	- 2 -
1.4 Justificación.....	- 2 -
1.5 Hipótesis.....	- 3 -
1.6 Metodología .....	- 3 -
1.7 Fuentes de Energías Renovables o Alternativas. ....	- 4 -
1.7.1 Ventajas de las Energías Renovables .....	- 4 -
1.7.2 Inconvenientes de las Energías Renovables.....	- 5 -
1.8 Energía Solar Fotovoltaica .....	- 5 -
1.8.1 Irradiancia e Irradiación.....	- 6 -
1.9 Radiación Solar en México .....	- 8 -
1.10 Distribución del Recurso Solar en Zinapécuaro.....	- 10 -
1.11 Horas Solares Pico en la Zona de Zinapécuaro.....	- 11 -
CAPÍTULO 2.....	- 12 -
CELDAS Y PANELES SOLARES .....	- 12 -
2.1 Efecto Fotovoltaico .....	- 12 -
2.2 Elementos de Una Celda Fotovoltaica .....	- 13 -
2.2.1 Principios de Funcionamiento de una Celda Solar Fotovoltaica .....	- 14 -
2.2.3 Tipos de Celdas Solares.....	- 15 -
2.3 Representación de un Panel Solar Fotovoltaico.....	- 17 -
2.3.1 Características Eléctricas de un Panel.....	- 19 -
2.3.2 Panel Solar Bifacial .....	- 20 -
2.3.3 Eficiencia de Conversión de un Panel Solar Fotovoltaico .....	- 22 -
2.4 Procedimiento para Realizar un Contrato de Conexión a la Red. ....	- 23 -

2.4.1 Trámites para Realizar el Contrato de Conexión a la Red .....	- 23 -
CAPÍTULO 3.....	- 25 -
SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA .....	- 25 -
3.1 Sistema de Generación Fotovoltaica.....	- 25 -
3.2 Clasificación de Sistemas de Generación Fotovoltaica.....	- 25 -
3.3 Elementos de un Sistema de Generación Fotovoltaico Aislado de la Red. ....	- 25 -
3.4 Elementos de un Sistema de Generación Fotovoltaico Interconectado a la Red. ....	- 26 -
3.5 Factores de Pérdidas Energéticas en los Sistemas de Generación Fotovoltaica .....	- 28 -
3.5.1 Pérdidas por no Cumplimiento de la Potencia Nominal. ....	- 28 -
3.5.2 Pérdidas Debido al Envejecimiento. ....	- 28 -
3.5.3 Pérdidas de Mismatch o Acoplamiento. ....	- 29 -
3.5.4 Pérdidas por Polvo y Suciedad. ....	- 29 -
3.5.5 Pérdidas por Caídas de Tensión en el Cableado. ....	- 30 -
3.5.6 Pérdidas por Temperatura. ....	- 30 -
3.5.7 Pérdidas por Sombreado del Sistema de Generación Fotovoltaico. ....	- 30 -
3.5.8 Pérdidas por Rendimiento del Inversor.....	- 31 -
3.6 Seguridad Eléctrica en Sistemas de Generación Fotovoltaica .....	- 31 -
3.6.1 Protección para las Personas.....	- 31 -
3.6.2 Protección de los Equipos.....	- 33 -
3.6.3 Protección contra Cortocircuito y Sobretensiones en CD .....	- 34 -
3.6.4 Protecciones contra Cortocircuito y Sobretensiones en CA .....	- 34 -
3.7 Mantenimiento de Sistemas Fotovoltaicos .....	- 35 -
3.7.1 Mantenimiento: Función, Objetivos y Tipos .....	- 35 -
3.7.2 Mantenimiento Preventivo Para un Sistema de Generación Fotovoltaica. ....	- 37 -
CAPÍTULO 4.....	- 40 -
DESARROLLO DEL PROYECTO.....	- 40 -
4.1 Caso de estudio: Empresa Mafeva S.A. de C.V.....	- 40 -
4.2 Etapas para el Desarrollo del Proyecto .....	- 42 -
4.3 Análisis Energético del Negocio .....	- 43 -
4.4 Orientación de los Paneles.....	- 44 -
4.5 Dimensionado del Sistema Fotovoltaico Bifacial .....	- 45 -
4.5.1 Cálculo de Número de Paneles Bifaciales .....	- 46 -
4.5.2 Elección del Inversor .....	- 48 -

4.5.3 Factores de Corrección .....	- 49 -
4.5.4 Diagrama Unifilar del Sistema Fotovoltaico Bifacial a Implementar .....	- 50 -
4.5.5 Diagrama de Conexión .....	- 51 -
4.5.6 Material .....	- 51 -
4.6 Implementación del Proyecto .....	- 52 -
CAPÍTULO 5 .....	- 57 -
EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	- 57 -
5.1 Evaluación Económica de Proyectos .....	- 57 -
5.2 Costo del Sistema Fotovoltaico .....	- 57 -
5.3 Costo Total del Material.....	- 58 -
5.4 Determinación de la Energía Eléctrica de los Paneles Fotovoltaicos Propuesta .....	- 59 -
5.5 Costo del Consumo eléctrico con Paneles Fotovoltaicos.....	- 59 -
5.6 Recuperación Económica del Sistema Fotovoltaico .....	- 60 -
CAPÍTULO 6 .....	- 62 -
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	- 62 -
5.1 Conclusión.....	- 62 -
5.2 Recomendaciones .....	- 63 -
Bibliografía .....	- 64 -
Anexos .....	- 66 -

## RESUMEN

El caso que pretende abordar esta tesis es el de la región de Zinapécuaro perteneciente al estado de Michoacán, donde se propone abastecer un negocio ferretero con un sistema fotovoltaico bifacial interconectado a la red.

El proyecto contiene el análisis energético del negocio, los cálculos de potencia y la selección del panel bifacial, así como el número de estos, la eficiencia arrojada por los paneles, la orientación de los paneles, las horas solares pico efectivas. El dimensionamiento del sistema del (inversor) y la infraestructura del sistema fotovoltaico bifacial (forma de la estructura, material, puesta a tierra).

Se analizó la viabilidad que tiene la zona mediante el análisis de datos específicos de radiación e irradiación solar que abren camino para el dimensionamiento de cada dispositivo que forma parte del sistema fotovoltaico bifacial interconectado a la red, así como algunas características superficiales de estos.

El dimensionado indica una potencia nominal de 3.680 kW del sistema fotovoltaico, que cubren el total de la demanda eléctrica y sobra para una futura expansión del negocio, lo que representa un ahorro importante para el usuario.

Palabras Clave: Paneles Fotovoltaicos, Energías Renovables o alternativas, panel bifacial, energía solar, irradiancia.

## ABSTRACT

The case that this thesis is intended to address is that of the Zinapécuaro region belonging to the state of Michoacán, where it is proposed to supply a hardware business with a bifacial photovoltaic system interconnected to the network.

The project contains the load analysis, power calculations and bifacial panel selectment, as well as the number of them, the efficiency thrown by the panels, the orientation of the panels, the effective peak solar hours, shadow study. The sizing of the system (inverter, regulator) and the infrastructure of the bifacial photovoltaic system (shape of structure, material, grounding).

The feasibility of the area is analyzed by analyzing specific radiation and solar irradiation data that make its way to the sizing of each device that is part of the bifacial photovoltaic system interconnected to the grid, as well as some surface characteristics of these.

The dimensioning indicates a nominal power of 3,680 kW of the photovoltaic system, which covers the total electricity demand and is left over for future business expansion, which represents significant savings for the user.

Key Words: Photovoltaic Panels, Renewable or Alternative Energies, bifacial panel, solar energy, irradiance.

## DESCRIPCIÓN DE LOS CAPÍTULOS

En este trabajo de tesis se encuentra organizado por 6 capítulos, cuyo contenido se describe a continuación.

El capítulo 1 se da una breve explicación sobre los antecedentes de la energía fotovoltaica, también se menciona las energías renovables, ventajas como desventajas, se habla sobre la situación en México, así como se explican los términos de irradiancia e irradiación.

El capítulo 2 presenta sobre las celdas o módulos fotovoltaicos, la cual es la parte fundamental del proyecto de implementación del uso de energía solar para satisfacer la demanda eléctrica de la empresa Mafeva S.A de C.V, en este capítulo tratará de describir las características de funcionamiento de un sistema fotovoltaico, estructura, componentes y aplicaciones de estos sistemas.

El capítulo 3 presenta los distintos sistemas fotovoltaicos como lo son el interconectado a la red y el aislado, se especifica las diferentes pérdidas y se detalla el método para crear especificaciones y estructura del sistema para su utilización de la actividad de diseño.

El capítulo 4 se detallan los cálculos realizados en el proyecto aplicado como lo son el cálculo de número de paneles, tipo de inversor etc., así como los instrumentos utilizados para este fin. Seguidamente se desarrolla un diagrama unifilar y uno de conexión de la propuesta. En este capítulo se presenta el caso de aplicación de la tesis, detallándose las actividades realizadas

El capítulo 5 presenta la evaluación económica del proyecto como lo es el costo del sistema fotovoltaico, costo del material, costo del consumo eléctrico y recuperación de la inversión.

El capítulo 6 y último presenta las conclusiones de la tesis, aportaciones y recomendaciones.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y ENERGÍA SOLAR

### 1.1 Introducción

El Sol es la fuente de energía que conserva vivo al mundo. Desprende constantemente una potencia de 62 mil 600 kilowatts por cada metro cuadrado de su área. Esto ha transcurrido a lo largo de 4 mil 500 millones de años, y se calcula que continuará de esta forma por otros 5 mil millones de años, lo que, en términos de la vida que ha tenido la raza humana, es básicamente ilimitado. Por cierto, en un tiempo de tan solamente 2 días, el mundo consigue una proporción de energía equiparable a cada una de las reservas existentes de petróleo, gas y carbón. Esto es igual a casi 60 veces el consumo anual de la sociedad humana, esto nos da una iniciativa de la impresionante potencia que tiene la energía del Sol para saciar las necesidades energéticas del mundo. Los primeros registros escritos de la implementación de la energía solar provienen de los griegos, romanos y chinos. Dichos pueblos conocían el arte de prender fuego usando lentes y espejos. En el Renacimiento, la iniciativa de utilizar el calor solar para la industria química y la cerámica despertó mucho interés. Según parece, uno de los primeros en intentarlo ha sido Leonardo da Vinci. En los siglos XVII y XVIII se construyeron un enorme conjunto de hornos solares que utilizaban la radiación solar concentrada para experimentación en cerámica, metalurgia y química. Muestra de esto: en 1774 el químico inglés Joseph Priestley usó un horno solar en experimentos que lo llevaron a encontrar el oxígeno. Hoy los hornos solares se siguen usando como artefactos de estudio, bastante relevantes en el campo de la energía solar; ejemplificando, para la producción sostenible de combustibles como el hidrógeno. Generalmente, las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar tienen la posibilidad de clasificarse en solares térmicas y solares fotovoltaicos (Arancibia y Best 2010).

El consumo y la producción de energía es la primordial causa de emisión de gases contaminantes y de impacto invernadero a grado universal, en los últimos años se ha minimizado de forma fundamental dichas emisiones debido, entre otras iniciativas, a la implementación de energías de tipo renovable como por ejemplo (biomasa, geotérmica, eólica, solar) además de por una mayor eficiencia en el consumo de la energía.

Los sistemas de generación fotovoltaica conforman una de las aplicaciones de energía solar que han tenido un incremento en la experimentación en los últimos años, esto ya que es una manera directa de conversión de la energía solar a energía eléctrica. Las instalaciones fotovoltaicas clásicas interconectadas a la red, así como las aisladas se muestran como una tecnología que ha dejado de ser empírica y se convirtió en una elección real y positiva de suministro de electricidad, como para residencias habitacionales como para comercios e industrias, aunado al beneficio de la reducción de emisiones contaminantes, la factibilidad de su instalación en el territorio y el ahorro económico que estas producen a largo plazo.

### 1.2 Objetivo

Implementar un sistema fotovoltaico interconectado a la red, para la alimentación de luminarias y otros aparatos en un negocio ferretero, por medio del dimensionamiento, diseño e instalación del sistema de paneles fotovoltaicos bifaciales monocristalinos.

### 1.3 Objetivos Particulares.

1. Evaluar la viabilidad de un sistema fotovoltaico bifacial implementada en un negocio ferretero, por medio de un estudio de consumo energético.
2. Brindar de energía eléctrica las luminarias y equipos en la ferretería para contribuir a reducir la energía que se obtiene de CFE, esto por medio de paneles fotovoltaicos bifaciales.
3. Establecer las ventajas económicas y el retorno de la inversión.

### 1.4 Justificación

Este tipo de tecnología fotovoltaica bifacial es innovadora al igual que las demás energías verdes también llamadas energías alternativas, específicamente la energía fotovoltaica es muy rentable para satisfacer las necesidades al reducir de una gran medida el costo monetario producido por un consumo eléctrico en negocios o en casas habitacionales, asemejando lo realizado en distintos países que ya utilizan este tipo de sistema para el ahorro de energía eléctrica.

Los paneles bifaciales se caracterizan por ser sensibles a la luz por ambas caras, al contrario que ocurre con las placas solares monofaciales, cuya parte posterior está cubierta con materiales opacos y, por lo tanto, no capta la radiación solar.

En el caso de una placa bifacial la parte trasera está formada por una lámina transparente o fabricada con vidrio templado doble, de modo que ambos lados reciben los rayos del sol para la generación de energía.

Las ventajas que tiene un sistema fotovoltaico bifacial son:

- Una mayor eficiencia de hasta el 30%
- Es una tecnología con un gran potencial y tiende a disminuir sus costos
- Mantenimiento y riesgo de falla, bajos.
- Son perfectos para su utilización en lugares en o edificios o viviendas con techos blancos, gracias a la capacidad de los colores claros de reflejar la luz solar.
- Pueden servir como elementos estéticos, utilizados como barreras o toldos

### 1.5 Hipótesis

Mediante un estudio de viabilidad y de zona de un sistema de generación de energía renovable por medios fotovoltaicos (bifaciales), se puede generar y suministrar la capacidad de cargas demandadas eléctricamente, suficiente para la alimentación eléctrica de un negocio ferretero en Zinapécuaro, Michoacán

### 1.6 Metodología

El presente trabajo ofrece como principal aporte, el desarrollo de una metodología de diseño e implementación de un sistema fotovoltaico bifacial en el municipio de Zinapécuaro.

La metodología expuesta se puede aplicar a cualquier casa o negocio que se encuentre conectado a la red en que se desee lograr reducir significativamente la energía eléctrica demandada por CFE, del lugar en el que se implemente. Es aplicable a localidades en las que exista recurso solar.

Posteriormente, se debe realizar la medición de la demanda eléctrica que presenta el negocio ferretero que se quiera implementar el sistema fotovoltaico bifacial. Con lo cual se determina una demanda más eficiente mediante la implementación de paneles solares fotovoltaicos y los inversores necesarios. Luego se recopila información técnica y económica respecto a los equipos que se desean introducir como posibles componentes participantes analizando esto con los distintos proveedores.

Se selecciona y se procede a instalar canaletas, cableado, montaje de los paneles, montaje de la estructura entre otras.

### 1.7 Fuentes de Energías Renovables o Alternativas.

En el presente, los retos en materia de energía eléctrica se basan en fuentes de energía renovable, las energías renovables o alternativas son buenas fuentes para generar energía eléctrica y tener un futuro energético más eficaz, seguro y amigable con la naturaleza, ahora bien, cuando se habla de energías renovables o alternativas, se debe tener claro que son alternativas a los combustibles fósiles como lo son: el gas, el petróleo, carbón mineral, etc.

Se llama energía renovable al tipo de energía que se consigue de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la gran cantidad de energía existente, o porque son capaces de regenerarse de manera autónoma por medios naturales, también podría definirse como aquella fuente de energía que no consume recursos y además no contamina. (Casas et al., 2008). Entre las energías renovables más comunes están la eólica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, undimotriz, la biomasa, etc. La mayoría de las energías renovables se originan a partir de la energía del sol, el cual es la fuente principal de energía de nuestro planeta, dicha energía puede transformarse en calor útil o bien en electricidad.

De acuerdo con el Programa Especial de la Transición Energética (Programa Especial de la Transición Energética, 2017), México cuenta con abundantes recursos para la generación de electricidad con fuentes renovables. Existe un potencial probado para generar hasta 13,167 GWh/año de electricidad. Sin embargo, estas estimaciones se incrementan si consideramos las reservas probables y probadas.

#### 1.7.1 Ventajas de las Energías Renovables.

Las energías renovables que tanto se hablan en la actualidad en amplios sectores de la sociedad, tienen ventajas importantes, las cuales se mencionan a continuación:

- Tienen un índice bajo de contaminación, por lo que son bastante amigables con el medio ambiente.
- La energía base es gratuita.
- Son muy apropiadas, al poder conseguir energía en lugares remotos, y ser aplicada en casos puntuales.

- Aprovechan la energía que está en el sitio.
- Minimizan la dependencia en cuestión a los combustibles tradicionales de origen fósil.
- Generan actividades distintas y nuevas oportunidades de desarrollo.

### 1.7.2 Inconvenientes de las Energías Renovables.

Las energías renovables también tienen inconvenientes, los cuales son importantes que sean conocidos, esto con el objeto de saber a qué problemas se enfrenta al trabajar con este tipo de energía. A continuación, se describen:

- Las instalaciones requeridas para obtener energía eléctrica son relativamente costosas.
- Algunas de ellas no tienen continuidad, se interrumpen el suministro (luz y calor del sol, el viento, las mareas). Son variables e impredecibles.
- Las mayorías de las instalaciones tienen bajos rendimientos.
- Regularmente los equipos y dispositivos ocupan mucha superficie.
- En algunos casos su tecnología está en desarrollo.
- En la actualidad el suministro de electricidad en base a energías renovables aún necesita ser respaldada o complementada con generación convencional (combustibles fósiles).

### 1.8 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que genera electricidad de procedencia renovable (Joshua 2002). Esta nace de manera directa de la radiación solar usando un dispositivo semiconductor que tiene por nombre célula fotovoltaica, o bien por medio de una deposición de metales sobre un sustrato llamada célula solar de cinta o capa fina.

Esta clase de energía se usa principalmente para generar electricidad a gran escala por medio de redes de distribución, aun cuando además posibilita alimentar incontables aplicaciones e instrumentos autónomos, así como surtir domicilios aislados de la red eléctrica. Gracias a la creciente demanda de energías renovables, la construcción de células solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado de manera considerable en los últimos años, empezando a producirse en masa desde el año 2000.

Programas de incentivos económicos, primero, y luego sistemas de autoconsumo fotovoltaico y balance neto sin subsidios, han brindado apoyo a las instalaciones fotovoltaicas en un gran número de países. Gracias a esto, la energía fotovoltaica se transformó en la tercera fuente de energía renovable más relevante en términos de capacidad instalada en todo el mundo, después de las energías hidroeléctrica y eólica.

La energía fotovoltaica no emite ningún tipo de contaminación durante su funcionamiento, apoyando a evitar la emisión de gases de efecto invernadero. Su primordial desventaja es que su producción es dependiente de la radiación solar, por lo que si la célula no está alineada perpendicularmente al Sol se pierde entre un 10-25 % de la energía incidente. Por ello, en las plantas de conexión a red se ha ampliado la implementación de seguidores solares para incrementar la producción de energía. La producción es afectada por las condiciones meteorológicas no favorables, como la ausencia de sol, nubes o la suciedad que se genera sobre los paneles.

### 1.8.1 Irradiancia e Irradiación

Hay 3 tipos de irradiación primordiales, una vez que hablamos de energía solar fotovoltaica, debemos tomar en consideración que la radiación que realmente nos resulta más aprovechable es la directa y la de albedo, la directa que es la que tiene un potencial mayor y la de albedo que se aprovecha por la parte trasera del panel, aun cuando es además aprovechable la energía difusa. En la Figura 3.1 se observa los diversos tipos de radiación sobre un área.

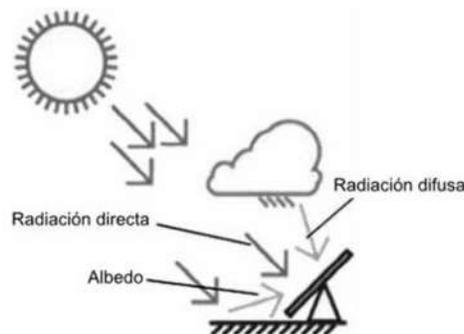


Figura 1.1 Tipos de Radiación Sobre una Superficie (Fuente: fim.umich.mx solar 1).

- Irradiación Solar Directa: Es aquella que llega a la superficie de la tierra a partir de la dirección del Sol.
- Irradiación Solar Difusa. Es aquella cuya dirección fue modificada por distintas situaciones (densidad atmosférica, partículas u objetos con los que choca, reemisiones de cuerpos, etcétera.). Por sus propiedades, se tiene la posibilidad de mencionar que esta luz nace de todas direcciones. En un día nublado, ejemplificando, únicamente poseemos radiación difusa.
- Irradiación albedo: Es aquella que llega a el área, luego de reflejarse en ciertas áreas como inmuebles, montañas, etcétera.

La suma de los 3 tipos de irradiancia da como resultado irradiación total incidente. El área del mundo está expuesta a la radiación perteneciente del Sol. La tasa de irradiación es dependiente en cada momento del ángulo que conforman la usual a el área en el punto considerado y la dirección de incidencia de los relámpagos solares.

La temperatura media del Sol tiende a estar entre los 5 000 y los 6 000 grados kelvin. Por fundamento de unas actitudes físicas que suceden en el interior, el Sol pierde masa que es transformada en energía, esta energía es la que llamamos radiación solar. La Tierra obtiene 174 PW de radiación solar a partir de la capa más alta de la atmósfera, sin embargo, una parte que es alrededor del 30% es reflejada de vuelta al espacio mientras tanto que lo demás es absorbido por los mares, nubes y las masas de tierra.

Parte importante de la energía que llega a nuestro mundo nace del Sol. El Sol transmite energía a modo de radiación electromagnética. Este tipo de radiaciones se hacen notar por sus distintas longitudes de onda. Varias, como las ondas de radio, llegan a tener longitudes de onda de kilómetros, mientras las radiaciones gamma, poseen longitudes de onda de milésimas de nanómetro.

La radiación que hay en nuestra estrella es de 63,450,720 W/m<sup>2</sup>. La energía que llega al exterior de nuestro planeta sobre un área perpendicular a los relámpagos solares lo hace en una porción fija, llamada constante solar (1353 W/m<sup>2</sup> de acuerdo con la NASA) variable a lo largo del año un  $\pm 3 \%$  gracias a la elipticidad de la órbita terrestre. Este tipo de energía es

una mezcla de radiaciones de longitudes de onda que oscila entre  $200\text{ nm}$  y  $400\text{ nm}$ , distinguiéndose entre radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja.

La Figura 1.2 representa una curva de irradiancia  $W/m^2$  que es la velocidad de incidencia de energía radiante sobre un área, donde la insolación es la proporción de energía que se obtiene del sol a lo largo de un tiempo, sus unidades son  $Wh/m^2$ . Para plantear el sistema fotovoltaico bifacial es preciso conocer la insolación diaria promedio (HSP), como se observa en la Figura 1.3 de color verde está un área equivalente al área bajo la línea curva de color rojo, la cual representa una curva ideal de irradiancia. Se puede mirar que la elevación de la curva verde es igual a  $1000\text{ W/m}^2$  y el ancho son las horas sol pico.

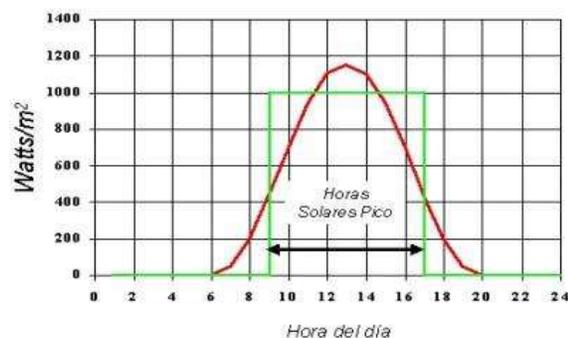
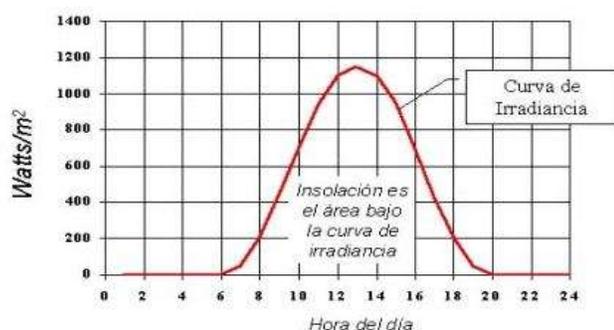
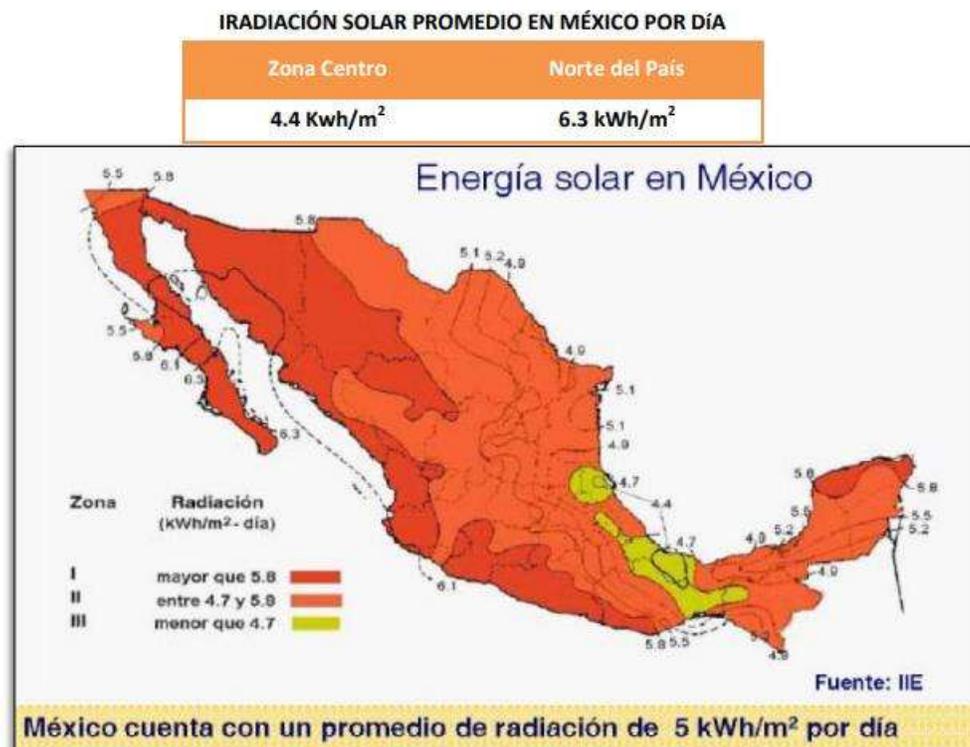


Figura 1.2 Curva de Irradiancia (Fuente: oocities). Figura 1.3 Característica de HSP (Fuente: oocities).

## 1.9 Radiación Solar en México

El sol tiene un papel determinante y cada vez más importante en el sector económico, y puede llegar a ser una fuente de empleos para nuestro país. En la actualidad México tiene la posibilidad de hacer uso de la energía eléctrica generada por medio de paneles fotovoltaicos o sistemas de concentración solar utilizando la radiación directa, y existen mecanismos específicos para lograr que la inversión sea rentable. Considerando la capacidad energética del Sol, la cual durará millones de años, así como la privilegiada ubicación de México en el globo terráqueo, la cual permite que el territorio nacional destaque en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual con índices que van de los  $4.4\text{ KWh/m}^2$  por día en la zona centro, a los  $6.3\text{ KWh/m}^2$  por día en el norte del país, es indispensable adquirir iniciativas de políticas públicas que fomenten el aprovechamiento sustentable de la energía solar en nuestro país.



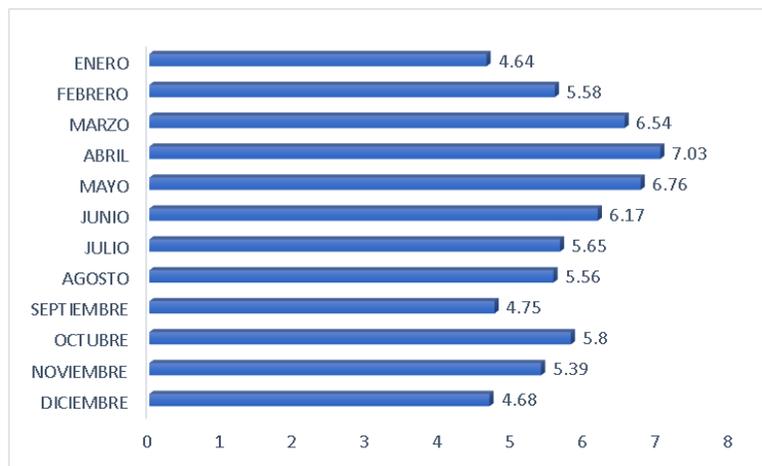
**Figura 1.4 Mapa de Irradiación Solar en México, (Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctrica).**

México es un país con un gran potencial de energía solar en la mayoría de su territorio, la zona norte del país es de las más soleadas del mundo. Existe una insolación promedio de 5.3  $KWh/m^2$  en la mitad del territorio mexicano, suficiente para satisfacer la necesidad de un hogar mexicano promedio. Esto coloca al país en una situación muy favorable para el uso de la energía solar. Hay muchos factores que influyen en la decisión de usar esta fuente de energía para resolver las necesidades de energía eléctrica, pero las condiciones de varias zonas del país permiten que las inversiones en el Noroeste de México se destaquen como las más rentables, la mayor cantidad de irradiación que se dispone se encuentra en esta zona del país, lo que hace suponer que será en esas zonas donde se realicen primero inversiones de sistemas de generación a base de energía solar en México.

### 1.10 Distribución del Recurso Solar en Zinapécuaro

La zona de Zinapécuaro se ubica en latitud 19°52 Norte y 100°5 Oeste a una altura de 1880 metros sobre el nivel del mar. Las condiciones climáticas en la zona son templadas en verano y frío en invierno.

La irradiación mensual total en la zona de Zinapécuaro no es uniforme y presenta una diferencia significativa como podemos observar en la Figura 1.5 donde la insolación mensual total comienza a elevarse en el mes de marzo, el valor pico se encuentra en el mes de Abril con un valor de  $7.035 \text{ kWh/m}^2$ . Después comienza a disminuir en Diciembre con un valor de  $4.68 \text{ kWh/m}^2$ .



**Figura 1.5 Insolación Horizontal Mensual de la Localidad de Zinapécuaro (Fuente: Elaboración propia con datos recabados de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy).**

El promedio de la irradiación recibida en esta ubicación de Zinapécuaro anualmente es de  $5700 \text{ Wh/m}^2$ . Resultando ser mayor al promedio nacional.

### 1.11 Horas Solares Pico en la Zona de Zinapécuaro

El valor de la hora solar pico (HSP) se obtiene dividiendo el valor de la irradiación  $R_{\beta}$  entre el valor de la potencia de insolación incidente  $I_{\beta}$  como se muestra en la ecuación 1.1.

$$HSP = \frac{R_{\beta}}{I_{\beta}} \quad (1.1)$$

El valor de potencia de irradiación incidente  $I_{\beta}$  es de  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$  estandarizadamente.

Como se puede observar los datos de insolación recabados por la (NASA en el programa Surface Meteorology and Solar Energy) son de acuerdo con una irradiación cuando los paneles se encuentran horizontalmente respecto a la incidencia de la luz solar, el ángulo de inclinación de los paneles corresponde a la latitud de la ubicación de estudio, el cual es  $19.52^{\circ}$  norte para la región de Zinapécuaro.

Entonces para determinar la hora solar pico de la zona de Zinapécuaro, se toma como referencia el promedio anual de  $5.7 \text{ kWh}/\text{m}^2$ , tenemos que:

$$HSP = \frac{5700 \text{ Wh}/\text{m}^2}{1000 \text{ W}/\text{m}^2}$$

$$HSP = 5.7h$$

Conclusión: Como se detalló en este capítulo el sol es una de las fuentes de energía más primordiales para la humanidad, y para generar energía a partir de ella, siendo esta la utilizada para este trabajo de investigación. Los diferentes tipos de radiación son aprovechados tanto por los paneles tradicionales tanto como los bifaciales. Es muy importante comprender que México tiene un gran potencial para ser líder en energías alternativas ya que cuenta con todo tipo de climas y tiene dos océanos sin embargo no contamos en nuestro país con tecnología suficiente para sacar provecho de estas energías, es imprescindible que nuestro país en un futuro sea punta de lanza en este ámbito.

## CAPÍTULO 2

### CELIDAS Y PANELES SOLARES

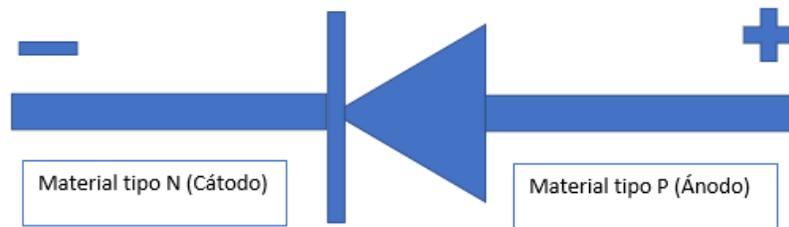
#### 2.1 Efecto Fotovoltaico

En las celdas solares la radiación solar no se transforma en calor, sino que se convierte de forma directa en electricidad, por medio del denominado efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico se apoya en que la luz puede producir una corriente eléctrica al alumbrar ciertos materiales. Fue descubierto en el año de 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel. Pese a este temprano hallazgo, ha sido hasta la década de los años cincuenta del siglo XX que se localizó un material que presentaba el efecto fotovoltaico de forma eficiente como lo es el silicio. Inicialmente, las celdas solares de silicio tenían un precio alto como para utilizarlas de forma comercial. No obstante, se localizó una aplicación ideal en la que su costo no era un inconveniente que es el proporcionar energía a los satélites. La carrera espacial entre los USA y la Alianza Soviética, en los años sesenta, otorgó un fundamental fomento al mejoramiento de las celdas solares, cuyas eficiencias llegaron a más del 15 por ciento en dicha etapa, a la fecha han alcanzado hasta el 30 por ciento (Santana, E. U. 2009). Esto vino en compañía de relevantes reducciones en sus precios.

El efecto fotovoltaico se fundamenta en la utilización de materiales semiconductores. Éstos se caracterizan ya que conducen la electricidad mejor que un aislante y menos que un metal, mejoran su capacidad para conducir la electricidad al ser iluminados. Una vez que incide luz sobre un semiconductor, la energía suministrada ayuda a darle más grande movilidad a ciertos de los electrones presentes en el material, por lo cual su capacidad para conducir la electricidad se incrementa. No obstante, para generar el impacto fotovoltaico no basta con liberar electrones. Se necesita que aparezca un voltaje que active a dichos electrones en una dirección específica, generando una corriente eléctrica. La manera más común de conseguir en otras palabras juntar 2 materiales.

Para que los electrones realicen un trabajo eficaz, se necesita atraparlos anterior a que se vuelvan a recombinar en el semiconductor, para eso se introducen en el semiconductor

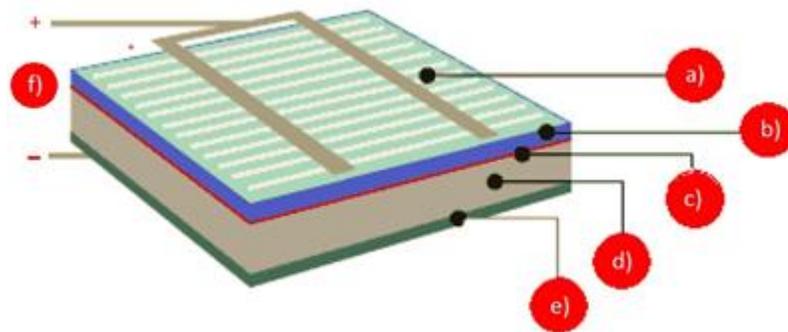
recursos químicos (dopantes) que hagan un exceso de electrones (semiconductor tipo N) o de huecos (semiconductor tipo P) como se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1 Representación Básica del Diodo (Fuente: Elaboración Propia).**

## 2.2 Elementos de Una Celda Fotovoltaica

En la Figura 2.2 se observan los elementos que conforman usualmente a una celda solar, así como una breve explicación de cada parte.



**Figura 2.2 Partes de una Celda Fotovoltaica (Fuente: Poder Solar S.A. de C.V.).**

- a) Placa de Vidrio: Es la parte que está expuesta a la luz solar, además protege a los elementos internos.
- b) Capa Antirrefleтора: Es aquella que está entre la placa de vidrio y el semiconductor, y su función es reducir la pérdida de luz por reflejo.
- c) Capa de Semiconductor tipo n: Es aquella que tiene una concentración de electrones excitados superior a la de la capa tipo p, lo que hace que las cargas

eléctricas de esta capa se transfieran a la capa de tipo p ocasionando una diferencia de potencial con la otra capa.

- d) Región de Semiconductores tipo n y tipo p: En esta parte permanecen colocados los semiconductores tipo n y tipo p, los cuales están enlazados por medio de una trayectoria que actúa como conductor, por la cual transitan los electrones para ir del semiconductor tipo n al tipo p, lo que provoca que se produzca un campo eléctrico en la capa.
- e) Capa de Semiconductor tipo p: Esta parte tiene deficiencia de electrones, lo cual causa la atracción de electrones de la capa tipo n, ocasionando que se produzca una diferencia de potencial (tensión) entre las dos capas del semiconductor.
- f) Terminales o Bornes: Es la parte en la que se encuentra la tensión de corriente directa generada por la celda fotovoltaica, en esta parte es donde se conecta la carga eléctrica o interconectar con otras celdas fotovoltaicas.

### 2.2.1 Principios de Funcionamiento de una Celda Solar Fotovoltaica

La tecnología fotovoltaica es una tecnología que convierte la luz de forma directa en electricidad, esta conversión directa de luz en electricidad se denomina generación fotovoltaica. El procedimiento más distinguido para producir energía eléctrica por medio del sol es por medio de la utilización de celdas solares fotovoltaicas. Los materiales más usados para la construcción de células fotovoltaicas son los semiconductores de silicio. La principal propiedad de esta clase de materiales es que la energía para dividir a ciertos electrones de su núcleo es semejante a la energía de los fotones que conforman la luz solar.

Las celdas solares fotovoltaicas funcionan según un fenómeno físico vital denominado “efecto fotoeléctrico” el cual ya se ha mencionado, este fenómeno prácticamente permite que

el material absorba fotones de luz y emitan electrones (Krauter 2006). Una vez que un número suficiente de fotones impacta en una placa semiconductor, como el “silicio”, tienen la posibilidad de ser absorbidos por los electrones que se hallan en el área de ésta. La absorción de energía adicional posibilita a los electrones (cargados negativamente) para liberarse de sus átomos. Los electrones se comienzan a desplazar y el espacio que dejan independiente lo ocupa otro electrón de una sección más fuerte del semiconductor, como consecuencia, una sección de la celda tiene una concentración mayor de electrones que la otra, lo cual origina una diferencia de potencial entre los dos lados. Al juntar los dos lados con un cable eléctrico posibilita que los electrones fluyan de un lado al otro de la celda, lo cual se conoce como corriente eléctrica.

### 2.2.3 Tipos de Celdas Solares

- Celdas Solares Amorfas:

Estas celdas se distinguen por ser más flexibles y resistentes que lo demás, debido a que están compuestas por una capa de silicio bruto. Además del silicio, pueden estar compuestas de telurio de cadmio, indio, galio y selenio. Las celdas amorfas poseen gran flexibilidad, lo cual les permiten ajustarse mejor a casi cualquier espacio. La preparación de estas celdas podría ser más económica debido al uso de un silicio sin pulir.

- Celdas Solares Policristalinas:

Las celdas policristalinas permanecen formadas de un silicio que se somete a menos procesos de filtrado que no eliminan cada una de las impurezas. Este silicio impuro es fundido y enfriado de manera artificial, ocasionando la formación de diversos cristales en la célula.

Esto le da un aspecto azulado no uniforme con tonalidades negras o verdes. Además del color, otra cosa que distingue a esta clase de celdas es que poseen una forma más rectangular. Estas celdas están desarrolladas de un solo cristal de silicio.

- Celdas Solares Monocristalinas

Esta clase de celdas están desarrolladas de un silicio con gran pureza y calidad, lo cual incrementa su capacidad para aprovechar la energía a comparación con las policristalinas y las amorfas. Al estar formado de un silicio con mayor pureza, recibe un color negro o azulado más uniforme. Las celdas monocristalinas se fabrican con bloques de silicio, que son de manera cilíndrica. Para optimizar el rendimiento y minimizar los costos de cada celda solar monocristalina, se recortan los 4 lados de los bloques cilíndricos para hacer láminas de silicio, y que les da dicho aspecto característico. Una de las maneras más sencillas para saber si tenemos delante un panel solar monocristalino, amorfo o policristalino, es que en el policristalino las celdas son perfectamente rectangulares y no poseen esquinas redondeadas como las tiene el monocristalino, y el amorfo es de un color negro sólido y cuenta con una cara más fina que los otros, como se puede observar en la Figura 2.3.



**Figura 2.3 Tipos de Celdas Solares (Fuente: tritecintervento).**

Algunas ventajas de los paneles solares monocristalinos son:

- El módulo fotovoltaico es de alta eficiencia cristalina.
- La barra principal de barras de células fotovoltaicas es más uniforme en la actualidad, tiene una mayor capacidad de recolección, disminuye el auto consumo actual, tiene un aspecto más hermoso para la instalación del sistema de techo.

- La cubierta de vidrio antirreflejante no sólo aumenta la absorción de la luz, sino que también reduce la pérdida de potencia por su función de autolimpieza bajo un ambiente lluvioso
- Este tipo de paneles tiene una mayor eficiencia a niveles bajos de luminosidad a diferencia con sus contrapartes policristalinas. También utilizan mejor el espacio gracias a su tamaño.

### 2.3 Representación de un Panel Solar Fotovoltaico

El panel solar fotovoltaico consiste en la conexión eléctrica de celdas fotovoltaicas en serie y/o paralelo hasta obtener valores deseados de tensión y corriente. El conjunto de celdas fotovoltaicas es encapsulado para aislar eléctricamente y otorgar protección contra agentes atmosféricos para poder instalarse a la intemperie, y puesto en una estructura (normalmente de aluminio) para obtener rigidez mecánica.

El panel cuenta además con otros elementos importantes, como los que se muestran en la Figura 2.4 y 2.5.

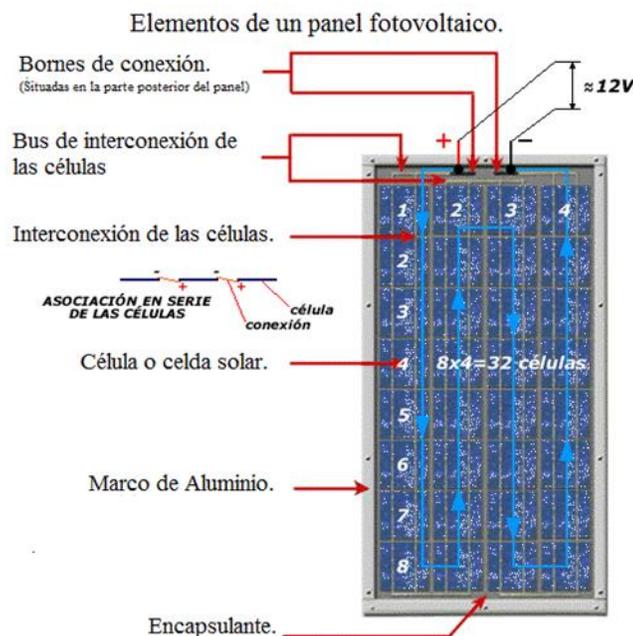
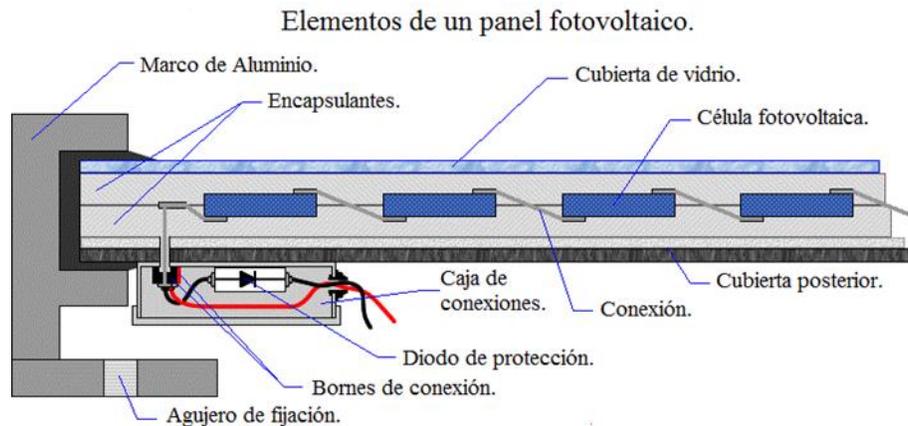


Figura 2.4 Elementos de un Panel Solar Fotovoltaico, vista frontal (Fuente: CursoSolar).



**Figura 2.5 Elementos de un Panel Solar Fotovoltaico vista de perfil. (Fuente: Curso Solar).**

1. **Bornes de Conexión:** Son contactos que se usan para conectar la carga eléctrica y así transmitir la energía generada o para interconectarse con otros paneles, normalmente los bornes están identificados con su polaridad.
2. **Bus de Interconexión de las Células:** Es donde se interconecta el arreglo de interconexión de celdas fotovoltaicas.
3. **Cubierta de Vidrio:** Esta parte debe facilitar al máximo la transmisión de la radiación solar, otorgar resistencia mecánica, soportar esfuerzos térmicos y ser impermeable al agua.
4. **Cubierta Posterior:** Debe ser impermeable y con baja resistencia térmica, usualmente se utiliza capa de Tedlar adyacente en toda la superficie del panel, aunque algunas emplean capa de Tedlar y un segundo vidrio.
5. **Diodo de Protección:** Su misión es proteger al panel contra sombras y fallas de sobrecarga, u otras alteraciones de las condiciones de funcionamiento del panel.
6. **Caja de Protecciones:** Su función es dar rigidez mecánica a los elementos que estén alojados en ella, además dentro de la caja se realizan las conexiones eléctricas necesarias para el adecuado funcionamiento.

7. Encapsulante: Se usa para dar adhesión entre las células fotovoltaicas, la superficie frontal (cubierta de vidrio) y la posterior del módulo. Deberá ser impermeable al agua y resistente a los esfuerzos térmicos. El material utilizado usualmente es silicona o EVA (Etilen-Vinil-Acetato).
8. Marco de Aluminio: Asegura una suficiente rigidez mecánica al conjunto de celdas fotovoltaicas, además de contar con elementos de sujeción para su montaje.

### 2.3.1 Características Eléctricas de un Panel

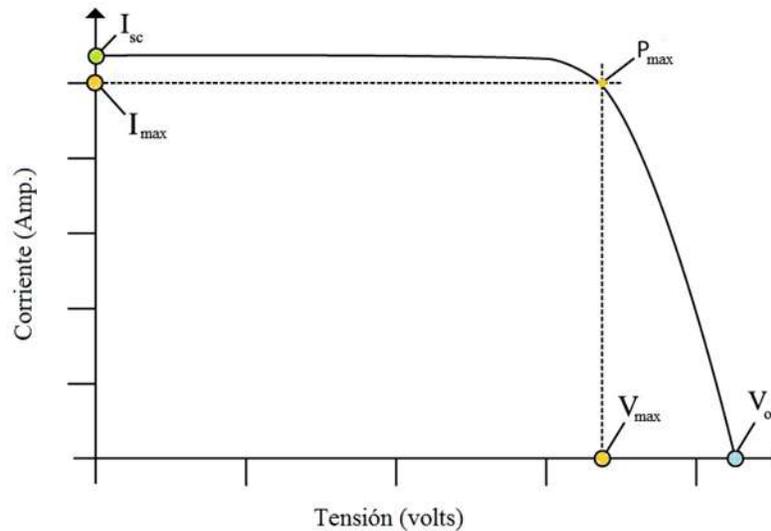
Un panel o módulo fotovoltaico proporciona mayor o menor electricidad en función de la radiación solar que incida sobre las células fotovoltaicas que lo conforman, así como los materiales empleados para su fabricación (Krauter, 2006).

Para clasificar un panel fotovoltaico es necesario definir sus características eléctricas. Los fabricantes además de entregar características físicas, como son: longitud del panel (ancho, largo y espesor), peso, tipo de caja de conexión, descripción de distancias de agujeros de fijación del marco, tipo de material, etc., también otorga la curva I-V (curva de corriente-voltaje) del módulo solar fotovoltaico.

La curva I-V de un panel fotovoltaico proporciona información acerca de los distintos valores de voltaje y corriente que puede proporcionar dicho panel como se muestra en la Figura 2.6. Los parámetros que refleja la curva I-V son:

- Corriente de Cortocircuito ( $I_{sc}$ ): Es la corriente máxima que producirá el panel fotovoltaico bajo ciertas condiciones de temperatura e irradiancia, correspondiente a un voltaje igual a cero.
- Corriente en el Momento de Máxima Potencia ( $I_{max}$ ): Es el valor de corriente para la potencia máxima, bajo ciertas condiciones de temperatura e irradiancia.
- Tensión de Circuito Abierto ( $V_{oc}$ ): Es el valor de tensión del módulo fotovoltaico bajo condiciones definidas de temperatura e irradiancia, correspondiente a un valor de corriente igual a cero.

- Tensión en el Momento de Máxima Potencia ( $V_{max}$ ): Es el valor de voltaje cuando se da la potencia máxima, bajo ciertas condiciones de temperatura e irradiancia.
- Potencia Máxima ( $P_{max}$ ): Es la máxima potencia que producirá el panel fotovoltaico, para condiciones determinadas de temperatura e irradiancia.



**Figura 2.6 Curva Típica I-V de un Panel Fotovoltaico (Fuente: Elaboración Propia).**

El escenario más común con el que un fabricante obtiene la curva característica de un panel fotovoltaico corresponde a una irradiancia de  $1000 \frac{W}{m^2}$ , una temperatura de  $25^{\circ}C$  y una distribución espectral de AM 1.5, a estas condiciones se le conoce como CEM (condición estándar de medición).

### 2.3.2 Panel Solar Bifacial

Las placas solares convencionales, en la mayoría de los casos suelen ser monofaciales, es decir, que capturan la luz del sol por su cara superior, mientras que la cara inferior es opaca. La energía que no es capturada en las células fotovoltaicas de la cara superior solamente se refleja y se pierde. Los paneles solares bifaciales, por el contrario, son placas solares de doble cara, es decir, están diseñadas de manera que puedan producir energía solar a través de su cara superior como de la cara inferior. Para ello, estos paneles solares cuentan con células fotovoltaicas en ambas caras, las células de la cara superior aprovechan la radiación solar directa y las de la parte inferior, cara al suelo, aprovechan la radiación reflejada. De tal forma que este diseño significa un incremento de la producción energética en función de factores

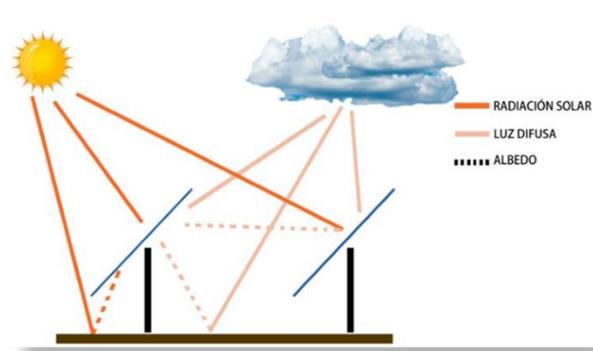
como que los módulos se instalen en superficies reflectantes o de colores tenues, el ángulo de inclinación o la altura de la instalación.

Los paneles solares bifaciales son iguales que los paneles tradicionales con la diferencia que tienen 2 caras, es decir, pueden incorporar perfectamente otras tecnologías como las células PERC, llevar marco o no llevarlo, etc. Es indispensable conocer que el objetivo de la tecnología bifacial es el incrementar la potencia del módulo solar para que éste genere más electricidad.

La tecnología bifacial no es relativamente nueva. Las primeras células fotovoltaicas bifaciales en laboratorio ya estaban desarrollándose por los años 60 y, de hecho, fue la empresa española Isofotón la primera en comercializar este tipo de tecnología, por el año de 1981.

El procedimiento para llevar a cabo la instalación de este tipo de módulos es crucial para lograr un buen rendimiento. Existe una gran cantidad de configuraciones, que va desde que la inclinación del panel es muy elevada (casi vertical) a otras donde los paneles solares van prácticamente horizontales. Por lo general, esta tecnología se suele implementar en superficies industriales planas o en instalaciones ancladas al suelo, no tanto en tejados residenciales.

Un panel bifacial recibe radiación de tres tipos de fuentes distintas: albedo que es el que se refleja del suelo, directa que es la que incide sobre el panel y la luz difusa que proyectan elementos del paisaje como edificios o las propias nubes como se observa en la Figura 2.7.



**Figura 2.7 Tipos de Radiación que Incide en un Panel Bifacial (Fuente: PCMenergía).**

### 2.3.3 Eficiencia de Conversión de un Panel Solar Fotovoltaico

Se denomina eficiencia de la célula al coeficiente entre la potencia eléctrica que suministra la célula y la potencia de la radiación que incide sobre ella.

Las primeras células, desarrolladas en los años 50's, alcanzaban una eficiencia de un 6%. En los actuales procesos de fabricación de células consiguen eficiencias entre 10% y 18% y en laboratorios alcanzando rendimientos de hasta 26%.

Existen varios tipos de tecnologías probadas de celdas fotovoltaicas, tales como: cristalinas con una eficiencia del 10% al 15%, también multicristalinas con eficiencia del 9% al 12%, también existen celdas de silicio basadas en microelectrónica, y celdas de silicio monocristalino con eficiencia del 16% al 18 %. Otros tipos son: películas delgadas amorfas de silicio con una eficiencia del 10%, películas delgadas de cobre, indio y diseleniuro con una eficiencia del 12% y películas delgadas de telurio de cadmio con eficiencia del 9%, también hay capas delgadas de silicio con eficiencia del 8% y materiales nano estructurados con eficiencia de 9%.

Sin ninguna parte móvil las celdas fotovoltaicas tienen un desgaste mínimo, así su tiempo de vida es de al menos 25-30 años, sin embargo, la capacidad de producción de energía eléctrica puede ser reducida hasta un 75% u 80% del valor nominal debido a su envejecimiento.

La eficiencia de las células fotovoltaicas aún es baja, por ello se mantiene un alto nivel de investigación y desarrollo en este tipo de tecnología, con la finalidad de mejorar la eficiencia y reducir los costos, sin embargo, la fabricación de células fotovoltaicas aún es muy costosa comparada con otras fuentes de energía, aunque su precio tiende a bajar.

#### 2.4 Procedimiento para Realizar un Contrato de Conexión a la Red.

Los requerimientos para llevar a cabo un contrato de conexión a la red con CFE en pequeña escala son:

- Tener un contrato en tensión baja de suministro normal.
- Las instalaciones deberán cumplir con las especificaciones de CFE y con las Normas Oficiales Mexicanas.
- La potencia no debe ser mayor de 10 kW si la instalación es de tipo domiciliar o de 30 kW si es en un negocio.

Para llevar a cabo un contrato en media escala se necesita:

- Tener un contrato en media tensión de suministro normal.
- Las instalaciones deberán cumplir con las especificaciones de CFE y con las Normas Oficiales Mexicanas.
- La potencia de la fuente no deberá ser mayor de 500 kW.

El tiempo que dura el contrato es indeterminado pudiendo terminarse cuando se desee, esto con un previo aviso a CFE con 30 días anticipación.

##### 2.4.1 Trámites para Realizar el Contrato de Conexión a la Red

- Solicitud: Se debe acudir a las oficinas de CFE más cercana y entregar el formato de solicitud completo.

Para realizar el trámite es necesario que sea la persona titular del contrato de suministro, o un representante. En los 2 casos es necesario contar con una identificación oficial. Si es por medio de un representante se deberá tener la documentación que valide la constitución de la sociedad para realizar el trámite.

- Número de Solicitud: Al momento de acudir a las oficinas se otorgará a la persona un número de solicitud. Con este número se dará seguimiento a la solicitud de conexión a la red.
- Revisión la Instalación y Requerimientos de obras: Al domicilio acudirá personal calificado de CFE para verificar que el sistema FV cumpla con los requisitos técnicos correspondientes. Posteriormente CFE informará los resultados de la verificación, en el caso de que se requiera modificar o construir para realizar la conexión de red, el gasto correrá a cargo del solicitante.
- Firma de Contrato y pago del Importe: Cuando se haya aprobado técnicamente, la persona que realiza el trámite deberá acudir a las oficinas de CFE más cercana a firmar el contrato de conexión a la red y deberá de pagar el importe correspondiente de diferencia de los costos de medidores.
- Instalación del Medidor Bidireccional: CFE mandará a personal calificado al domicilio del solicitante para cambiar el medidor.
- Contrato de Conexión a la Red: A partir de ese momento, se tendrá un contrato de conexión a la red con CFE

Conclusión: Como se comprendió, sin el llamado efecto fotovoltaico la y sin la captación de la luz solar por medio de materiales conductores no “seríamos” capaces de transformar energía solar a fotovoltaica. Con el transcurso de los años se fue probando diferentes tecnologías que buscaban el mejoramiento de la eficiencia de un panel, desarrollando 3 tipos de paneles amorfo, monocristalino y policristalino esto un busca de una mejora continua. Llevando a la creación de paneles con más potencia y los paneles bifaciales, que su propósito a comparación de los tradicionales es generar más potencia por la parte trasera aprovechando los 3 tipos de radiación.

## CAPÍTULO 3

### SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

#### 3.1 Sistema de Generación Fotovoltaica.

Se denomina generación fotovoltaica a los dispositivos que realizan la transformación de energía solar a energía eléctrica, dichos dispositivos comúnmente son uno o varios paneles fotovoltaicos.

La energía eléctrica, producto de los módulos fotovoltaicos debe acondicionarse de acuerdo con la aplicación que se desee, es ahí donde se requiere de un sistema de generación fotovoltaica, el cual se define como el conjunto de equipos y dispositivos para llevar a cabo funciones fundamentales, tales como: transformar la energía solar en electricidad, almacenar adecuadamente la energía eléctrica generada y proveer satisfactoriamente la energía producida al usuario.

#### 3.2 Clasificación de Sistemas de Generación Fotovoltaica.

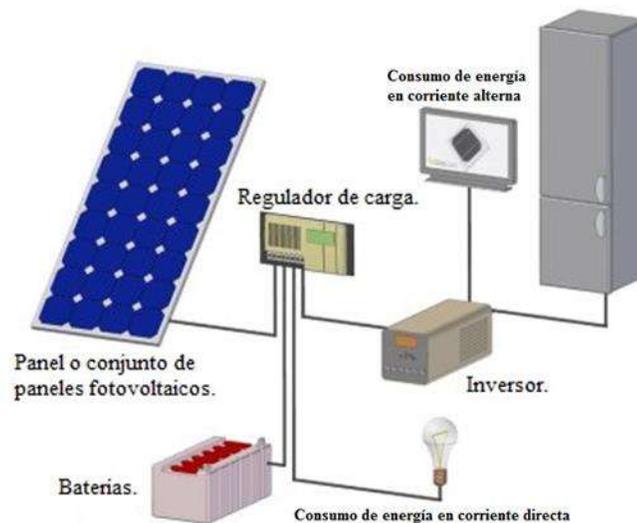
La clasificación típica de paneles solares fotovoltaicos se divide en dos grandes grupos: los sistemas aislados de la red eléctrica y los sistemas interconectados a la red eléctrica.

Los sistemas interconectados a la red eléctrica son aquellos que operan en paralelo a ella, este tipo de sistemas puede operar de dos formas, la primera es generar energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada a la red eléctrica y la segunda es abastecer de energía eléctrica a una carga específica (residencias habitacionales, comercios e industrias) junto con la red eléctrica, a este tipo de sistemas se le puede llamar sistema fotovoltaico interactivo con la red, ya que dependiendo de los valores instantáneos de carga eléctrica y la generación fotovoltaica, el consumo puede ser abastecido por la red eléctrica o por el propio sistema de generación fotovoltaico.

#### 3.3 Elementos de un Sistema de Generación Fotovoltaico Aislado de la Red.

Para llevar a cabo las funciones primordiales de un sistema de generación fotovoltaica aislado de la red, es necesario el uso adecuado de equipos y dispositivos, en la Figura 3.1 se observan los distintos dispositivos que conforman un sistema aislado. Los principales equipos de un sistema fotovoltaico aislado de la red son los siguientes:

1. Paneles Fotovoltaicos: Es la parte esencial del sistema, estos se encargan de transformar la radiación solar en energía eléctrica en forma de corriente directa.
2. Regulador de Carga: Este elemento se encarga de regular la cantidad de energía que viene de los módulos fotovoltaicos y que tiene como destino almacenarse en las baterías para su uso posterior, también evita cargas o descargas excesivas las cuales disminuyen la vida útil de las baterías, además este elemento puede alimentar cargas eléctricas en corriente directa.
3. Baterías: Son las encargadas de acumular la energía eléctrica generada, para abastecer de electricidad por las noches o en momentos del día cuando el consumo sea mayor que la generación.
4. Inversor: Es el dispositivo que recibe la energía eléctrica en corriente directa proveniente de las baterías/reguladores y la convierte en corriente alterna, la cual se utiliza normalmente en residencias habitacionales, comercios e industrias.



**Figura 3.1 Elementos de un Sistema de Generación Fotovoltaica Aislado (Fuente: Energía FV).**

### 3.4 Elementos de un Sistema de Generación Fotovoltaico Interconectado a la Red.

Para llevar a cabo las funciones primordiales de un sistema de generación fotovoltaica interconectado a la red, es necesario el uso adecuado de equipos y dispositivos, en la Figura 3.2 se observan los distintos dispositivos que conforman un sistema interconectado a la red.

Los equipos fundamentales que conforman un sistema fotovoltaico interconectado a la red son los siguientes:

1. Paneles Fotovoltaicos: Se encargan de transformar la radiación solar en energía eléctrica en forma de corriente directa.
2. Inversor: Recibe la corriente directa generada por módulos fotovoltaicos y la convierte en corriente alterna con las características adecuadas para realizar la conexión a la red eléctrica.
3. Tablero Eléctrico: Recibe la corriente alterna que ha generado el inversor, donde está lista para ser utilizada.
4. Medidor de Energía Bidireccional: Este dispositivo electrónico mide la energía entregada por la compañía de electricidad al usuario, así como la energía generada por los paneles fotovoltaicos entregada a la red, de esta manera se puede determinar la cantidad de energía consumida o entregada a la red.
5. Red Eléctrica: Es el sistema eléctrico de la compañía de electricidad, a la cual se está conectado, para permitir el abastecimiento de energía cuando se requiera.

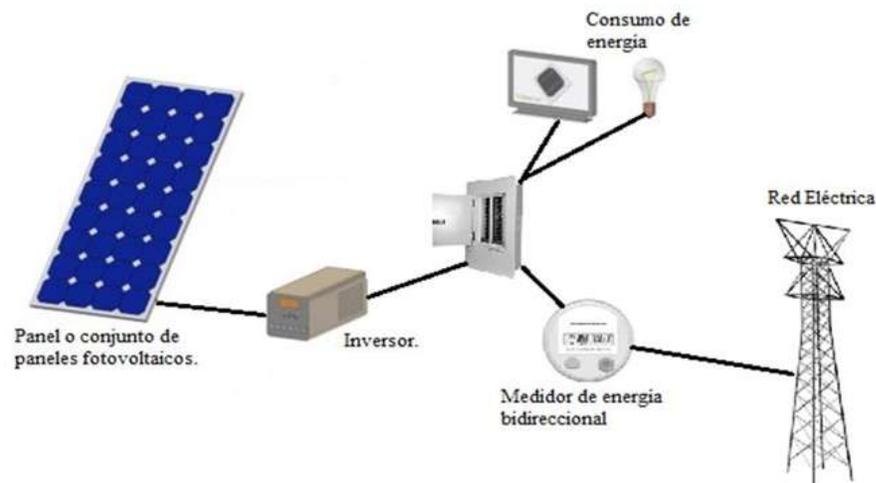


Figura 3.2 Elementos de un Sistema de Fotovoltaica Interconectado a la Red (Fuente: energía FV).

### 3.5 Factores de Pérdidas Energéticas en los Sistemas de Generación Fotovoltaica

Resulta factible pensar que la electricidad producida por un sistema de generación fotovoltaico es directamente proporcional irradiación incidente sobre los paneles fotovoltaicos, sin embargo, como en todos los procesos de generación de electricidad las pérdidas están presentes, las cuales son factor importante para evaluar eficiencias y factibilidad de las formas de generar electricidad y en este caso de evaluar un sistema de generación fotovoltaico.

Ahora bien, la experiencia y los distintos estudios explican las pérdidas más comunes en sistemas de generación fotovoltaica, las cuales se explican a continuación.

#### 3.5.1 Pérdidas por no Cumplimiento de la Potencia Nominal.

Este tipo de pérdida es debido de la fabricación de los módulos fotovoltaicos, es decir, los módulos fotovoltaicos obtenidos en un proceso de elaboración industrial no son todos idénticos, sino que su potencial nominal referida a las condiciones estándar de medida, CEM (condición estándar de medición), presenta una cierta diferencia.

De manera general los fabricantes garantizan que la potencia nominal de un módulo fotovoltaico está dentro de un umbral que oscila entre  $\pm 3\%$ ,  $\pm 5\%$  o en algunos casos hasta  $\pm 10\%$ , sin embargo, en la mayoría de las ocasiones suele darse el caso de que la potencia de cada panel fotovoltaico se sitúa dentro del umbral inferior de potencia garantizadas por el fabricante. Es por ello por lo que la potencia real suministrada por un sistema de generación fotovoltaica en ocasiones puede verse afectada hasta en un 10%, es decir, que si un sistema fotovoltaico de “1kw” tiene pérdidas por no cumplimiento de la potencia nominal de  $\pm 10\%$ , entregaría una potencia entre 1.1kw y 0.9kW, pero es más común que la potencia tienda a irse a 0.9kW.

#### 3.5.2 Pérdidas Debido al Envejecimiento.

Cuando se instala un módulo fotovoltaico se espera que durante su vida útil (veinticinco o treinta años) este produzca siempre la cantidad de potencia nominal, sin embargo, esto en la realidad no es posible, ya que tras el paso del tiempo la cantidad de potencia suministrada de un módulo fotovoltaico disminuye.

Es por ello por lo que existen las pérdidas debido al envejecimiento. Este tipo de pérdidas es causado por diversos factores, los cuales afectan la generación de potencia de los módulos, los distintos factores son: cambios de temperatura, cambios ambientales, cambios extremos de radiación solar o elevados índices de radiación ultravioleta, sin embargo lo que más afecta este tipo de pérdidas son la degradación de los materiales con lo que se fabrica la cubierta de los módulos, pues se modifican las propiedades ópticas de la misma, afectado directamente la transmitancia del material encapsulante.

Las pérdidas por envejecimiento en los paneles fotovoltaicos de manera general están en el umbral de 0.3% hasta 0.8% por año, lo cual nos indica que un panel fotovoltaico de una vida de veinticinco años aproximadamente puede llegar a generar solo entre el 92.5% y 80% de su capacidad nominal. Cabe destacar que las pérdidas por envejecimiento dependen en general de los cambios climáticos y el tipo de material usado en su fabricación.

#### 3.5.3 Pérdidas de Mismatch o Acoplamiento.

Este tipo de pérdidas involucra el no cumplimiento de la potencia nominal, es decir, al formar un sistema de generación fotovoltaico con módulos que tienen diferentes valores en su tensión y corriente nominal causara pérdidas energéticas, esto tiene origen debido a que cuando dos módulos conectados en paralelo tienen diferentes tensiones, el módulo de menor tensión limitara la tensión y de manera similar ocurre para la corriente de la conexión de módulos en serie, dando como resultado que la corriente eléctrica de un conjunto de paneles conectados en serie sea igual a la corriente del módulo que produzca menor corriente y de manera similar en la conexión paralelo para las tensiones.

#### 3.5.4 Pérdidas por Polvo y Suciedad.

Este tipo de pérdidas está dado por la deposición de polvo y suciedad en la superficie de los módulos fotovoltaicos que conforman el sistema de generación fotovoltaica. En este tipo de pérdidas se puede dar de dos formas, la primera es la presencia de una suciedad uniforme en los módulos del sistema, la cual ocasiona disminución de la corriente y tensión entregada por el sistema de generación fotovoltaico y la segunda y más común es la de suciedad en puntos determinados, lo cual da lugar a las pérdidas de mismatch.

### 3.5.5 Pérdidas por Caídas de Tensión en el Cableado.

Las pérdidas por caída de tensión son debido a la circulación de corriente por conductores, tanto en la parte de corriente directa como corriente alterna, en ambos casos la resistencia que presenta el conductor es la que origina la caída de tensión. Sin embargo, estas pérdidas se pueden disminuir e incluso desprestigiar con un buen dimensionamiento.

### 3.5.6 Pérdidas por Temperatura.

Las condiciones estándar de fabricación de un módulo fotovoltaico son con una irradiancia de  $1000W/m^2$ , una temperatura de  $25^{\circ}C$  en la superficie de los módulos y una distribución espectral de AM 1.5, sin embargo, al aumentar la temperatura de operación se presentan pérdidas de potencia, las cuales se estiman en un 4% por cada  $10^{\circ}C$  (el porcentaje de pérdida varía de acuerdo con la tecnología utilizada). Cabe mencionar que el NOCT (Normal Operating Cell Temperature) Temperatura de Operación Nominal de la Célula, es la temperatura que alcanza la célula en determinadas condiciones (valor que oscila entre  $45^{\circ}C$  y  $49^{\circ}C$ )

Este tipo de pérdidas implica que, a igual irradiación solar incidente en un mismo sistema de generación fotovoltaica, producirá menos energía si este se encuentre en un lugar más cálido que en un lugar frío.

### 3.5.7 Pérdidas por Sombreado del Sistema de Generación Fotovoltaico.

Durante el transcurso del día a veces es inevitable la presencia de sombras en el sistema de generación fotovoltaica o en algunos de sus módulos, lo que ocasiona pérdidas.

Este tipo de pérdidas se puede clasificar en dos tipos, en primer lugar, está la disminución de potencia debido a que la irradiancia solar disminuye por el efecto de sombreado de todo el sistema y en segundo lugar es el posible efecto de mismatch, el cual se origina debido al sombreado de uno o algunos de los módulos fotovoltaicos del cual está compuesto el sistema. Este tipo de pérdidas normalmente es ocasionado por las nubes, sin embargo, en ocasiones es ocasionado por la mala ubicación del sistema de generación fotovoltaico en los lugares urbanos, incluso por la incorrecta ubicación de los mismos módulos fotovoltaicos de cual está integrado el sistema.

### 3.5.8 Pérdidas por Rendimiento del Inversor

Un inversor que se utiliza en un sistema fotovoltaico se caracteriza por la curva de rendimiento en función de la potencia a la que opera.

Por ello este tipo de pérdidas son originadas cuando hay una mala elección del inversor, ya que cuando el inversor es de una potencia elevada en comparación con la potencia generada por el sistema fotovoltaico dará lugar a que el sistema en gran parte del tiempo opere en valores de rendimientos muy bajo y por consiguiente halla pérdidas de generación.

Por tal motivo es importante una selección adecuada de la potencia del inversor, la cual debe estar en función de la potencia de generación del sistema.

## 3.6 Seguridad Eléctrica en Sistemas de Generación Fotovoltaica

Cuando los sistemas de generación fotovoltaica están en operación suponen la existencia de ciertas situaciones que pueden ser peligrosas para las personas, animales y/o causar fallas a los equipos. Por ello es importante el uso de protecciones.

En primer lugar, se analizará el riesgo hacia las personas, así como los mecanismos de protección asociados y después se hará lo propio para los equipos que integran el sistema de generación fotovoltaico.

### 3.6.1 Protección para las Personas

En términos generales el efecto que produce la corriente eléctrica sobre el cuerpo de una persona depende de la intensidad y del tiempo de duración. Sin embargo, independientemente de la duración hasta 10 mA no representa efectos peligrosos (efecto calambre), pero por encima de 500 mA puede llegar a ocasionar fibrilación muscular.

La intensidad de corriente que puede circular por el cuerpo humano depende de la tensión de contacto y la resistencia expuesta, por tanto, las medidas de seguridad básicas consisten en reducir la tensión (aislamiento de conductores y puesta a tierra) a la que se pueda exponer el ser humano y aumentar su resistencia (mediante uso de guantes, calzado, o aislamiento del suelo).

La resistencia del cuerpo humano depende de distintas circunstancias, por ejemplo: estado de la piel, sudoración, estado físico, superficie de contacto y presión, por ende, la resistencia

no es uniforme, si no que cada parte del cuerpo presenta valores distintos, añadiendo también la duración de contacto y la tensión aplicada, ya que la resistencia disminuye con la tensión, realimentándose los efectos de altos valores de tensión y baja resistencia. Los efectos que produce la corriente eléctrica también dependen en gran medida de la trayectoria que esta siga a la circular por el cuerpo humano, siendo más peligroso cuando esta se circula por donde se encuentran órganos vitales. Debido a que la corriente busca el camino de menor resistencia, dicha trayectoria dependerá de los puntos de contacto con la tensión eléctrica.

También la frecuencia eléctrica es un factor para tener en consideración, por ejemplo, la corriente continua es menos peligrosa que la corriente alterna. Así pues, el umbral de percepción en corriente continua se ubica en 2 mA y el umbral de control muscular en 75 mA, mientras que la corriente alterna convencional (60 Hz) presenta otros umbrales, siendo su umbral de percepción 0.5 mA y el umbral de control muscular en 15 mA.

Cabe resaltar que los efectos también dependen de la edad, sexo, estado físico de la persona, la fatiga y en algunos el estado de ánimo.

Las formas más comunes de que una persona reciba una descarga eléctrica son:

- Contacto Directo: es el contacto de una persona o un animal con las partes energizadas del sistema de generación fotovoltaica.
- Contacto Indirecto: es el contacto de una persona o un animal con las partes que no deberían estar energizadas del sistema de generación fotovoltaico, pero que, por alguna falla, ya sea de aislamiento o por una mala conexión se encuentra energizada.

Para disminuir el riesgo de que ocurran las descargas eléctricas hacia las personas se recomienda tener un buen aislamiento de las partes energizadas del sistema de generación fotovoltaico, así como un sistema de detección de aislamiento el cual detecta cuando un valor de aislamiento ha caído por debajo del umbral que representa peligro, en este caso el sistema ordena una serie de acciones para evitar algún accidente eléctrico. Y por último una adecuada puesta a tierra, la cual consiste en conectar a tierra a todas aquellas partes del sistema de generación fotovoltaicas que no están energizadas, gracias a esta conexión se consigue limitar la tensión que puedan adquirir ante alguna falla.

### 3.6.2 Protección de los Equipos

La seguridad eléctrica para los equipos que conforman un sistema de generación fotovoltaica consiste en proteger dichos equipos durante contingencias, así como facilitar la localización y reparación de fallas (Díaz, 2012). Así pues, un sistema de generación fotovoltaica debe tener sistemas de protección.

Los sistemas de protección se clasifican en protección contra descargas atmosféricas (pararrayos) y protección contra sobretensiones (apartarrayos y varistor).

El primero se compone de una terminal aérea y un conductor que lleva la corriente a la red de puesta a tierra, el cual tiene la tarea de captar y conducir de manera adecuada la descarga atmosférica para evitar que impacte directamente sobre el objeto a proteger. Dado que este sistema de protección puede conducir impulsos de corriente muy altos, existe el riesgo de sobretensiones debido a los campos magnéticos generados, por ello es necesario respetar una distancia de seguridad entre los conductores de bajada y las instalaciones metálicas cercanas, si no se puede respetar dicha distancia de seguridad, se debe interconectar las estructuras metálicas de la instalación a los conductores de bajada de los pararrayos para evitar arcos al ocurrir descargas atmosféricas y en caso contrario, es decir, si la distancia es mayor a la de seguridad, los sistemas de tierra deben ser independientes. La utilización de un sistema de protección contra descargas atmosféricas depende de dos factores principales: la probabilidad estadística de tormentas eléctricas en la zona y el tamaño del sistema de generación fotovoltaica a proteger.

La protección contra sobretensiones está compuesta por un sistema de tierras y por dispositivos que cuando es necesario, conectan los conductores y así proteger el sistema de tierra. Esta protección pretende regular el voltaje, en el momento que se producen una sobretensión, esta protección bloquea o conduce al sistema de tierras las sobretensiones, manteniendo un umbral de tensión seguro para la instalación. Los apartarrayos o los varistores suelen ser empleados para cumplir la función de la protección contra sobretensiones, el comportamiento de dichos dispositivos se asemeja a una resistencia variable con la tensión, cuando la tensión está dentro de un umbral de seguridad para la instalación los conductores permanecen desconectados del sistema de tierras, es decir, en operación normal, pero si la tensión excede el umbral de seguridad todos los conductores son

conectados al sistema de tierras, es decir, la protección actúa y drena las sobretensiones a tierra para mantener la instalación segura. Normalmente estos dispositivos tienen un tiempo aceptable de respuesta (inferior a los 25 nano segundos). Es importante tomar en cuenta que cuando esta protección actúa se produce un cortocircuito entre sus conexiones, de ahí la importancia de evitar su ubicación entre elementos que puedan interactuar de forma dañina cuando se produce el cortocircuito.

A continuación, se describen los diferentes elementos que son necesarios para atender las tareas de protección descritas en los puntos anteriores.

### 3.6.3 Protección contra Cortocircuito y Sobretensiones en CD

El cortocircuito es un punto de operación en el cual no es peligroso para el generador fotovoltaico (módulos fotovoltaicos), sin embargo, si puede ser perjudicial para los inversores. Como medio de protección para este tipo de fallas se recomienda utilizar fusibles en cada polo (positiva y negativa). Además de brindar protección, el portafusible asociado sirve como elemento de seccionamiento, facilitando maniobras y mantenimiento, no obstante, el seccionamiento debe realizarse solamente cuando el inversor este en modo espera. Aunque el cortocircuito no sea una falla significativa para los módulos fotovoltaicos, su establecimiento o extinción puede ocasionar arco eléctrico si la maniobra no se realiza en el tiempo y forma adecuada.

Los equipos electrónicos (inversores, reguladores, etc.) de un sistema de generación fotovoltaica están protegidos contra sobretensiones por varistores o apartarrayos, los cuales ya se había descrito su funcionamiento. El rango de la tensión de operación está definido por la tensión en el punto de máxima potencia y la tensión de circuito abierto del generador fotovoltaico.

### 3.6.4 Protecciones contra Cortocircuito y Sobretensiones en CA

Se recomienda utilizar un interruptor termomagnético omnipolar general de operación manual, el cual se ubica en el centro de cargas, este interruptor tiene como objeto principal salvaguardar la instalación de sobretensiones o sobre corrientes provenientes de la red eléctrica (en el caso de ser un sistema de generación fotovoltaico interconectado a la red), así como realizar desconexión manual, la cual permite la realización de forma segura de labores de mantenimiento. Adicionalmente se coloca un interruptor termomagnético de operación

omnipolar, la cual su principal objetivo es proteger a la instalación fotovoltaica de sobretensiones y sobre corrientes. En ciertas situaciones se suele incluir un interruptor termomagnético para cada inversor, esto para una mayor protección, sin embargo, esto requiere de mayor inversión y complejidad en las protecciones.

### 3.7 Mantenimiento de Sistemas Fotovoltaicos

Se define mantenimiento como todas las actividades necesarias para mantener tanto las instalaciones como los equipos en condiciones apropiadas para realizar la(s) función(es) por las que fueron creadas.

#### 3.7.1 Mantenimiento: Función, Objetivos y Tipos

Un mantenimiento (De Bora, 1999). adecuado tiene como función principal conservar el funcionamiento correcto de instalaciones, equipos, herramientas, máquinas y procesos, con el mínimo costo y el menor número de accidentes. Así también la labor de mantenimiento tiene objetivos tales como:

- Evitar, reparar y reducir las fallas ocasionadas.
- Gestionar en forma conveniente el mantenimiento.
- Disminuir en la medida de lo posible las fallas que no se lleguen a evitar.
- Evitar accidentes y tener una buena seguridad para las personas.
- Proporcionar servicios de aseo y limpieza en toda la instalación.
- Solicitar herramientas, accesorios, piezas de repuesto, etc. para realizar un adecuado mantenimiento.
- Alcanzar y si es posible prolongar la vida útil de los bienes.
- Acatar con todas las normas de seguridad y ambientales.
- Ofrecer una garantía y asegurar la confiabilidad de los equipos e instalaciones.

Ahora bien, los objetivos antes mencionados se pueden cumplir de diversas formas, sin embargo, en este documento se busca gestionar adecuadamente el mantenimiento de un sistema de generación fotovoltaico, y para ellos se describen a continuación los tipos más comunes de mantenimiento.

El tipo más elemental de mantenimiento es el correctivo, que más bien trata de reparar averías, el cual consiste en las actividades necesarias para restablecer un servicio cortado o deteriorado por algún fallo en la instalación y/o equipo. Este tipo de mantenimiento se clasifica en dos tipos, como son: planificado y no planificado. El planificado se sabe con antelación que es lo que se debe de realizar, de modo que cuando ocurre una falla o un paro, se disponga del personal, repuesto y documentación técnica necesarios para realizar la reparación adecuada, mientras que el no planificado se le llama mantenimiento de emergencia, el cual debe efectuarse de urgencia, ya sea por avería imprevista o por una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de alguna norma legal, etc.). En resumen, este tipo de mantenimiento es muy precario y sus características son: procurar que haya pocas averías y si las hay se deben de resolver rápidamente, aunado a eso que normalmente es un mantenimiento costoso.

El siguiente tipo de mantenimiento es el preventivo, el cual consiste en efectuar determinadas revisiones en periodos establecidos a los elementos de una instalación, sin importar que se hayan averiado o funcionen correctamente, esto con la finalidad de ajustar, reparar o cambiar partes o piezas de una instalación, equipo, etc. antes de que ocurra una falla, daños o accidentes. Este tipo de mantenimiento que consiste básicamente en la revisión periódica tiene dos ventajas:

1. Permite minimizar el número y consecuencias de averías, al vigilar el estado de los elementos que constituyen el sistema a mantener, además de posibilitar la reparación o reposiciones programadas.
2. Garantiza la degradación imprevista por lo que permite alcanzar de manera adecuada la vida útil de los equipos y en ciertas ocasiones se logra alargar la vida útil.

Estos tipos de mantenimiento: correctivo y preventivo no son los únicos existentes, aunque son los más comunes y usados.

### 3.7.2 Mantenimiento Preventivo Para un Sistema de Generación Fotovoltaica.

Realizar periódicamente un buen mantenimiento (preventivo) de las instalaciones eléctricas tiene consecuencias positivas, tales como: mantener seguro a las personas y al sistema de generación fotovoltaica, mejora el rendimiento de equipos y dispositivos, ahorra dinero, disminuye las pérdidas de energía y garantiza su periodo de vida útil. Sin embargo, su puesta en práctica no es tan habitual como se esperaría, lo que ocasiona pérdidas económicas y en ocasiones accidentes que ponen en riesgo la vida. Por eso es recomendable realizar al menos tres revisiones periódicas en un sistema de generación fotovoltaica en el transcurso de un año, así se pueden detectar y corregir pequeños problemas, antes que estos produzcan fallas mayores o permanentes. Por ello es importante revisar el sistema cuando éste opere de manera correcta y no esperar a que ocurra la falla.

Muchas fallas son evitables si se realizan las siguientes inspecciones y se toman acciones, y esto se puede realizar con la siguiente rutina:

- Limpiar la cubierta frontal de vidrio del panel solar fotovoltaico, la limpieza debe efectuarse con agua y un paño suave; de ser necesario, emplee detergente. Jamás se debe de tratar de limpiar impurezas en la cubierta frontal del panel solar fotovoltaico con objetos cortantes o punzantes que puedan dañarlo.
- Inspeccionar las piezas que conforman la estructura que soporta a los módulos fotovoltaicos, esto se puede realizar moviendo suavemente algún modulo del sistema y verificar si alguna pieza esta floja o suelta.
- Verificar que no haya conectores flojos ni rotos, que las conexiones estén bien apretadas.
- Revisar que los conductores estén en buenas condiciones, si el cableado ha estado expuesto al sol o a la corrosión durante algún tiempo, es posible que tenga grietas en la cubierta de este, provocando así pérdidas de energía, fallas o accidentes.
- Medir, registrar y verificar que cada uno de los módulos fotovoltaicos tenga la tensión y corriente correspondiente a la hoja de especificaciones del fabricante.
- Registrar que todas las cajas de conexiones estén correctamente selladas, así como observar si existe corrosión o daños.

- Asegurar que los componentes electrónicos dentro de gabinetes tengan una adecuada ventilación.
- Revisar la operación adecuada de interruptores y fusibles, asegurando que el movimiento del interruptor sea sólido y checar si existe corrosión tanto en los contactos como en los fusibles.
- Verificar que el área donde se ubica el inversor o inversores se mantenga limpia, seca y con ventilación
- Comprobar que el inversor funcione adecuadamente y que no se produzcan ruidos extraños dentro de él.
- Eliminar la suciedad (utilizando un paño humedecido con agua o limpiador multiusos) que pueda dificultar la visualización de los indicadores y afectar el funcionamiento del inversor.
- En caso de tener banco de baterías, verificar que el lugar donde se encuentren tenga una buena ventilación e identificar que la estructura de soporte de las baterías este en buen estado.
- Se debe limpiar la superficie de las baterías, así como limpiar los bornes de conexiones y tratarse con anticorrosivos.
- Examinar el nivel de densidad específica del electrolito (ácido) en la batería, el cual debe estar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, esta revisión se recomienda hacerlo después de una recarga completa del banco de baterías.
- Tomar muestras de tensión de cada batería cuando estén bajo carga, la tensión no debe diferir más de lo que indica el fabricante o de un 10% del promedio de las tensiones de las demás baterías.

Conclusión: Respecto a los sistemas fotovoltaicos quedó claro que existen 2 tipos, que es el interconectado y el aislado a la red, los 2 sistemas comparten similitud en sus componentes con la diferencia que el aislado cuenta con baterías y su función es suministrar energía en las horas que no haya sol. En los 2 tipos de sistemas hay pérdidas a considerar, pero de las mencionadas en este trabajo las más importantes son pérdidas por temperatura del panel, pérdidas de sombreado y pérdidas debido al inversor.

Un sistema fotovoltaico es complejo en cuestión de protecciones ya que sin un debido seleccionamiento de estas protecciones se puede dañar todo el sistema fotovoltaico y a su vez podría repercutir contra el usuario que este revisando el sistema.

## CAPÍTULO 4

### DESARROLLO DEL PROYECTO

#### 4.1 Caso de estudio: Empresa Mafeva S.A. de C.V.

Mafeva, S.A. de C.V., es una empresa dedicada a la comercialización de materiales para construcción, agregados y artículos de ferretería en general, que gracias a sus más de 25 años garantizan cada uno de los productos que venden. Brindan una atención personalizada e inmediata con precios sumamente accesibles. Cuentan con personal capacitado y calificado para poder ofrecer una asesoría profesional de todos los productos.

Cuentan con una gran variedad de materiales para construcción, además de tener un gran stock de materiales eléctricos y de ferretería para poder surtir cualquier pedido, siempre con la garantía de tener existencia de todos los productos que ofrecen.

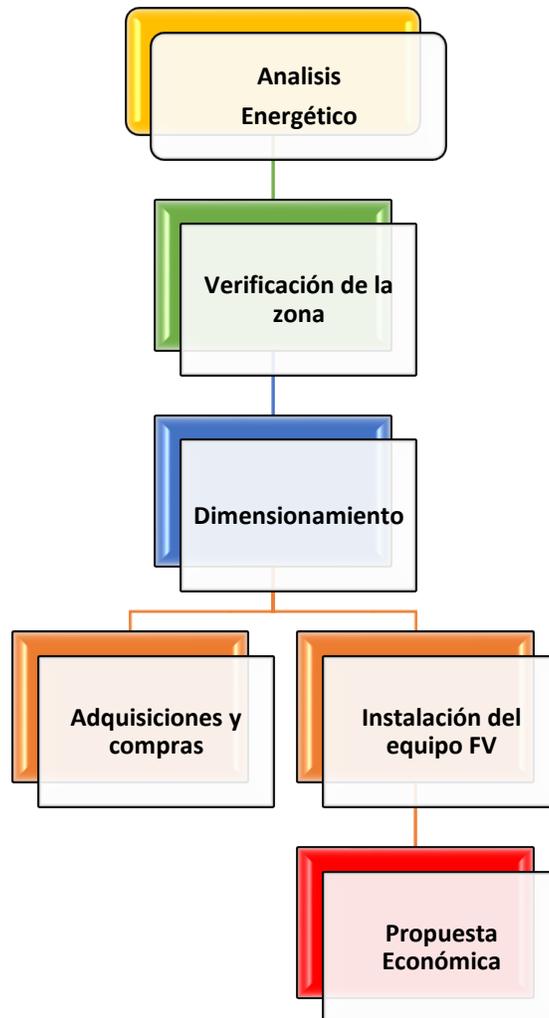
Comercializan:

- Cemento
- Mortero
- Block sólido
- Tabique
- Cal
- Tornillería
- Herramienta para albañilería
- Pinturas
- Material eléctrico
- PVC
- CPVC
- PPR
- Galvanizado
- Cobre
- Regaderas
- Mezcladoras para tarja y lavabo
- Materiales para construcción
- Aceros
- Pisos y azulejos
- Ferretería en general
- Arena
- Baños
- Lámparas
- Varilla
- Grava

La necesidad que tiene esta empresa para optar por la instalación de paneles solares fotovoltaicos es debido a que en el transcurso del tiempo se ha ido elevando considerablemente el consumo de energía eléctrica. Por este motivo esta empresa ha decidido reducir los costos económicos derivados de la empresa. Como resulta obvio, en todos aquellos lugares donde se da un alto consumo energético, la factura a pagar a final de mes supone un coste que, especialmente en el ámbito empresarial, a nadie le gusta pagar debido a su costo elevado.

## 4.2 Etapas para el Desarrollo del Proyecto

Para realizar un proyecto, se dice que hay que planearlo primero. Con base a lo anterior, se propuso una serie de pasos que englobaron todo el proyecto y trabajo. Cabe añadir que en el total de etapas propuestas fue de 6 como se observa en la Figura 4.1.



**Figura 4.1 Organigrama de los Pasos de la Instalación Fotovoltaica (Fuente: Elaboración Propia)**

### 4.3 Análisis Energético del Negocio

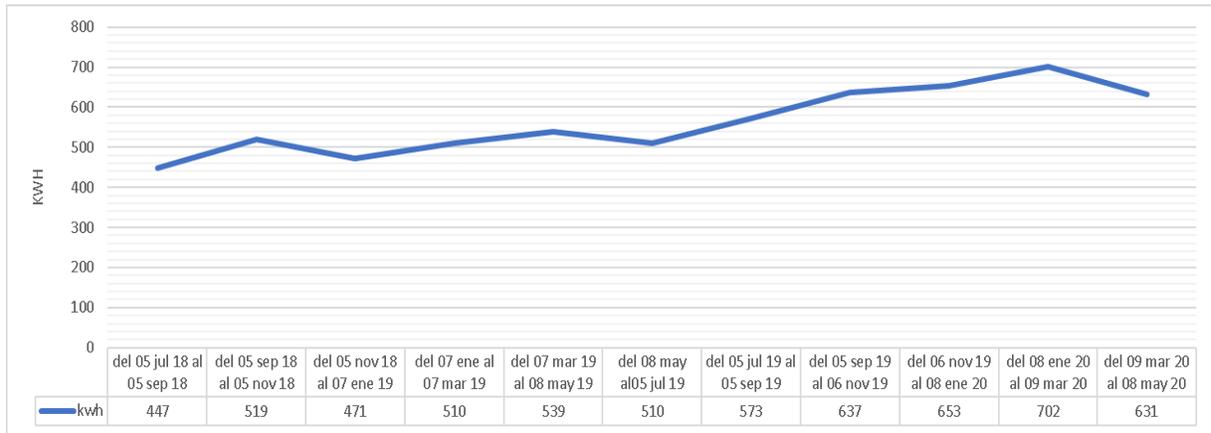
Como se puede observar en el Anexo (1.0) el bimestre que tuvo mayor costo reflejado en el recibo de CFE de energía eléctrica fue entre los meses que comprenden del 8 de Mayo el 2020 al 07 Julio del 2020 teniendo \$2833.00 M.N estando en tarifa PDBT.

Para obtener el consumo diario de este negocio, se tomó en cuenta los 2 últimos años sacando un promedio bimestral de los kWh como podemos observar en la Tabla 2.1, una vez que se obtuvo el resultado se dividió entre 60 para obtener el promedio diario.

**Tabla 2.1 Promedio Bimestral y Diario en KWh (Fuente: Elaboración Propia).**

<b>BIMESTRES</b>	<b>kWh</b>
del 09 mar 20 al 08 may 20	631
del 08 ene 20 al 09 mar 20	702
del 06 nov 19 al 08 ene 20	653
del 05 sep 19 al 06 nov 19	637
del 05 jul 19 al 05 sep 19	573
del 08 may al 05 jul 19	510
del 07 mar 19 al 08 may 19	539
del 07 ene al 07 mar 19	510
del 05 nov 18 al 07 ene 19	471
del 05 sep 18 al 05 nov 18	519
del 05 jul 18 al 05 sep 18	447
<b>promedio bimestral</b>	<b>562.909091</b>
<b>promedio diario</b>	<b>9.38181818</b>

Así mismo se realizó una gráfica con los datos de los 2 últimos años como se observa en la Figura 4.2 donde a medida que el tiempo avanza el consumo del negocio va incrementando.



**Figura 4.2 Gráfica del Consumo Bimestral (Fuente: Elaboración Propia)**

#### 4.4 Orientación de los Paneles

Tomando en cuenta que el movimiento del sol durante un día es de Este a Oeste, pero el movimiento durante un año es de Norte a Sur como se puede observar en la Figura 4.3, se requiere que los paneles estén fijos e inclinados hacia el Sur. El ángulo ideal del panel que se requiere varía dependiendo de la zona, por lo que el cálculo de la orientación del panel FV se obtiene por la Ecuación 4.1 según (Perpiñán, 2015) y el valor de la latitud de Zinapécuaro.

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69|\phi| \quad (4.1)$$

Donde:

$\beta_{opt}$  = Es la inclinación óptima para los paneles solares

$\phi$  = Es la latitud del lugar

Entonces:

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69|19^{\circ}.52'|$$

$$\beta_{opt} = 17.16 = 18^{\circ}$$

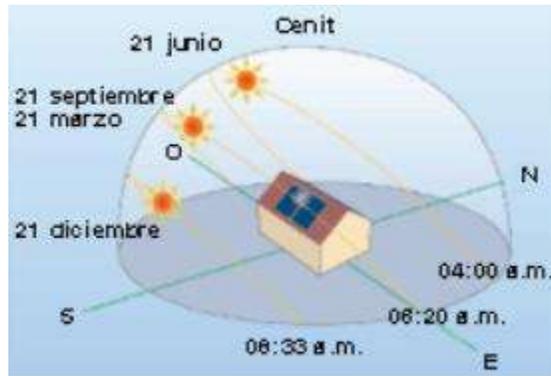


Figura 4.3 Ángulo Cenital (Fuente: Sliderplayer).

#### 4.5 Dimensionado del Sistema Fotovoltaico Bifacial

Después de analizar los conceptos teóricos del funcionamiento en particular de cada elemento integrado en un sistema fotovoltaico bifacial, y conocer mediante el recibo de CFE del negocio en este caso en la región de Zinapécuaro, se procede a realizar los cálculos correspondientes de cada elemento.

La metodología para estos cálculos se puede resumir en los siguientes pasos:

- Cálculo de la potencia FV
- Cálculo de número de módulos fotovoltaicos
- Cálculo del inversor
- Factores de corrección

#### 4.5.1 Cálculo de Número de Paneles Bifaciales

La potencia FV es lo primero a considerar para seguir con la selección de los paneles y sus respectivos cálculos.

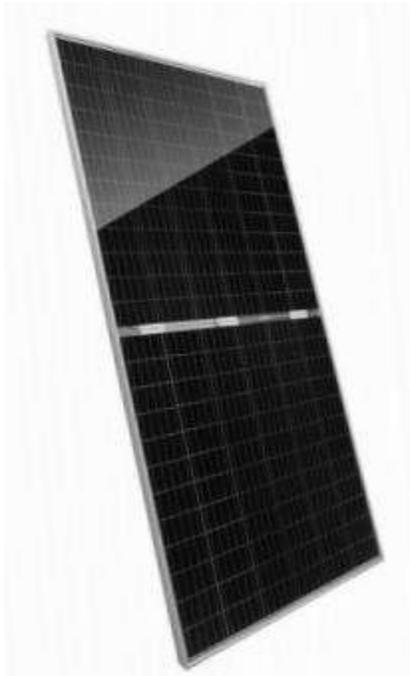
Considerando la ubicación geográfica del lugar donde se realizó el proyecto el cual tiene una irradiancia de 4.7 HSP en Zinapécuaro, y el consumo diario de 9.38 kWh obtenemos la potencia fotovoltaica dada por la ecuación 4.2 (Solar Center 2019):

$$Potencia\ Fotovoltaica = \frac{consumo\ diario}{hora\ solar\ pico} \quad (4.2)$$

$$Potencia\ Fotovoltaica = \frac{9.38\ kWh}{5.7\ h} \approx 1.645\ kW$$

La potencia fotovoltaica corresponde a la potencia que el usuario necesita en el lado de CA

Una vez que se obtiene el valor de la potencia fotovoltaica se selecciona un proveedor de módulos FV bifaciales. Una de las principales causas para seleccionar el tipo de paneles es la eficiencia y su potencia, ya que, con una mayor eficiencia y potencia, se reduce el número de paneles por instalación y área a utilizar. En este proyecto se optó por paneles bifaciales de 400 W de la marca Jinko como podemos observar en la Figura 4.6 ya que, por el área de la zona a instalar, la potencia requerida y la expansión del negocio a futuro nos permite cubrir la demanda y dejar espacio a próximas cargas instaladas, más datos del panel FV bifacial se muestran en el anexo (1).



**Figura 4.6 Panel Bifacial Jinko (Fuente: Catálogo Jinko).**

Considerando la potencia de los paneles FV bifaciales y la potencia FV ya calculada en la ecuación 4.1 (Solar Center 2019), se procede a calcular el número de paneles requeridos.

$$\text{Número de Paneles} = \frac{\text{potencia FV}}{\text{potencia del panel}} \quad (4.2)$$

$$\text{Número de Paneles} = \frac{1.645 \text{ kW}}{460W} = 3.57 \approx 4 \text{ paneles bifaciales}$$

Este cálculo es preliminar, donde aún no se consideran pérdidas de ningún tipo, así que se necesita un sobredimensionamiento considerando ciertas características.

#### 4.5.2 Elección del Inversor

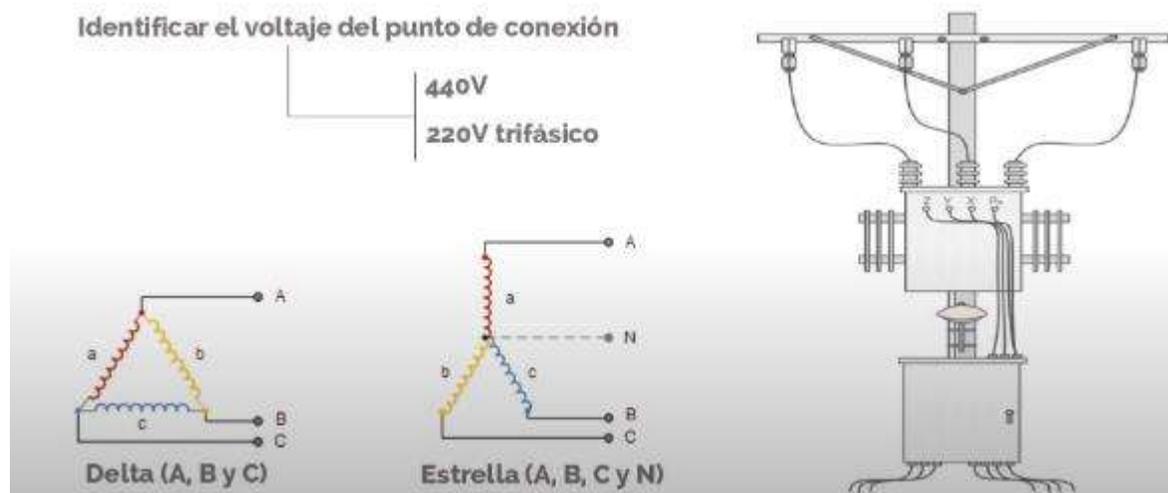
Para la selección de inversor se tienen dos parámetros importantes a tomar en cuenta:

1-El nivel del voltaje de red. Trifásica 220/127 V o Monofásica fase dividida 240/120 V.

2-La potencia del inversor que puede entregar.

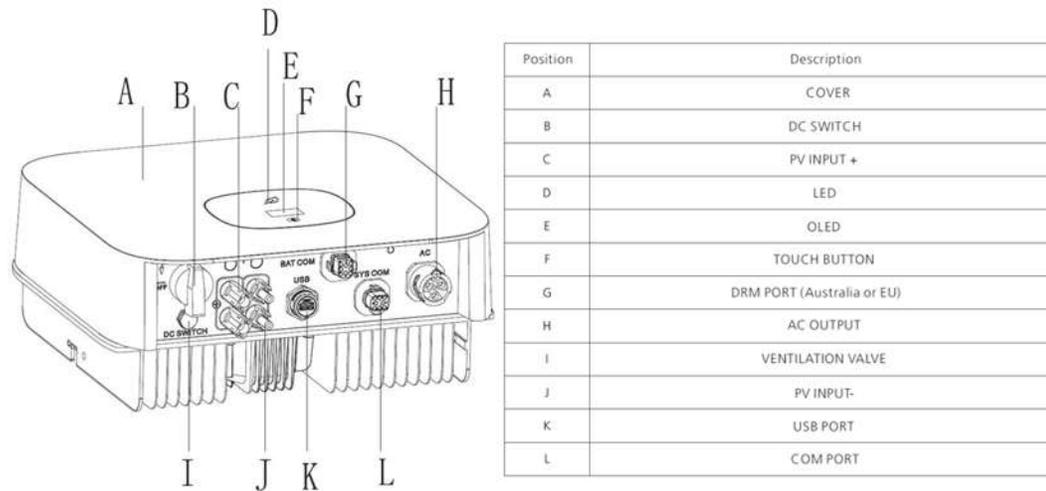
Para este caso es necesario un inversor mínimo de 2 kW de potencia fotovoltaica a 220/127 V trifásico.

Así mismo una de las formas de identificar el tipo transformador al que está conectado el negocio es por la forma física del transformador, por lo general un transformador bifásico tiene bordes curvos mientras que un transformador trifásico tiene una forma cuadrada. El tipo de conexión puede ser delta o estrella, si es delta presenta 3 fases y ausencia de neutro y la conexión estrella cuenta con 3 fases y neutro como se muestra en la Figura 4.7 en el transformador es muy visible ya que si se observan 4 bornes quiere decir que se tiene un transformador trifásico.



**Figura 4.7 Transformador Bifásico y Trifásico (Fuente: Coparoman).**

Tomando en cuenta que el inversor a utilizar proporcionará la potencia que pueda estar conectada al sistema y las características del transformador trifásico, se decidió seleccionar un inversor de la marca Growatt MIN 2500TL-X como se observa en la Figura 4.8 con una potencia máxima de 4200 W.



**Figura 4.8 Inversor Growatt MIN 2500TL-X (Fuente: Catálogo Growatt).**

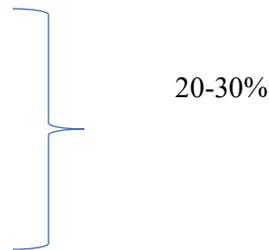
#### 4.5.3 Factores de Corrección

Es necesario considerar las pérdidas de energía desde el punto de generación hasta el punto de interconexión del sistema, esto da como resultado un sobredimensionamiento de los módulos solares e inversor (Fuente: Solar Center 2019). Las pérdidas que considerar son las siguientes:

Condiciones atmosféricas (viento, nubes, etc.)

Eficiencia del Inversor.

Coefficientes de temperatura del módulo solar.



Se tiene entonces:

$$\text{Número de paneles} = (4)(25\%) = 1$$

$$\text{Número de paneles} = 4 + 1 = 5$$

Se optó por dejar 3 módulos más ya que en un futuro cercano la empresa Mavefa se expandirá y colocará más equipos consumiendo más energía eléctrica.

$$\text{Numero de paneles} = 5 + 3 = 8 \text{ bifaciales de } 460 \text{ W}$$

Se requiere un inversor con 1 o 2 MPPT, la posibilidad son dos cadenas y 4 paneles, o una cadena de 8 paneles.

#### 4.5.4 Diagrama Unifilar del Sistema Fotovoltaico Bifacial a Implementar

Para la instalación, se debe de contar con un diagrama unifilar como se observa en Figura 4.9 en donde se muestran los equipos que contiene el sistema fotovoltaico, tales como la red general de distribución, el medidor bidireccional (que tiene como función de contabilizar la energía recibida por la compañía suministradora y la energía que es enviada al sistema eléctrico), interruptores, protecciones, inversor, y los paneles solares.

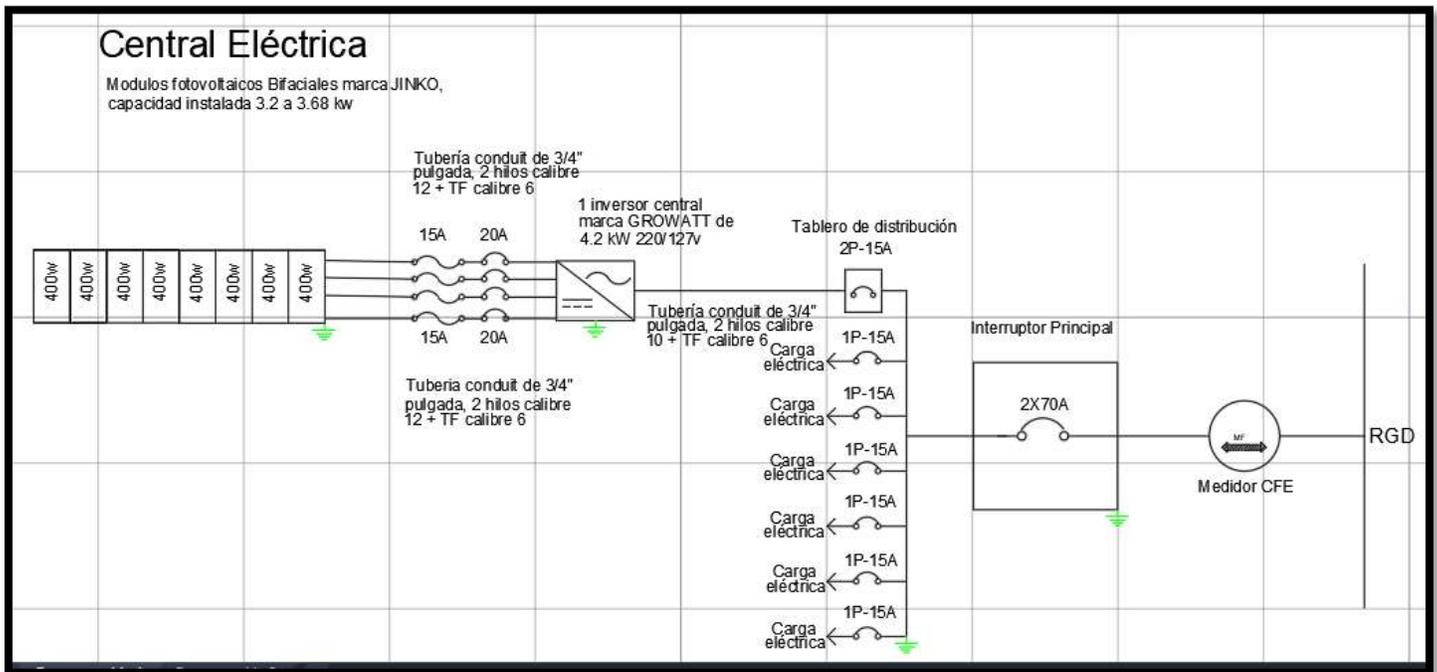
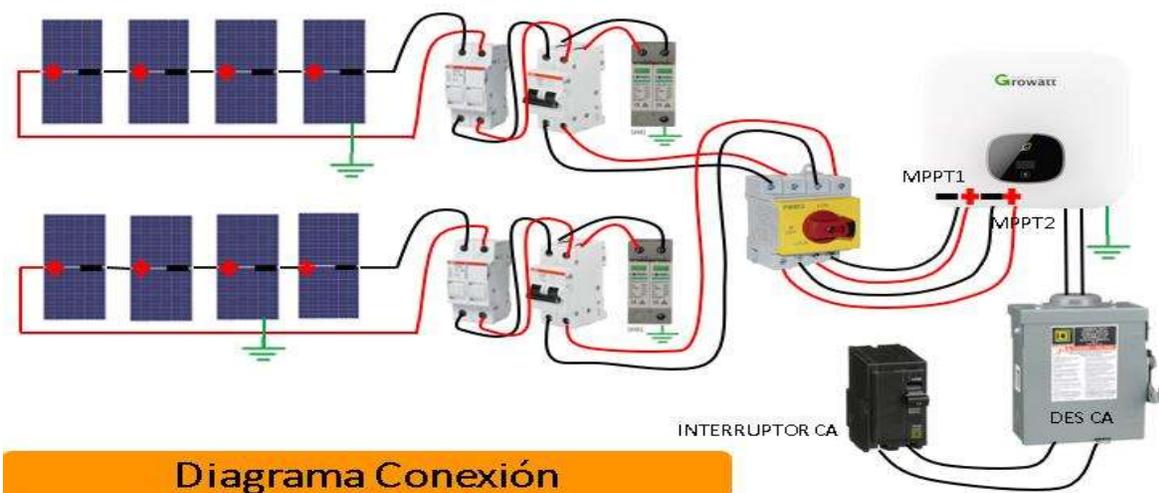


Figura 4.9 Diagrama Unifilar (Fuente: Elaboración Propia).

#### 4.5.5 Diagrama de Conexión

Así mismo se cuenta con un diagrama de conexión con los componentes físicos como lo son (interruptor termomagnético, fusibles, inversor etc.), así como el cableado y el tipo de conexión que tiene la instalación como se muestra en la Figura 4.10.



### Diagrama Conexión

Figura 4.10 Diagrama de Conexión (Fuente: Elaboración Propia).

#### 4.5.6 Material

Es indispensable describir la lista de materiales y equipos que fueron necesarios para comenzar, desarrollar y finalizar el proyecto fotovoltaico. Se presenta una lista de materiales como se observa en la Tabla 4.1 y equipo básico que se propusieron y utilizaron durante todo el proceso de desarrollo del objetivo general.

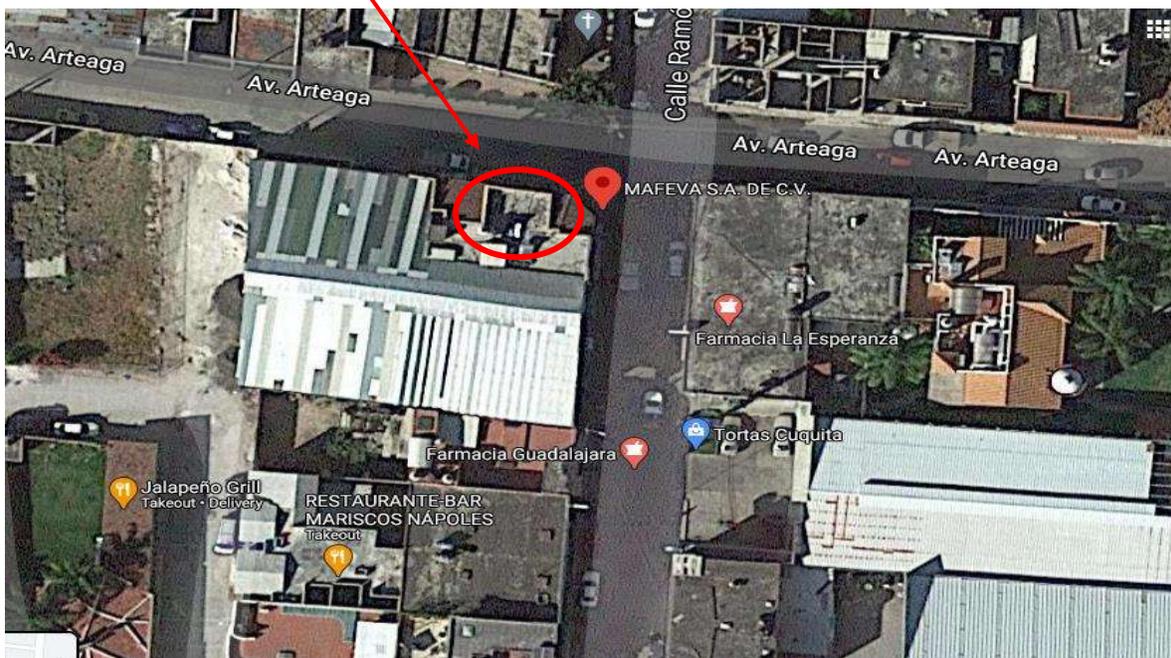
**Tabla 4.1 Lisita de Material (Fuente: Elaboración Propia).**

MATERIAL	CANTIDAD	ESPECIFICACIONES
Cable	100 m	THW-LS
Abrazaderas p/panel	7 piezas	Acero Inoxidable
Tornillos para Abrazaderas	7 piezas	Acero Inoxidable
Tubería para instalaciones eléctricas	40 m	Conduit Metálica
Abrazaderas de tubo	5 piezas	Metálicas
Cajas de Registro	5 piezas	Metálicas
Codos 90° para tubo Conduit	3 piezas	Conduit Metálicos
Taquetes 1/4	50 piezas	Plástico
Pijas 8x2	20 piezas	Aluminio
Estructura	1 piezas	Acero

#### 4.6 Implementación del Proyecto

Como se puede observar en la Figura 4.11 el negocio se ubica en una esquina donde el área de color verde es la zona donde se instalaron los paneles fotovoltaicos ya que es el área más factible, esto debido a que la demás área disponible del negocio son láminas algo desgastadas por lo que no es recomendable su instalación.

Área de instalación fotovoltaica



**Figura 4.11 Vista Satelital del negocio (Fuente: Google Maps).**

Del lado izquierdo donde se aprecia el techo laminado, se pretende que en un futuro se edifique y por lo tanto se expandirá el negocio colocando más maquinaria y equipo de cómputo por lo que requerirá un sobredimensionamiento del sistema y por ende más paneles fotovoltaicos.



**Figura 4.12 Vista Frontal del Negocio (Fuente: Google Maps).**

Es necesario conocer el tipo de transformador con la que cuenta el negocio para la selección del inversor para esto se necesita verificar la zona y ver si es un inversor monofásico o trifásico, como se observa en la Figura 4.13.



Transformador Trifásico

**Figura 4.13 Vista del Negocio y del Transformador (Fuente: Google Maps).**

En esta fase se procedió a subir la estructura mandada a fabricar con el herrero, con la ayuda de todo el equipo se colocó la base previamente pintada de blanco, se recibió la indicación que el techo en el transcurso de la semana se pintará de blanco para que la parte bifacial del panel fotovoltaico reciba mayor radiación solar de albedo.



**Figura 4.14 Montaje de la Estructura y Rieles (Fuente: Elaboración Propia).**

La siguiente etapa fue comenzar la instalación en la zona previamente designada y validada. Durante el proceso se requirió de la ayuda del alumbrado, para esta operación, es necesario contar con el asesoramiento de personal calificado que ya tenga experiencia en las instalaciones fotovoltaicas, por ello se estuvo constantemente en observación con los ingenieros eléctricos para resolver dudas y problemáticas que surgieran.



**Figura 4.15 Vista de los 8 Paneles Colocados (Fuente: elaboración Propia).**

Como se muestra en la Figura 4.15 fue como quedaron los 8 paneles fotovoltaicos ya colocados en serie y empotrados a la estructura por lo cual se procedió a conectar los paneles entre sí, siguiendo con el protocolo, se conecta el cableado que unirá la potencia y voltaje de estos al conectarlos en serie (el amperaje permanece igual), esto se muestra en la Figura 4.16, en la que se hace notar la conexión en serie para los paneles solares.



**Figura 4.16 Vista de los Paneles de la Parte Bifacial (Fuente: elaboración: Propia).**

A continuación, se tiró una línea hacia el interior de una base de concreto para tinaco, esto para conectarlo con un inversor y los sistemas de protección para el conectado a la red de Comisión Federal de Electricidad. Esto se muestra en la Figura 2.17, en la que se utilizó tubería galvanizada para protección interna del cableado contra el sol y la lluvia, además de protección contra algunos insectos y ratas que pudieran roer el plástico del conductor y protección de seguridad de descarga eléctrica para el usuario.



**Figura 4.17 Vista del Inversor y Protecciones montadas (Fuente: elaboración Propia).**

Conclusión: Para llevar a cabo este tipo de instalaciones es necesario contar con una buena capacitación para conocer y seleccionar el tipo de elementos a seleccionar para usar posteriormente. Hay distintas maneras de obtener el número de paneles, capacidad del inversor, protecciones etc., pero la presentada en este trabajo es la que nos ha funcionado mejor. En esta parte relacionada a la instalación, se obtuvieron conocimientos de manejo de material, así como de herramientas.

## CAPÍTULO 5

### EVALUACIÓN ECONÓMICA

#### 5.1 Evaluación Económica de Proyectos

Cualquier plan de inversión tiene efectos o impactos de distinta naturaleza, directos, indirectos y externos. En la valoración económica tienen la posibilidad de existir recursos perceptibles por una sociedad como perjuicio o beneficio que, al instante de su ponderación en unidades monetarias, sea imposible o enormemente difícil materializarlo. En la economía contemporánea se realizan intentos, por llegar a aproximarse a procedimientos de medición que aborden los recursos cualitativos, pero continuamente supeditados a una apreciación subjetiva de la verdad.

Es por esto por lo que se hace primordial el análisis de varios índices que afectan de forma directa en la toma de decisiones e influyen de manera directa en el cálculo de la productividad de una compañía y los proyectos asociados, así mismo se estudian los procedimientos más frecuentes para calcular la productividad de proyectos de inversión.

#### 5.2 Costo del Sistema Fotovoltaico

En el capítulo anterior se realizaron los respectivos cálculos y el diseño del Sistema Fotovoltaico, en este punto se abordará el costo aproximando del material como podemos observar en la Tabla 5.1 que se utilizó, así como la mano de obra de los miembros especialistas que se participaron. En el proceso de instalación, el personal que colaboró es el siguiente:

- 3 Ingenieros
- 1 Herrero
- 1 Ayudante General

**Tabla 5.1 Lista de Salario por Día y Semana (Fuente: Elaboración Propia).**

Oficio	Salario por Día	Pago Semanal	Número de Trabajadores	Total Semanal	Total Quincenal
Ingeniero	\$ 600.00	\$ 3,600.00	3	\$ 10,800.00	\$ 21,600.00
Herrero		\$ 7,000.00	1	\$ 7,000.00	
Ayudante General	\$ 70.00	\$ 420.00	1	\$ 420.00	\$ 840.00
			<b>TOTAL</b>	\$ 18,220.00	\$ 29,440.00

Cabe destacar que para tener un buen funcionamiento del equipo solar es fundamental hacer una revisión una vez al año. Dentro de las principales piezas que hay que revisar en el mantenimiento son las juntas, estado de los paneles y la resistencia. Así como limpiar de cal el acumulador y el depósito, reapretar todos los tornillos, limpiar las placas tanto exteriormente como interiormente, revisar la tubería por posibles o futuras fugas de agua, revisar la bomba y revisar las conexiones eléctricas. El precio medio es de \$3,200.00 MXN.

$$Total\ Mano\ de\ Obra = \$29,440.00 + \$3,200.00 = \$32,640.00$$

### 5.3 Costo Total del Material

El material que se adquirió para esta instalación fue proporcionado por los distribuidores en dólares, tomando en cuenta que el dólar se encuentra en 20.38 pesos M.N; los precios tanto en dólares como en pesos mexicanos se muestran en la siguiente tabla, así como el material utilizado como se observa en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2 Salario Total a Pagar de los Trabajadores (Fuente: Elaboración Propia).**

Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Importe
8	Swan bifacia HC 72M 400 Watt	\$ 146.85	\$ 1,174.80
1	Growatt MIN 3600 TL-X	\$ 467.20	\$ 467.20
1	Caja Combinadora Merz, 1 MPPT, 2 STRINGS, 15 A, 600 VDC	\$ 86.85	\$ 86.85
1	MC4 con Diodo de 10 A para Protección de Corriente de Retorno	\$ 5.73	\$ 5.73
1	Caja con 10 Fusibles Mersen de 20 A @ 1000 VDC 10 x 38 mm	\$ 25.83	\$ 25.83
1	Cable Fotovoltaico rojo PV WIRE CAJA 100 m, 10 AWG 200 V	\$ 74.75	\$ 74.75
8	Conector MC4 Macho para Cables 12-10 AWG	\$ 1.14	\$ 9.12
8	Conector MC4 Hembra para Cables 12-10 AWG	\$ 1.14	\$ 10.72
		Subtotal	\$ 1,855.00
		IVA	\$ 343.79
		Total USD	\$ 2,198.79
		Total Pesos M.	\$ 44,811.34

Para obtener el costo total del sistema fotovoltaico se suma el costo de mano de obra por instalación más el costo del material, quedando de la siguiente manera

$$\text{Costo Total} = \text{Material Utilizado} + \text{Mano de Obra} \quad (5.1)$$

$$\text{Costo Total} = \$44,811.34 + \$32,640.00 = \$77,451.34$$

De esta manera el costo final del sistema fotovoltaico es de setenta y siete mil pesos cuatrocientos cincuenta y un pesos M.N.

#### 5.4 Determinación de la Energía Eléctrica de los Paneles Fotovoltaicos Propuesta

Para determinar la energía eléctrica que se generara durante la vida útil de los paneles FV que es de 30 años, se calcula con la ecuación 5.2

$$E_G = \frac{(P_M)(N.\text{módulos})(HP)(365 \text{ días})(N.\text{de años})}{1000} \quad (5.2)$$

$$E_G = \frac{(400)(8)(5.6)(365)(30)}{1000} = 196224 \text{ kW-h}$$

Si se quiere saber la energía producida mensual se debe dividir entre el número de meses totales que son 360 meses.

$$E_{G(MENSUAL)} = \frac{E_G}{360 \text{ meses}} = 545.06 \text{ kW/h}$$

La energía mensual total que se produce es de 547.06 kW/h, que es la energía eléctrica que se puede aprovechar en un mes con condiciones óptimas de radiación solar. Esto puede conocerse como el ahorro económico que se tiene durante un mes de energía eléctrica consumida.

#### 5.5 Costo del Consumo eléctrico con Paneles Fotovoltaicos

Ya que se obtuvo la energía generada del sistema FV, se procederá a hacer el cálculo del costo por consumo con paneles FV (mensual) tomando en cuenta la carga que se tiene en el negocio y la tarifa correspondiente de CFE que es PDBT que es igual a \$3.271 por KW-h consumida.

$$\text{Costo por Consumo} = (545.06 \text{ kW} - h) \left( \frac{\$3.271}{\text{kW} - h} \right) = \$1782.89 \quad (5.3)$$

Con esto se tiene un ahorro de 1784.65 pesos M.N por cada mes de facturación, esto es un ahorro considerable que se puede amortizar el costo inicial del sistema fotovoltaico

### 5.6 Recuperación Económica del Sistema Fotovoltaico

En este apartado se calculará el tiempo en el cual el SFV tendrá una amortización económica y la viabilidad del proyecto que se llevó a cabo. Con los siguientes datos se calcula el tiempo en que se tendrá una amortización:

Costo del Sistema: \$ 77,451.34

Costo por Consumo (ahorro mensual aprox): \$ 1,782.89

$$\text{Amortización} = \frac{\text{Costo Total del Sistema}}{\text{Costo por consumo (Ahorro Mensual)}} \quad (5.4)$$

$$\text{Amortización} = \frac{\$77,451.34}{\$1,782.89} = 43.44 \text{ meses aprox.}$$

Con el resultado obtenido se observa que en 43.44 meses (aproximadamente 3 años con 6 meses) habrá una amortización en el costo inicial del sistema fotovoltaico lo cual es una recuperación rápida, a comparación de otros sistemas fotovoltaicos donde la recuperación económica para el cliente es de al menos 7 años.

Conclusión: En toda empresa pequeña, mediana o grande debe de llevarse correctamente la administración, se debe de tener un conocimiento sobre el costo de los materiales y hacer una comparativa del mercado de este ámbito, este capítulo presentó una de las partes complicadas de este trabajo ya que no contaba con los conocimientos suficientes, pero gracias al apoyo de uno de los ingenieros de la empresa es que pude desarrollar este apartado ya que él tiene conocimientos en esta área.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusión

El presente trabajo de investigación fue analizar e implementar la factibilidad de instalar un sistema de energía limpia por medio de paneles fotovoltaicos bifaciales interconectadas a la red eléctrica para alimentar el consumo energético de un negocio ferretero Mavefa S.A de C.V. Se determinó el consumo real del negocio que es de 1645 kW, se determinó que el tipo de panel fotovoltaico adecuado para el negocio son paneles bifaciales monocristalinos de 400 W, por tener alta eficiencia y desempeño. Una vez realizados los estudios del sitio, así como el estudio y dimensionamiento para seleccionar los dispositivos correspondientes, como lo son: número de planes, estructura de montaje, protección, inversor, elementos que integran el sistema solar fotovoltaico; procedimos a la instalación con gran resultado. Después del trabajo que se realizó podemos asegurar que los objetivos se llevaron a cabo con éxito en tiempo y forma, realizando primero el estudio de viabilidad de la zona para el establecimiento de sistemas fotovoltaicos para consumo energético, interconectando a la red el sistema que abastece las luminarias en un negocio ferretero de, para esto fue necesario realizar el dimensionamiento, diseño y la instalación de paneles fotovoltaicos monocristalinos. Utilizando el software AutoCAD se diseñó el diagrama unifilar del sistema de celdas fotovoltaicas que se adecuó a los espacios disponibles para su instalación en el techo del negocio. Se realizó un análisis del costo-beneficio de la instalación del sistema fotovoltaico para Mavefa y se determinó la factibilidad de instalar el sistema de energía limpia en el negocio puesto que la vida útil promedio de los paneles fotovoltaicos es de 25-30 años en condiciones normales, el costo de instalación inicial aparenta ser elevado aproximadamente \$77,451.34 pesos M.N. y el tiempo de amortización es de 3.6 años. Con los datos recabados se observa que en los últimos años los paneles solares fotovoltaicos han pasado de ser una energía limpia generada en laboratorios como lo describen muchas revistas científicas, para hacerse factible de instalarse en edificios del gobierno y casas habitación, viéndose reflejado el ahorro económico como al ambiente.

## 5.2 Recomendaciones

En lo que se refiere al tema de energía renovable por sistemas fotovoltaicas hay un gran campo todavía por explorarse, ya que laboratorios, empresas y universidades en todo el mundo que están en una constante búsqueda de nuevas tecnologías, para la formación de celdas que las hagan más eficientes y con un menor costo, sería interesante realizar un estudio de factibilidad con celdas solares sensibilizadas con tinte, monofaciales y bifaciales para resaltar cual tiene mejores características tanto en rendimiento como económico.

Los resultados obtenidos demuestran que es viable la instalación de un sistema de paneles fotovoltaicos bifaciales en el edificio Mafeva S.A de S.V

## Bibliografía

- Appelbaum, J. (2016). Bifacial photovoltaic panels field. *Renewable Energy*, 85, 338–343. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.050>
- Curley, R. (2011). *Renewable and Alternative Energy*. Rosen Education Service.
- Guerrero-Lemus, R., Vega, R., Kim, T., Kimm, A., & Shephard, L. (2016). Bifacial solar photovoltaics – A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1533–1549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.041>
- Romo, D., & Morales, D. (2021). Evaluación y propuesta de eficiencia energética usando energía fotovoltaica en la “Universidad Católica de Cuenca sede Azogues”. *Revista Técnica «energía»*, 17(2), 44–54. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v17.n2.2021.420>
- sitiosolar. (2021, 22 Febrero). La historia de la energía solar fotovoltaica. <http://www.sitiosolar.com/la-historia-de-la-energia-solar-fotovoltaica/>
- Universidad Tecnológica de Pereira, LIBRO INTERACTIVO SOBRE ENERGÍA SOLAR Y SUS APLICACIONES, Colombia, 2011.
- Universidad Tecnológica de Pereira, LIBRO INTERACTIVO SOBRE ENERGÍA SOLAR Y SUS APLICACIONES, Colombia, 2011.
- Vilorio, R. J. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber*. Paraninfo.
- yubasolar, (2021, 02 Marzo). Página principal. España. 17 Marzo 2016. <http://www.yubasolar.net/2015/03/factores-de-perdidas-energeticas.html>

Referencias y Otras fuentes:

- Díaz, C. J. M. (2012). Seguridad e higiene en el trabajo (10º Edición) (10.a ed.) Tebar Flores.
- J. De Bora. (1999). LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO, Guía para el Responsable de la Conservación de Locales e Instalaciones. Criterio para la Subcontratación España: Fundación Confemetal.
- J. Díaz. (2012). Organización y control del mantenimiento de instalaciones solares fotovoltaicas, España: Paraninfo, S.A.
- Krauter, S. C. W. (2006). Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems: Modeling of Optical and Thermal Performance, Electrical Yield, Energy Balance, Effect on Reduction of Greenhouse Gas Emissions (2006 ed.). Springer.
- Cotizaciones Tecnoenergía alternativa de México, S.A. de C.V. Anexo 1
- <http://www.cfe.gob.mx/>
- <http://www.ecologistasenaccion.org/article16233.html>
- [http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/que\\_es\\_la\\_energia\\_solar](http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/que_es_la_energia_solar)

## Anexos

### Anexo 1. Recibo de CFE que refleja un costo mayor

Costos de la energía en el Mercado Eléctrico Mayorista					Desglose del importe a pagar	
Concepto	\$	\$/kW	\$/kWh	Importe (MXN)	Concepto	Importe (MXN)
Suministro	81.50	0.00	0.00	81.50	Cargo Fijo <sup>3</sup>	81.50
Distribución	0.00	0.00	770.74	770.74	Energía	2,136.96
Transmisión	0.00	0.00	105.44	105.44	Subtotal	2,218.46
DENACE	0.00	0.00	5.02	5.02	IVA 16%	354.95
Energía	0.00	0.00	776.84	776.84	Fac. del Periodo	2,573.41
Capacidad	0.00	0.00	475.40	475.40	DAP <sup>2</sup>	259.60
SCrMEM <sup>1)</sup>	0.00	0.00	3.52	3.52	Adeudo Anterior	2,876.08
<b>Total</b>	<b>81.50</b>	<b>0.00</b>	<b>2,136.96</b>	<b>2,218.46</b>	Su Pago	2,876.00-
					<b>Total</b>	<b>\$2,833.09</b>

## Anexo 2. Especificaciones del Panel Solar



### Packaging Configuration

( Two-pallets = One stack )

27pcs/pallets, 54pcs/stack, 594pcs/ 40'HQ Container

### Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono PERC 158.75×158.75mm
No. of cells	144 (6×24)
Dimensions	2031×1008×40mm (79.96×39.69×1.57 inch)
Weight	23.3 kg (51.3 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm <sup>2</sup> (+): 250mm, (-): 150 mm or Customized Length

## SPECIFICATIONS

Module Type	JKM380M-72H-TV		JKM395M-72H-TV		JKM400M-72H-TV		JKM415M-72H-TV		JKM430M-72H-TV	
	STC	NOCT								
Maximum Power (Pmax)	380Wp	282Wp	385Wp	285Wp	390Wp	290Wp	395Wp	293Wp	400Wp	297Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	35.36V	36.63V	35.50V	36.88V	35.62V	37.22V	35.83V	37.55V	40.01V	37.64V
Maximum Power Current (Imp)	9.56A	7.86A	9.76A	7.75A	9.84A	7.78A	9.92A	7.81A	10.00A	7.89A
Open-circuit Voltage (Voc)	47.96V	45.17V	48.10V	45.30V	48.14V	45.34V	48.26V	45.45V	48.35V	45.54V
Short-circuit Current (Isc)	10.02A	8.08A	10.08A	8.14A	10.17A	8.21A	10.23A	8.26A	10.32A	8.34A
Module Efficiency STC (%)	18.56%		18.81%		19.05%		19.29%		19.54%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.36%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.29%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

## BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		JKM380M-72H-TV	JKM395M-72H-TV	JKM400M-72H-TV	JKM415M-72H-TV	JKM430M-72H-TV
5%	Maximum Power (Pmax)	399Wp	404Wp	410Wp	415Wp	420Wp
	Module Efficiency STC (%)	19.49%	19.75%	20.00%	20.26%	20.52%
15%	Maximum Power (Pmax)	437Wp	443Wp	449Wp	454Wp	460Wp
	Module Efficiency STC (%)	21.35%	21.63%	21.91%	22.19%	22.47%
25%	Maximum Power (Pmax)	475Wp	481Wp	488Wp	494Wp	500Wp
	Module Efficiency STC (%)	23.20%	23.51%	23.81%	24.12%	24.43%

### Anexo 3. Especificaciones del Inversor

Ficha de datos	MIN 2500TL-X	MIN 3000TL-X	MIN 3600TL-X	MIN 4200TL-X	MIN 4600TL-X	MIN 5000TL-X	MIN 6000TL-X
<b>Datos de entrada</b>							
Máxima potencia fotovoltaica recomendada (Para módulos SiC)	3500W	4200W	5040W	5880W	6440W	7000W	8100W
Máximo voltaje DC	500V	500V	550V	550V	550V	550V	550V
Tensión de arranque	100V	100V	100V	100V	100V	100V	100V
Rango de voltaje del MPPT	80V-500V /360V	80V-500V /360V	80V-550V /360V				
Máxima corriente de entrada por MPPT	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A	12.5A/12.5A
Máxima corriente de corto circuito por mppt	16A/16A	16A/16A	16A/16A	16A/16A	16A/16A	16A/16A	16A/16A
Número de MPPT independientes / Strings por MPPT	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1
<b>Salida (AC)</b>							
Potencia nominal AC	2500W	3000W	3600W	4200W	4600W	5000W	6000W
Potencia aparente máxima AC	2500VA	3000VA	3600VA	4200VA	4600VA	5000VA	6000VA
Corriente máxima de salida	11.3A	13.6A	16A	19A	20.9A	22.7A	27.2A
Voltaje nominal AC / Rango	Default: 240V split phase, opciona: 208V & 240V monofásico, 183-228@208V 211-244@240V						
Rango de frecuencia AC	50±0.5Hz ± 5Hz	50±0.5Hz ± 5Hz	50±0.5Hz ± 5Hz	50±0.5Hz ± 5Hz	50±0.5Hz ± 5Hz	50±0.5Hz ± 5Hz	50±0.5Hz ± 5Hz
Factor de potencia ajustable	0.8 en adelanto - 0.8 en atraso	0.8 en adelanto - 0.8 en atraso	0.8 en adelanto - 0.8 en atraso	0.8 en adelanto - 0.8 en atraso	0.8 en adelanto - 0.8 en atraso	0.8 en adelanto - 0.8 en atraso	0.8 en adelanto - 0.8 en atraso
THDi	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%
Conexión AC	Monofásico	Monofásico	Monofásico	Monofásico	Monofásico	Monofásico	Monofásico
<b>Eficiencia</b>							
Máxima eficiencia	98.2%	98.2%	98.2%	98.4%	98.4%	98.4%	98.4%
Eficiencia Europea ponderada	97.1%	97.1%	97.2%	97.5%	97.5%	97.5%	97.5%
Eficiencia del MPPT	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%	99.9%
<b>Dispositivos de protección</b>							
Protección de polaridad inversa DC	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Interruptor DC	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Protección de sobrevoltaje DC	Tipo II	Tipo II	Tipo II	Tipo II	Tipo II	Tipo II	Tipo II
Protección de sobrecorriente de salida	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Protección contra sobretensión AC	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Monitoreo de falla a tierra	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Monitoreo de red	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Unidad de monitoreo de fuga de corriente sensible a todos los polos integrada	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
AFCI	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
<b>Datos generales</b>							
Dimensiones (WxHxD) en mm	375/350/160	375/350/160	375/350/160	375/350/160	375/350/160	375/350/160	375/350/160
Peso	10.8KG	10.8KG	10.8KG	10.8KG	10.8KG	10.8KG	10.8KG
Rango de temperatura de operación	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C	-25°C ... +60°C
Emisión de ruido (típico)	≤35 dB(A)	≤35 dB(A)	≤35 dB(A)	≤35 dB(A)	≤35 dB(A)	≤35 dB(A)	≤35 dB(A)
Altitud	4000m	4000m	4000m	4000m	4000m	4000m	4000m
Auto consumo nocturno	< 1W	< 1W	< 1W	< 1W	< 1W	< 1W	< 1W
Topología	Sin transformador	Sin transformador	Sin transformador	Sin transformador	Sin transformador	Sin transformador	Sin transformador
Enfriamiento	Convección natural	Convección natural	Convección natural	Convección natural	Convección natural	Convección natural	Convección natural