

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



***EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR
FOTOVOLTAICA DE PANELES MONO CRISTALINO EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE MONTERREY NL***

POR

EVARISTO GÓMEZ DÁVALOS

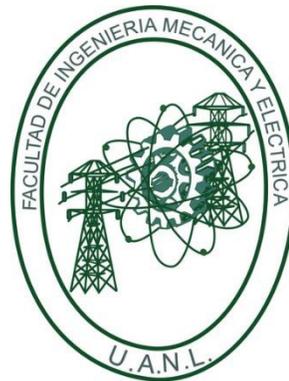
**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAestrÍA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS
TÉRMICA Y RENOVABLE**

ENERO, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



***EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR
FOTOVOLTAICA DE PANELES MONO CRISTALINO EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE MONTERREY NL***

POR

EVARISTO GÓMEZ DÁVALOS

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS
TÉRMICA Y RENOVABLE**

Enero, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis "Evaluación del desempeño de una instalación solar fotovoltaica de paneles mono cristalinos en el área metropolitana de Monterrey, N.L." realizada por el estudiante Evaristo Gómez Dávalos con número de matrícula 1501016, sea aceptada para su defensa en opción de grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable

El Comité de Tesis



M.C. Miguel García Yera

Director



Dr. Héctor Daniel García Lara

Revisor



Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo

Revisor



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León,

Noviembre de 2017

Dedicatoria

Estas páginas están dedicadas, con todo mi amor dedicación y esfuerzo, a todas esas personas que me apoyaron a lo largo de este proceso, personas que me motivaron e impulsaron a cada día dar siempre lo mejor de mí.

Con amor incondicional a mis padres que son mi pilar y quienes siempre han sabido guiarme por el camino de la rectitud, honradez y trabajo duro, pongo en este trabajo todas esas enseñanzas esperando les llene de orgullo el hojear estas páginas.

A mis hermanos, amigos, familiares y pareja, que sin importar la situación o la aventura, están incondicionales empujándome para legar más lejos.

A mi consejero y amigo el Dr. Jaime A. Castillo quien siempre ha tenido para mí y mi causa palabra de aliento, cariño y sabia orientación, que me han ayudado a poder alcanzar mis metas.

Y finalmente a Dios nuestro señor, que me ha dado la lección más grande de todas:

“Lo mejor que uno puede hacer, es vivir cada día dando lo mejor de sí mismo, guiándose con sus enseñanzas y teniendo Fe; que su obra y sus tiempos son perfectos”

Agradecimientos

Principalmente mi asesor y co-asesor por su paciencia, apoyo, empuje y su sabia dirección, que de no haber sido por ellos este proyecto tal vez no hubiera visto la luz.

A los maestros del programa de la maestría, que más que darme clases, me enseñaron que el esfuerzo tiene su recompensa.

A todos mis compañeros del grupo de energías térmicas y renovable, que conocen y entienden el compromiso y dedicación que nuestro título distingue.

Muy especialmente mis compañeros de generación que codo a codo vivimos y experimentamos desvelos, y sacrificios para lograr cumplir nuestra meta, a quienes fui conociendo poco a poco y pasaron de ser unos desconocidos a muy buenos amigos.

Resumen

El estudio realizado en el presente trabajo está enfocado en desarrollar un modelo matemático que prediga el desempeño energético de una instalación solar fotovoltaica en la zona metropolitana de la ciudad de Monterrey N. L., para tal efecto se realiza el monitoreo del desempeño de una instalación solar fotovoltaica de paneles solares monocristalinos, ubicada dentro de la zona de interés y comparada con el modelo matemático propuesto para el propósito. En base a la simulación numérica se determinará la relación entre la efectividad real de sistema y la presentada por la simulación.

Tabla de Contenidos

Capítulo 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Situación Actual.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Justificación	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivos Generales	5
1.3.2..... Objetivos Específicos	5
1.4 Hipótesis.	5
1.5 Alcance.....	6
1.6 Exclusiones	6
Capítulo 2	8
Estado del Arte	8
2.1 Energía Solar	8
2.2 Energía Solar Fotovoltaica.....	11
2.2.1. Semiconductor	12
2.2.2. Funcionamiento	14
2.2.3. Primero Años	18
2.2.4. Evolución	20
2.2.5. Situación Actual	22

2.3 Paneles Solares.....	25
2.3.1. Paneles solares	26
2.3.1.1. Panel solar monocristalino	27
2.3.1.2. Panel solar policristalino.....	28
2.4 Conceptos clave	29
2.4.1 Radiación.....	29
2.4.2 Irradiancia, irradiación e insolación.....	34
2.4.3 Potencia, voltaje y corriente.....	35
2.4.4. Eficiencia Energética	37
2.4.5. Factor de forma	37
2.4.6. Voltaje de máxima potencia (V_{mp})	38
2.4.7. Voltaje de circuito abierto (V_{oc})	38
Momento de la tensión máxima cuando se produce una ruptura en el circuito, en este momento la resistencia es infinitamente alta y no hay corriente en el circuito.....	38
2.4.8. Corriente de cortocircuito	39
La corriente de corto circuito ocurre cuando la impedancia es aproximadamente cero (cortocircuito) y se calcula cuando el voltaje en el módulo fotovoltaico es de cero volts.....	39
2.4.9. Coeficiente de temperatura	39
Capítulo 3	40
Especificaciones Técnicas	40
3.1 Descripción de la Ubicación	40
3.1.1. Principales Características Meteorológicas de la planta objeto de estudio	43
3.2 Descripción de la Planta Solar.....	46

3.2.1. Descripción de Dispositivos	47
3.2.1.1. Paneles Solares	48
3.2.1.2. Inversores	50
3.2.1.3. Estructuras	52
3.2.2. Diagrama de bloques.....	53
Capítulo 4.....	55
Análisis Teórico y Experimental.....	55
4.1. Descripción del Método Teórico.....	55
4.1.1 Aplicación del modelo matemático en el Software Matlab	65
4.1.2 Obtención de datos experimentales	71
4.1.3 Resultados del modelo teórico.....	73
Capitulo 5.....	75
Conclusiones	75
Capítulo 6.....	77
Trabajos Futuros.....	77
Bibliografía.....	78
Anexo 1.....	86
Hoja de Especificaciones:.....	87
Panel Suniva Optimus	88

Lista de figuras

Figura 1– Mapa de radiación global mundial	3
Figura 2 - Principio de la conversión fotovoltaica (Sabonnadiere, 2007)	15
Figura 3 - Efecto Fotoeléctrico	17
Figura 4 - Evolución de la eficiencia de diferentes celdas solares (NREL, 2015)	20
Figura 5. Encuesta de eficiencias de modulos de silicio disponibles en el mercado en el 2003.	23
Figura 6. Funcionamiento de un panel solar fotovoltaico.	26
Figura 7. Panel de silicio monocristalino	27
Figura 8. Panel de silicio poliristalino	29
Figura 9. Longitud de Onda	30
Figura 10. Frecuencia de onda	31
Figura 11. Espectro electromagnético (λ en m)	32
Figura 12. Componentes de la radiación solar (Handbook of Renewable Energy)	34
Figura 13. Curva de corriente – voltaje de una celda solar fotovoltaica	38
Figura 14. Área Metropolitana de Monterrey, fuente INEGI, Maco Geo estadístico Nacional actualizado al Censo de población y Vivienda 2010 .	41
Figura 15. Radiación Solar Directa Anual, National Renewable Energy Laboratory 2010.....	42
Figura 16. Ubicación geográfica de la planta solar	43
Figura 17. Temperaturas maximas (linea roja) y minimas (linea azul) basado en un analisis historico de 1980 al 2016, Weather Spark	44
Figura 18. Número de horas de sol al mes (línea negra) durante el 2016	44
Figura 19. Duración de horas de sol entre el alba y el crepúsculo hasta el 2016	45
Figura 20. Promedio Diario de energía solar incidente durante un año.	46

Figura 21. Instalación de los 15 paneles solares.	47
Figura 22. Paneles solares con inclinación de 25° sobre la horizontal.	47
Figura 23. Suniva Optimus Series	48
Figura 24. Curva de corriente y voltaje a diferente potencia de irradiación incidente en el panel solar	50
Figura 25. Inversor KACO Blueplanet.....	51
Figura 26. Montaje de la estructura Everest con paneles y superficie (lado izquierdo), y la estructura sin paneles (lado derecho)	52
Figura 27. Disposición de la estructura Everest.....	52
Figura 28. Diagrama de bloques de un sistema solar fotovoltaico común	53
Figura 29. Diagrama de bloques del sistema solar fotovoltaico bajo estudio....	54
<i>Figura 30 - Inclinación del eje terrestre</i>	56
Figura 31. Declinación del sol en diferentes días del año	57
Figura 32. Latitudes y longitudes terrestres	58
Figura 33. Variación de la Ecuación del Tiempo en Minutos	60
Figura 34.- Representación gráfica del Cenit, la elevación o altura y el Azimut	62
Figura 35. Relación de ángulos para la irradiación solar.	64
Figura 36. Producción de energía diaria del mes de julio.	72
Figura 37. Producción de energía diaria del mes de agosto.	72
Figura 38. Producción de energía diaria del mes de septiembre.	72
Figura 39. Comparación del recursos solar de la estación meteorológica vs el modelo matemático utilizado.	73
Figura 40. Comparación de la producción de energía de la planta fotovoltaica vs el modelo matemático utilizado.....	74

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificaciones mecánicas del panel solar	48
Tabla 2. Características del panel en condiciones estándar	49
Tabla 3. Especificaciones del inversor KACO Blueplanet	51

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Actual

En los últimos años se han popularizado las corrientes ideológicas que apoyan y fomentan el desarrollo sustentable, con el paso de los años se puede apreciar que la tendencia mundial ha ido en aumento, esto se debe en parte por la campaña de desprestigio hacia los energéticos tradicionales los cuales tienen que quemarse para poder hacer uso de su capacidad energética, por la ineficiencia en su aprovechamiento, así como el hecho de que son cada vez más caros (Dabdoub, 2016), obviando que estamos conscientes de la situación ecológica de nuestro planeta en este momento, situaciones como el cambio climático, la contaminación que da como resultado el efecto invernadero, el hoyo en la capa de ozono son solo algunos problemas ambientales que están relacionados con la situación energética.

Hoy en día vivimos en un mundo globalizado e interconectado en el cual los factores económicos, culturales y sociales que acontecen en un extremo del mundo afectan al otro. El área de los energéticos no es la excepción y desde la década de los setentas, cuando los países productores de petróleo elevaron sobremanera los precios del crudo impactando fuertemente a los países consumidores, fue entonces que las naciones se dieron cuenta que no podían seguir siendo tan dependientes del petróleo. La crisis energética es un tema que nos compete a todos, los altos costos en los hidrocarburos y el consumo de energía eléctrica, son factores cotidianos que nos afectan a todos

directamente. Es por eso que el desarrollar fuentes alternas de generación de energía también toma relevancia, buscando reducir costos y hacer más eficiente su producción, así como su uso para reducir gastos de consumo.

Con el tiempo se han desarrollado diferentes tecnologías y métodos para la generación de energía y se han clasificado por su fuente, algunas son:

- Energía Eólica
- Energía Hidráulica
- Energía Solar
- Energía Nuclear

Cada una de estas fuentes tiene sus variantes, métodos y sus características que los definen, este trabajo se centra en la energía solar fotovoltaica, la cual se explica a detalle más adelante, se hace mención que existen diferentes tipos de paneles, y así como sus estructuras son diferentes, también sus características, rendimientos y su comportamiento en un área geográfica en específico, por los factores que afectan su rendimiento tales como: temperatura, radiación, ángulo de inclinación, entre otras características importantes.

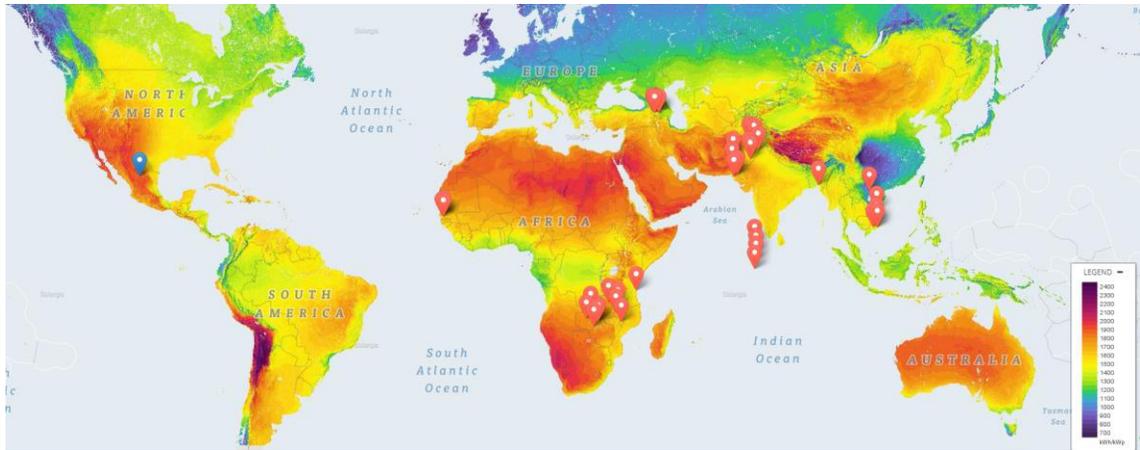


Figura 1– Mapa de radiación global mundial

México tiene un lugar sobresaliente respecto a la captación de radiación solar como lo podemos ver en la – **Mapa** de radiación global mundial, lo cual ofrece un amplio espectro de posibilidad de inversión y aprovechamiento para explotación del recurso solar, de hecho, el desarrollo de proyectos solares en México se encuentra en el tercer escaño a nivel mundial, dentro los países más atractivos y con mayor potencial para el desarrollo de proyectos de energía solar, tan sólo debajo de Singapur y China. (Mexico, 2014)

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad se ha hecho más común el empleo de métodos alternos para la generación de energía, éstos se han popularizado como energías limpias o renovables, las cuales han tenido una gran aceptación en los últimos años. El sol, como recurso renovable es “gratis”, el principal obstáculo era el precio de la tecnología para obtener la energía, pero con el paso del tiempo estos costos han descendido y ahora son más accesibles. La mayoría de los ciudadanos promedio, no tienen el conocimiento para deducir o juzgar que tipo de panel le

sirve mejor, cual material es mejor, a que inclinación colocarlo o sencillamente saber si es de calidad; lo que el ciudadano promedio puede saber es lo que el vendedor le provee en la hoja de especificaciones del producto, donde el fabricante determina la potencia máxima del panel.

Debido a esta situación surge la necesidad de una evaluación del desempeño de los paneles solares, en un ambiente específico, el cual pueda servir de instrumento para que el ciudadano, las empresas o las naciones puedan tomar la decisión más acertada acorde a sus necesidades y ubicación.

1.3 Justificación

Existe un área de oportunidad en la evaluación del desempeño de los paneles solares a nivel local, el problema radica en que no existen datos de que tan eficientes son los paneles en un punto geográfico específico y como segundo punto existen muchos factores ambientales que pueden afectar el rendimiento, los cuales se desestiman a la hora de hacer cálculos de generación de energía, para lo cual se toman las especificaciones técnicas obtenidas en condiciones de laboratorio, en este ejercicio se comparara el comportamiento de un sistema fotovoltaico de paneles de silicio monocristalino y su simulación matemática, para poder determinar qué tan considerable es la eficiencia bajo condiciones estándar la cual será simulada y la real la cual será obtenida de la planta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Generales

El objeto del presente trabajo es hacer una comparación del desempeño de una planta solar de paneles fotovoltaicos mono-cristalinos en condiciones reales de operación y la simulación de este sistema basada en un modelo matemático en condiciones óptimas. Una vez analizados los datos se podrá definir la diferencia entre los mismos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir los parámetros de funcionamiento de una instalación solar fotovoltaica conectada a la red de distribución eléctrica de 4,950 W de potencia instalada en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León
- Se analizará el desempeño de estos parámetros durante un año de manera experimental.
- Se implementará un modelo matemático, con base en las ecuaciones obtenidas de la literatura y se simulara el comportamiento utilizando el modelo matemático definido mediante el programa Matlab, haciendo un análisis comparativo de los datos obtenidos.

1.4 Hipótesis.

Mediante el estudio y análisis del comportamiento real de una planta solar fotovoltaica interconectada a la red es posible modelar el efecto de la radiación solar y su impacto en la generación de energía eléctrica.

1.5 Alcance

- Tener un estudio de los datos reales de la eficiencia de una planta solar en el área metropolitana de Monterrey N.L.
- Servir como punto de referencia para el desarrollo de nuevos productos e innovaciones en esta área
- Basándonos en el resultado de este estudio podremos determinar la viabilidad de proyectos de gran capital, para productores energéticos, inversores extranjeros, nacionales y locales.

1.6 Exclusiones

Es importante mencionar que este estudio, se centra únicamente en el desempeño de un sistema de paneles solares de silicio mono cristalino para una longitud, latitud y altura específica la cual se encuentra dentro del radio de lo que determinamos como área metropolitana de Monterrey en el estado de Nuevo León. Aunque este estudio pretende ser un análisis técnico, del desempeño de un sistema de paneles solares monocristalinos, no haremos parte de este trabajo el dimensionado en base a ciertos requerimientos de necesidad de consumo y/o potencia, esto significa que; el estudio que dictaminó la cantidad de paneles en base al consumo eléctrico del inmueble, no se tomara en cuenta, así como tampoco la interconexión a la red eléctrica y obviaremos el funcionamiento de los medidores bidireccionales.

Este trabajo se centra en el cálculo y simulación del recurso solar y su aprovechamiento para la conversión de energía mediante paneles solares, así

como en el análisis de los datos de una planta solar ya instalada y de la comparación de estos datos experimentales reales con los simulados.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Energía Solar

Según un estudio del departamento de energía de Estados Unidos (Tsao, Lewis, & Crabtree, 2006) el sol emite más energía hacia la tierra en una hora y media (480 EJ), que toda la consumida en el año 2001(430 EJ) y expertos del Global Alliance of Solar Energy Research Institutes (GA-SERI), predicen que para el año 2030 dos tercios de la energía consumida por la población mundial podrían originarse por tecnologías de energía solar fotovoltaica (Hicks, 2017). Así, entonces la energía que brinda el sol en forma de luz y calor, hoy en día puede ser transformada en energía eléctrica, gracias a los adelantos tecnológicos, disminuyendo el uso de energía procedente de las fuentes convencionales, sumándole a esto lo que dice el Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar, CeMIESol por sus siglas, asegura que la energía que recibe la tierra del sol en 10 días es equivalente a todas las reservas de petróleo, carbón y gas del planeta.

Asimismo, se puede justificar el uso de la energía solar, por diferentes factores que benefician a todos, no solo por el ahorro en el uso de energéticos tradicionales los cuales generan gases contaminantes que producen el efecto invernadero. El empleo de energías limpias como el uso de celdas solares ayuda e impacta directamente en la mejoría de la calidad del aire por lo tanto el medio ambiente se ve beneficiado. La energía solar como energía de sustitución parcial, se debe impulsar, eso se logrará a través de la investigación

básica y tecnológica en esta materia y en todas sus aplicaciones posibles. Lleva tiempo diciéndose que las reservas de hidrocarburos van a la baja y que los yacimientos de petróleo pronto van a terminarse, suponiendo que esto es cierto nos enfrentaríamos a una crisis energética, la cual es inteligente prevenir y anticipar preparando nuevas alternativas para la generación de energías.

México cuenta con una de las mejores ubicaciones del mundo para colectar la energía solar, ya que tres cuartas partes del territorio nacional son zonas con una insolación media arriba de los 5 KWh/m² al día, el doble del promedio en EUA. (Toledo, 2007)

En la ley de cambio climático, en su artículo tercero sección dos inciso E, se plantea que para el 2024 el 35% de la energía generada en México debe de ser de energías renovables (Cámara de diputados del H. congreso de la unión, 2012). Sin embargo, el 92% de la energía usada en México proviene de combustibles fósiles, mientras que sólo el 8% proviene de energías renovables. A medida que la tecnología y la investigación avanzan, surgen nuevos procesos de desarrollo de producto o incluso nuevo tipos de materiales que pueden o no ser más baratos pero si más eficaces, lo cual impacta directamente, en la proporcionalidad de costos. Hoy en día hay gran cantidad de países con tarifas eléctricas elevadas, debido a que para mantener su corriente de suministro dependen de materia prima extranjera, ya sea importando combustibles fósiles o comprando directamente la energía convertida.

Podríamos decir que el sol es una fuente infinita de energía y esto lo decimos ya que, aunque sabemos que tiene un lapsus existencial finito, nosotros no alcanzaremos a ver ese momento en el cual se acabe, así que por el momento la humanidad puede y debe utilizar este recurso natural renovable y explotar todas las utilidades que pudiéramos darle. El sol envía a la tierra en un cuarto de hora más energía de la que la humanidad utiliza durante todo un año aproximadamente el equivalente de $1,7 \times 10^{14}$ kW (Sabonnadiere, 2007) y no aprovechamos ni la décima parte de toda esta energía. Según la secretaria de energía “México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional, situación que resulta ideal para el aprovechamiento de la energía solar, ya que la irradiación global media diaria en el territorio nacional es alta” (SENER, 2012)

Existen dos formas de aprovechar la energía solar, una es la pasiva, la cual pretende mediante elementos arquitectónicos o el diseño funcional de edificios, el ahorro energético en consumo de luz para mantener temperaturas, para ocupar menos luz artificial eléctrica o consumo en flujo de aire o ventilación; la segunda es la forma activa la cual a través de medios como paneles solares o concentradores térmicos, trabajan específicamente en transformar la energía lumínica en otro tipo de energía, llámese térmica en el caso de los concentradores o eléctrica en el caso paneles fotovoltaicos.

En la transformación de la energía solar debemos estar pendientes de la radiación, la cual se convierte en un factor fundamental pero también de un factor que fácilmente se puede estimar, en base a antecedentes históricos lo cual permite tener cierto control o resultado esperado, ya que en la actualidad

existen suficientes datos como para estimar un resultado y en base a eso seleccionar un área o lugar en el cual se pueda esperar el resultado óptimo, de la misma manera en la que podríamos calcular o estimar el mejor resultado podemos analizar los factores que pueden influenciar a las pérdidas de rendimiento.

2.2 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es aquella que se transforma de la energía lumínica aprovechada de la radiación del sol en energía eléctrica a través de un proceso fotovoltaico el cual se lleva a cabo en los materiales semiconductores que forman las células fotovoltaicas, este desarrollo tecnológico es sin duda uno de los mejores del último siglo. La energía solar fotovoltaica tiene múltiples aplicaciones, en la actualidad sirve desde cargar un celular o hasta ser el sustento de algunas casa de campo que cuentan con sistemas autónomos lo que significa que no están conectados a alguna red eléctrica, incluso en la cuestión de telecomunicaciones, los paneles solares se utilizan desde hace tiempo en los satélites para su auto sustento en el espacio. Hoy en día este tipo de tecnología está evolucionando a grandes pasos en México, esto gracias a las últimas reformas energéticas, las cuales han permitido que el ciudadano mexicano pueda producir su propia energía para autoconsumo e incluso si produce de sobra poder retornarlo a la red eléctrica nacional y así disminuir su consumo, esta nueva reforma ha ocasionado que muchos usuarios opten por la instalación de paneles solares fotovoltaicos para disminuir su consumo

eléctrico y así tener un menos desgaste económico y aunque el adquirir este tipo de sistemas es costoso, es mucho más económico que hace 10 o 5 años y aun así el gasto en la inversión es menor que el consumo de muchos hogares que debido a su consumo tiene alguna tasa particular de pago y como todos tenemos acceso gratis al sol, es razonable que los usuarios se inclinen hacia este método.

2.2.1. Semiconductor

Los materiales semiconductores son materiales que no se consideran ni conductor ni aislante, pero pueden comportarse como uno o como otro según diferentes factores, los elementos más comunes para la fabricación de semiconductores son el germanio (Ge) y el silicio (Si). Los semiconductores pueden ser intrínsecos o extrínsecos.

Al unir un átomo de silicio con 4 átomos formamos lo que se conoce como cristal de silicio, donde por medio de enlaces covalentes un átomo de silicio comparte sus 4 electrones de valencia con uno de cada átomo vecino, completando así 8 electrones en su último orbital y esto da pie a, la regla del octeto, enunciada en 1916 por Gilbert Newton Lewis, fisicoquímico norteamericano, dice que la tendencia de los iones de los elementos del sistema periódico es completar sus últimos niveles de energía con una cantidad de 8 electrones, de tal forma que adquiere una configuración muy estable que no da lugar a electrones libres.

Los *semiconductores intrínsecos* (que también se conocen como semiconductores extremadamente puros) son cristales que se unen a través de enlaces covalentes entre los átomos. A temperatura ambiente, estos cristales tienen electrones que absorben la energía que necesitan para pasar a la banda de conducción, quedando un hueco de electrón en la banda de valencia, que a continuación es ocupado su lugar por otro electrón libre. Anteriormente mencionamos que a un semiconductor se le puede dopar con elementos pentavalentes y trivalentes, convirtiéndose así en semiconductores tipo n y semiconductores tipo P, algo que debemos aclarar en esta sección es que una vez que un semiconductor es dopado deja de ser un material puro o *intrínseco* y se convierte en un material con impurezas o *semiconductor extrínseco* que como ya mencionamos existen dos tipos.

Como ya sabemos un *Semiconductor tipo N* es aquel semiconductor al cual se le agregan elementos pentavalentes, que tienen 5 electrones en su última capa de valencia, el fin de este dopado es para aumentar el número de electrones que pueden convertirse en electrones libres, en cambio los *Semiconductores tipo P* se obtiene cuando el material dopante aporta huecos al material, esto significa que al ser dopado de un elemento trivalente, queda un hueco al formarse las uniones covalentes ya que para que se complete la estructura del cristal es necesario que se cumpla la regla del octeto, al haber átomos con 3 electrones en su última capa de valencia esta regla no se cumple, por lo tanto habrá espacios por llenar y esos espacios serán llenados por electrones libres, para formar la corriente eléctrica.

2.2.2. Funcionamiento

El funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos se basa primordialmente en las celdas fotovoltaicas que se encuentran interconectadas en este, al conjunto de diferentes celdas se les denomina panel, si bien el panel depende del funcionamiento de estas celdas, estas a su vez dependen del material y su construcción para su funcionamiento. Al hablar de su material nos referimos a con que están fabricadas las celdas, ya que para que las celdas funcionen deben estar fabricadas a base de un material semiconductor, comúnmente el Silicio, “*Si*” por sus siglas en la tabla periódica de los elementos, es el material más usado, esto se debe a su abundancia en nuestro planeta, ya que si bien no es el único semiconductor es el más explotado en el mercado de paneles solares y la electrónica. Para un funcionamiento específico a los semiconductores se les contamina con átomos de diferentes elementos químicos para así aumentar su conductividad dependiendo del uso que se le vaya a dar, a estos contaminantes los denomina “dopantes”.

Como lo vimos unas líneas atrás los dopantes pueden ser elementos químicos pentavalentes (con 5 electrones en su última capa de valencia) o trivalentes (con 3 electrones en su última capa de valencia), dependiendo del uso que se le vaya a dar ese semiconductor dopado, cuando el semiconductor es dopado con elementos pentavalentes, existe un exceso de electrones en los enlaces covalentes por lo tanto podríamos decir que tienen carga negativa y por eso los denominamos *Semiconductores tipo N*; por lo contrario cuando son dopados con elementos químicos trivalentes existen huecos o ausencias de electrones

en los enlaces covalentes, por lo que podemos decir que la carga positiva es mayor, a estos los denominamos *Semiconductores tipo P*.

La construcción una celda fotovoltaica va muy de la mano de lo que acabamos de explicar, ya que la celda consiste en dos láminas de material semiconductor dopado, siendo una lámina de Semiconductor tipo N con exceso de electrones y la otra lamina de material semiconductor tipo P con ausencia de electrones, existiendo en medio de estas dos placas un área denominada Unión P-N, la importancia de esta unión radica en que cuando existe un flujo de electrones o corriente eléctrica, se genera en esta unión una barrera de potencial la cual permite el paso de la corriente en una sola dirección, generando por consiguiente una corriente eléctrica directa. En la - Principio de la conversión fotovoltaica podemos apreciar la construcción de la celda y la ubicación de los materiales semiconductores.

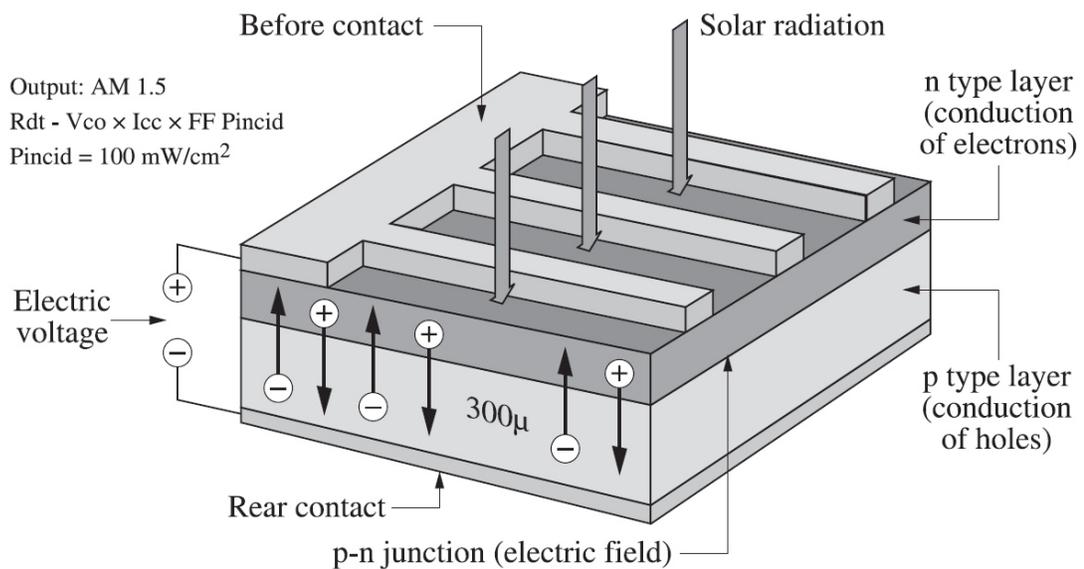


Figura 2 - Principio de la conversión fotovoltaica (Sabonnadiere, 2007)

Soteris describe el efecto fotoeléctrico en su libro “Solar Energy Engineering” como el momento en el que un fotón de luz llega a un material y puede ser reflejado, absorbido o atravesado, cuando este fotón es absorbido por un átomo los electrones de su capa de valencia incrementan su energía con la absorbida del fotón, y así la energía del electrón es mayor que la de la banda prohibida y puede alcanzar la banda de conducción donde puede moverse libremente, a través de un campo eléctrico que se crea al unir los polos del material semiconductor, cuando se da este movimiento es entonces cuando se crea una corriente eléctrica. También puede ocurrir que el fotón no le brinde suficiente energía al electrón para cruzar la banda prohibida y cuando esto sucede la energía absorbida se convierte en energía cinética la cual a su vez se convierte en energía calorífica, también hay que tener en cuenta que independientemente de la energía absorbida, un fotón solo puede liberar a un electrón. (Kalogirou, 2009).

Los electrones, son partículas atómicas que forman parte del exterior de los átomos, y que se alojan en orbitales de energía, cuando son golpeados por los fotones (interaccionan) liberándose de los átomos a los que estaban originalmente confinados. Esto les permite, posteriormente, circular a través del material y producir electricidad. Es importante decir que los huecos funcionan como cargas en movimiento pero no porque sean cargas que de verdad se mueven, se dice que virtualmente corresponden al movimiento de cargas porque es gracias a estos huecos, que los electrones pueden moverse de átomo en átomo, para así generar corriente eléctrica. Esto podemos explicarlo

de una forma más sencilla con la - *Efecto Fotoeléctrico* donde podemos apreciar que primeramente una celda es irradiada con luz solar, la cual contiene fotones los cuales tiene cierto nivel de energía, estos fotones impactan en los electrones del material semiconductor tipo N, haciendo que estos electrones absorban o no la energía del fotón y si la energía es suficiente, se liberara de su enlace covalente, una vez liberado el electrón se regira por la ya famosa regla de “cargas opuestas se atraen” y atravez de un conductor se moveran buscando cargas positivas, cerrando el circuito en el semiconductor tipo P, dando como resultado un flujo de electrones o una corriente eléctrica.

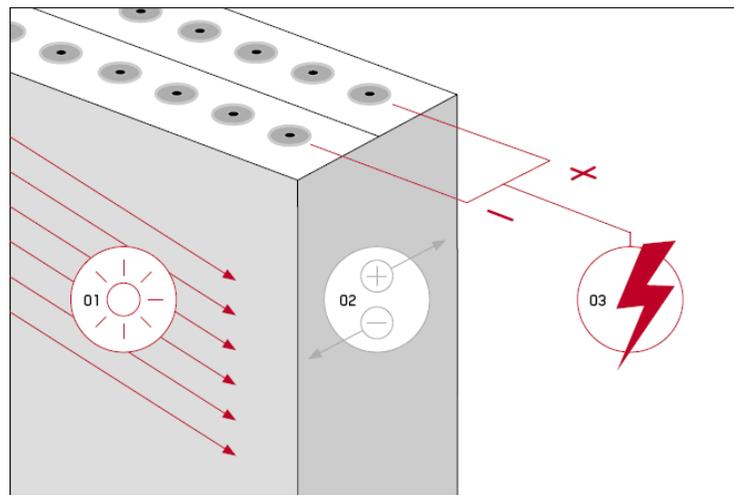


Figura 3 - Efecto Fotoeléctrico

Cuando un número suficiente de fotones con la suficiente energía, impacta en una placa semiconductor, como el silicio, su energía puede ser absorbida por los electrones que se encuentran en la superficie de ésta. La absorción de energía permite a los electrones (cargados negativamente) liberarse de sus átomos. Los electrones una vez que se liberan de su capa de valencia se encuentran en lo que se conoce como capa de conducción. Como resultado,

una parte de la lámina tiene una mayor concentración de electrones que la otra, lo que origina una diferencia de tensión entre ambos lados. Al unir ambos lados con un cable eléctrico se permite que los electrones fluyan de un lado al otro de la lámina, lo que se conoce como corriente eléctrica.

2.2.3. Primero Años

Alexander Edmund Becquerel es el científico de origen francés responsable del descubrimiento del efecto fotoeléctrico, contando con apenas 19 años descubrió el efecto fotovoltaico mientras experimentaba con una pila electrolítica con electrodos de platino, y mientras observaba su comportamiento se dio cuenta que la corriente aumentaba cuando se exponía al sol (ASIF, 2008); en 1873, un profesor de filosofía, ingeniero eléctrico, inglés, llamado Willoughby Smith, observó que la incidencia de un haz de luz en un metal de selenio unido a un metal de platino con un baño de ácido producía un aumento en su fuerza electromotriz, y describió este suceso en un trabajo llamado “The action of light on selenium”; si bien en estos experimentos la cantidad de electricidad que se obtenía era muy reducida inservible para cualquier aplicación práctica que se pudiera imaginar, sirvió para marcar la pauta en el desarrollo de una nueva tecnología la cual generaba electricidad a través de la incidencia de luz en elementos sólidos. Pocos años más tarde, en 1877, El inglés William Grylls Adams profesor de filosofía, natural en la King College de Londres, junto con su alumno Richard Evans Day, crearon la primera célula fotovoltaica de selenio.

Pero a este desarrollo tecnológico le costó ver la luz de una forma definitiva, para el año de 1946, cuando el ingeniero americano Russel Shoemaker Ohl patentó la célula solar, pero la creación de la celda moderna y funcional fue hasta 1954, cuando el científico Gerald Pearson del instituto Bell Laboratories, experimentaba en las aplicaciones del silicio en la electrónica y por accidente desarrolló una célula de silicio que cuando era irradiada con luz generaba una corriente eléctrica, los científicos Daryl Chaplin y Calvin Fuller secundaron estas investigaciones en Bell Laboratories y lograron desarrollar las primeras células fotovoltaicas las cuales tenían una capacidad de generación que permitía aprovecharse. (Butti, 1980)

La revista española Eroski Consumer, que desde 1998 es un punto de referencia en los ámbitos de consumo habló acerca del silicio que se utiliza en los paneles solares, asegurando que: “El silicio es el material más utilizado para los paneles fotovoltaicos”, si bien se fabrica de formas diferentes. El silicio puro monocristalino permite un rendimiento en los paneles comerciales del 16%, pero su precio es caro. El silicio puro policristalino, reconocible por su aspecto granulado, es más barato, pero logra un rendimiento del 14%. El amorfo se utiliza en pequeños aparatos, como calculadoras, relojes o paneles portátiles de menor tamaño. Su rendimiento es del 8%. Los científicos trabajan con otros materiales, como el telurio de cadmio o los sulfuros y seleniuros de indio para ampliar el abanico de posibilidades. (Muerza, 2009).

2.2.4. Evolución

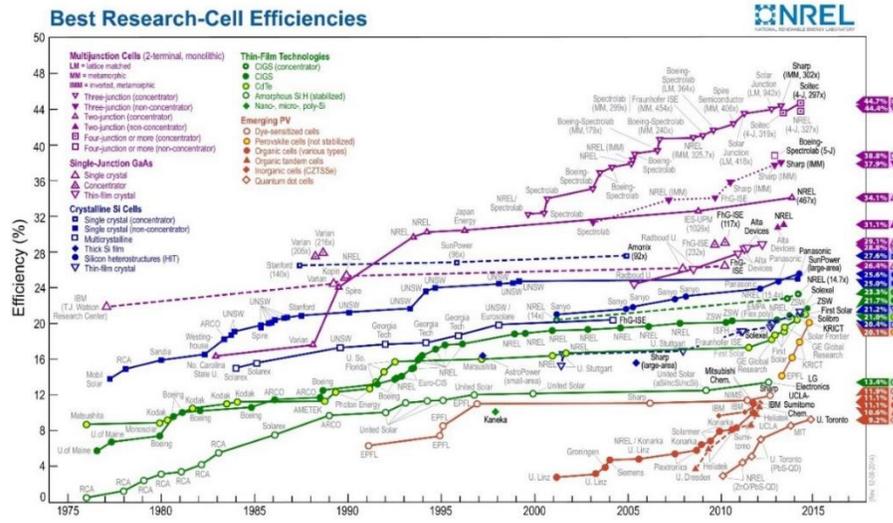


Figura 4 - Evolución de la eficiencia de diferentes celdas solares (NREL, 2015)

En la **Figura 4** podemos ver un histograma de la eficiencia de diferentes celdas solares a través de los años, evaluadas por el “Laboratorio Nacional de Energía Renovable”; NREL por sus siglas en inglés. Sin menospreciar los avances técnicos que impactan en los rendimientos de diferentes tipos de celdas, los costos al principio eran excesivamente altos y limitaban enormemente su aplicación práctica, con el tiempo han ido economizándose, pero aun así es un factor a considerar.

Mientras que en 1956 el costo del watt de electricidad producido por centrales convencionales rondaba los 50 centavos de dólar, el producido por paneles fotovoltaicos llegaba a los 300 dólares (Germain, 2010), aparte de eso según Soteris “al principio de la era fotovoltaica unos 50 años antes de nuestros días, era más la energía que se ocupaba para producir un panel, que toda la que este pudiera producir en toda su vida útil. Sin embargo, durante la última

década se ha logrado que la amortización se logre entre unos 3 y 5 años dependiendo del sitio, hoy en día el costo por watt ronda los 2.5 US y el objetivo de la tendencia es disminuir ese costo a 1 US/W para el 2020 (Kalogirou, 2009). El desarrollo de la tecnología fotovoltaica alcanzó su auge en los años setenta cuando Estados Unidos inició grandes programas de adquisición para el área espacial y de telecomunicaciones, esto le brindó la oportunidad a la industria tecnológica hacer investigaciones, pruebas y así poder dar resultados en corto plazo, desarrollando mejores paneles y más seguros. Durante los años 1976 y 1977 el gobierno de Estados Unidos adquirió bloques de 127 kW, en los cuales hizo pruebas de humedad, temperatura presión corriente resistencia, estos estudios dieron como resultado que se alcanzara el 6% de eficiencia (Green, 2005)

La tecnología de Bell Laboratories Technology fue empleada para fabricar celdas que se intentaron comercializar para uso terrestre pero no fue ningún logro, el módulo S-400 se convirtió en la primera batería solar comercial, y su diseño consistía en 400 celdas S-1 ensambladas. Esta compañía fue adquirida por Hoffman Electronics en 1956 y se enfocó específicamente en usos espaciales dominando este mercado por casi 20 años. (Green, 2005). El 17 de marzo de 1958, finalmente, se lanza el Vanguard I, el primer satélite alimentado con paneles solares fotovoltaicos. El satélite llevaba 0,1W en una superficie aproximada de 100 cm^2 (Loferski, 1993). La fiabilidad que habían demostrado los paneles solares fotovoltaicos propició su empleo sistemático en gran número de misiones espaciales y supuso un enorme impulso para la industria

fotovoltaica. Sin lugar a dudas la carrera espacial tal como la conocemos no hubiera sido posible sin la existencia de los paneles solares fotovoltaicos. De igual manera se puede afirmar que el actual desarrollo de los paneles solares fotovoltaicos y su importante proyección de futuro hubieran sido muy difíciles sin el impulso que le dio la carrera espacial. No sólo Estados Unidos utilizó esta tecnología, La Unión Soviética también empleó sistemáticamente los paneles solares fotovoltaicos para alimentar sus satélites. (Germain, 2010)

2.2.5. Situación Actual

Desde cargar dispositivos pequeños a su empleo en los satélites espaciales, el uso de los paneles solares ha ido aumentando considerablemente y esto no solo se debe a la necesidad de utilizar este tipo de energías limpias, este aumento va relacionado a la evolución es sus eficiencias, costo y que los materiales se han vuelto más ligeros, maleables y delgados, permitiendo mayores aplicaciones. Una encuesta de eficiencia de paneles monocristalino y policristalino disponibles en el mercado realizada en el 2003 muestra que las eficiencias varían de 9.1% a 16.1% con una media muy cercana al 12.5%,

Figura 5 (Schmela, 2004)

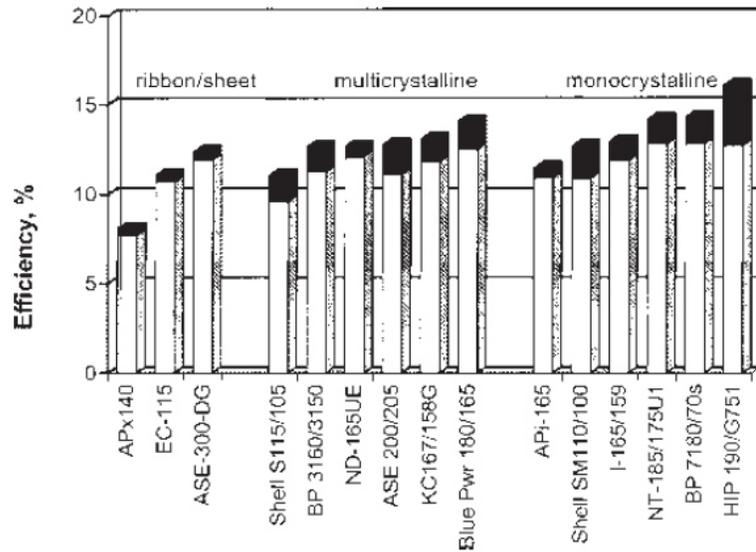


Figura 5. Encuesta de eficiencias de módulos de silicio disponibles en el mercado en el 2003.

Como lo menciona Andrés Salas en su artículo “México emerge as solar powerhouse” la industria solar ha tenido una evolución acelerada en los últimos años esto debido a dos factores, el primero es la creciente demanda de energía y la segunda la disminución de costos de la tecnología solar fotovoltaica. De hecho, se estima un incremento de la capacidad instalada en el 2015 el cual era de 1.7 giga watts (GW) a 6.2 GW para el 2020. En el año 2014 la energía solar fotovoltaica era relativamente nueva para México, pero esta tecnología fue tan bien recibida que se espera que en los próximos años se instalen cientos de mega watts en potencia nominal. Debido a su economía en desarrollo, la alta demanda de energía, los altos índices de radiación y que la energía solar fotovoltaica tiene una de las mejores perspectivas de crecimiento en comparación de cualquier otra fuente de energía renovable, se espera que

México se convierta en una gran central eléctrica solar en un futuro próximo. La SENER estima que para el 2024 el 35 % de la producción general actual del país provenga de energía solar fotovoltaica.

La industria fotovoltaica ha demostrado una impresionante tasa de crecimiento anual del 30-50% y, como resultado, en 2008, la capacidad total de producción superó los 4 GW con ingresos acumulados anuales de \$20 mil millones USD. Inicialmente, en Japón y en Alemania, los programas apoyados por el gobierno para el desarrollo de la industria fotovoltaica fueron clave para atraer inversiones de capital para la industria fotovoltaica. Los programas de subsidios gubernamentales ayudaron a superar la brecha en el costo entre la electricidad generada por energía fotovoltaica y los precios de la red eléctrica convencional, creando así un mercado viable para los fabricantes de productos fotovoltaicos. Otros factores que han contribuido al rápido crecimiento de la industria fotovoltaica son: la repentina disminución de la industria microelectrónica debido a la burbuja de Internet y a la disponibilidad de una capacidad de producción de materias primas de silicio excesiva proporcionó materia prima de silicio para la industria fotovoltaica. La preocupación creciente por el cambio climático global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero sugiere que el desarrollo de fuentes alternativas de energía debería convertirse en una parte importante de la política gubernamental.

2.3 Paneles Solares

Un panel solar es un dispositivo electrónico compuesto por celdas fotovoltaicas que sirven para convertir la energía lumínica en energía eléctrica, la luz que incide en la superficie de un panel solar produce una corriente y un voltaje. El funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos se relaciona con el material del que está fabricado, el silicio es el material más utilizado y se encuentra fácilmente en la tierra casi siempre en unión con el oxígeno, a este compuesto se le conoce como sílice, el silicio tiene una propiedad indispensable para la producción de electricidad, es un semiconductor y aunque no es el único semiconductor es el que más se utiliza en la actualidad. Otros materiales que también se utilizan, aunque en menor grado son Sulfuro de Cadmio (CdS), Sulfuro de Cobre (Cu₂S) y Arseniuro de Galio (GaAs). La generación de energía eléctrica en una celda solar ocurre de la siguiente manera; cuando un haz de luz incide en la superficie de un semiconductor tipo N el cual está dopado con un elemento que hace al material tener exceso de electrones, logra excitar estos electrones y los lleva de su nivel de valencia a su nivel de conducción y logra así su movimiento, una vez ocurre esto, los electrones buscarán moverse al borne positivo, por lo tanto el electrón excitado se moverá a la capa del semiconductor tipo P generando así una tensión eléctrica, si se cierra el circuito y se conecta a terminales con una carga, se generará así una corriente y un voltaje, **Figura 6**.

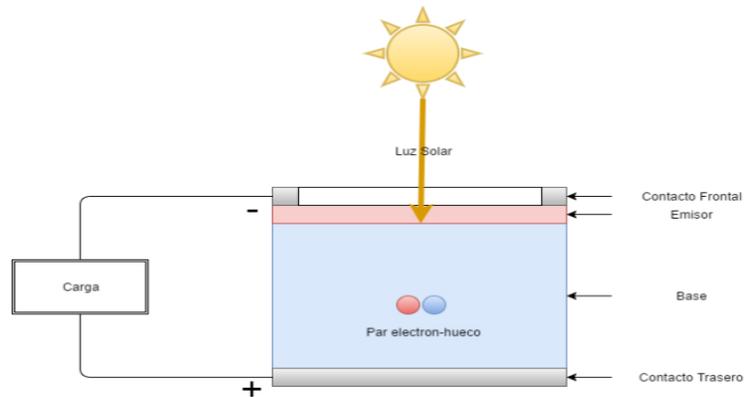


Figura 6. Funcionamiento de un panel solar fotovoltaico.

Los paneles solares fotovoltaicos llevan a cabo esta reacción a base de la luz y no del calor, por lo que mientras exista luz habrá generación de corriente sin importar la temperatura, esto gracias al efecto fotovoltaico también llamado fotoeléctrico. El efecto fotoeléctrico ocurre debido a la incidencia de radiación en un material y éste desprende electrones, estos electrones se desprenderán con una energía cinética proporcional a la energía que los hizo desprenderse, podemos estimar la energía asociada a este hecho midiendo la longitud de onda de la radiación incidente sobre el material.

2.3.1. Paneles solares

Los paneles solares más utilizados comercialmente para la generación de energía eléctrica se clasifican en: monocristalinos y policristalinos, a continuación se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

2.3.1.1. Panel solar monocristalino

Es aquel que está constituido por celdas monocristalinas, estas celdas reciben este nombre porque son cortadas de un solo cristal de silicio el cual es obtenido por diferentes técnicas, algo que por lo general define las celdas monocristalinas es su color azul muy oscuro y se puede identificar también porque tiene una forma octagonal, esta forma se utiliza para aprovechar mayor área en el panel y dejar menos espacio vacío. Para fabricar la capa N las obleas son dopadas con átomos de Fósforo. El substrato tipo P se obtiene dopando el Silicio con átomos de Boro, para luego cortar los lingotes en pequeñas laminas delgadas llamadas obleas. (Markvart & Castañer, 2005),

Figura 7.

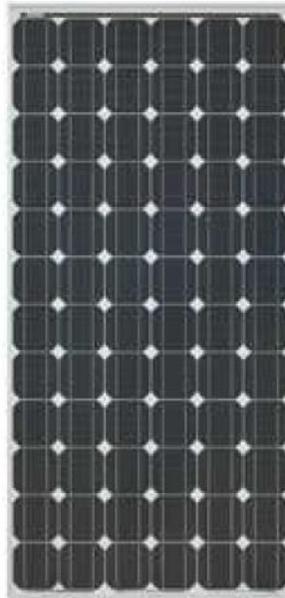


Figura 7. Panel de silicio monocristalino

Están hechos de un solo cristal de silicio puro, y el proceso de Czochralski es utilizado para tirar lentamente de una sola semilla de cristal de silicio monocristalino fundido (una pequeña pieza de silicona que se utiliza como base para las moléculas fundidas) y formar un lingote. Este tipo de paneles son los que tienen mejores tasas de rendimiento, por el hecho de ser de una sola pieza de cristal y a su alta pureza llegan a alcanzar hasta un 21% de eficiencia y normalmente superan el 15%.

2.3.1.2. Panel solar policristalino

Las obleas utilizadas para la fabricación de este tipo de panel solar son de material policristalino. Los primeros paneles solares policristalinos de silicio aparecieron en el mercado en 1981, la ventaja de estos paneles en su fabricación es que se exige una menor pureza en el material y que la oblea no es una única pieza de material puro, sino que son varios cristales de silicio unidos a través de un proceso fundición y después se cortan las obleas, **Figura 8**.



Figura 8. Panel de silicio policristalino

2.4 Conceptos clave

Es importante definir algunos conceptos de los cuales estaremos hablando en este trabajo, para sentar las bases sobre el tema.

2.4.1 Radiación

A la radiación se le puede considerar como un tipo de energía en movimiento, la radiación en términos más específicos es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas, esto quiere decir que a través del espacio o algún medio las ondas que se producen directamente desde la fuente viajan hacia afuera en todas direcciones y muy particularmente estas ondas no necesitan algún medio físico para moverse por lo cual pueden viajar en el espacio interestelar sin ningún problema.

Para calcular el nivel de energía de una onda electromagnética (**Ecuación 1**) es necesario conocer su longitud de onda (λ) y su frecuencia (ν) para ser relacionadas con:

$$c = \lambda\nu \quad (1)$$

Independientemente de estas variables si la onda electromagnética se desplaza en el vacío su velocidad es de $c=299,792$ km/s, pero en un medio físico la radiación tiene un espectro ondulatorio que lo caracteriza con la longitud de onda **Figura 9**, y frecuencia **Figura 10**.

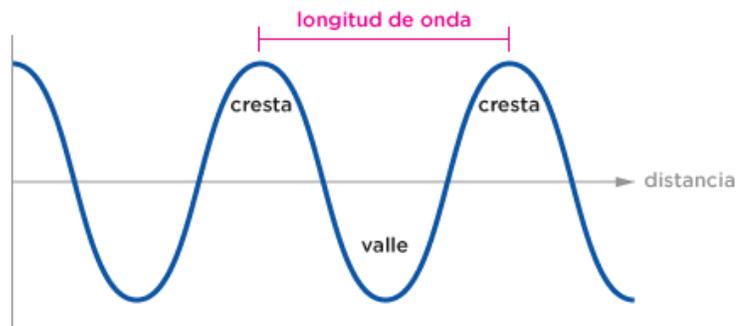


Figura 9. Longitud de Onda

La longitud de onda se define como la distancia que existe entre una cresta y la que sigue, a esta sección, también podemos definirla como periodo y la frecuencia viene dada por la cantidad de veces que el periodo se repite en determinado tiempo, si tenemos que el periodo se repite más veces en un segundo su frecuencia es alta mientras que si se repite menos su frecuencia es baja. Esta relación es proporcional a la cantidad de energía que una onda electromagnética pueda tener ya que a mayor frecuencia la energía es mayor y a baja frecuencia la energía decrece.

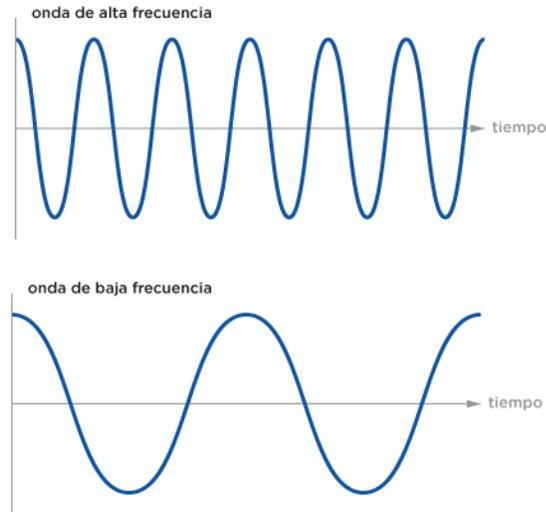


Figura 10. Frecuencia de onda

Cuando las ondas electromagnéticas se ordenan según su frecuencia o su longitud de onda, forman un espectro electromagnético continuo. Existe lo que se conoce como espectro visible que es el rango en donde el ojo humano es capaz de ver, por sus características de longitud y frecuencia, la variación en este espectro visible se puede reconocer en los colores ya cada color es precisamente eso un color diferente debido a sus longitudes y frecuencias de onda, **Figura 11**.

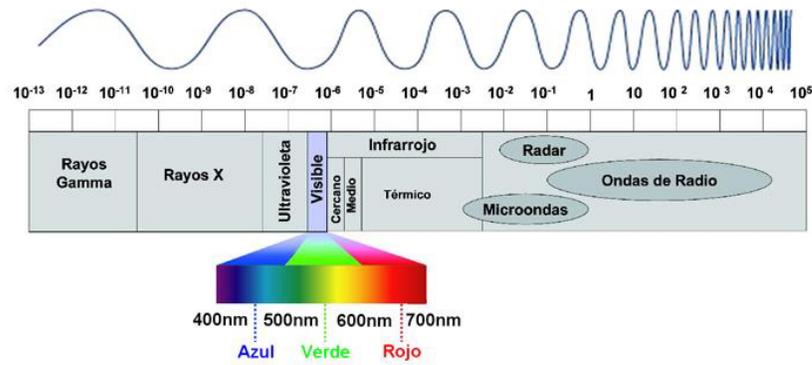


Figura 11. Espectro electromagnético (λ en m)

El sol es la principal fuente de energía de nuestro planeta. Es una estrella que emite mucha energía al espacio y mucha de ella llega a la tierra, en forma de luz y calor debido a las reacciones nucleares que acontecen en su interior. La radiación solar al igual que otras ondas electromagnéticas viajan a la tierra a la velocidad de la luz; la corteza terrestre, los océanos y la atmosfera, absorben la energía solar para después aprovecharla en diferentes formas y es precisamente ese equilibrio entre la energía que llega y que se aprovecha lo que permite la vida en nuestro planeta.

Existen diferentes tipos de radiaciones que emite el sol y llegan a la tierra entre ellos están:

- Rayos X y GAMMA – estos rayos son absorbidos por la capa de ozono y las capas altas de la atmosfera sin llegar a la superficie terrestre, estos rayos son muy perjudiciales para la vida en el planeta.
- Rayos UV – existen tres tipos de rayos UV son A, B y C; cada uno con diferentes particularidades los rayos UV-C quedan casi en su totalidad absorbidos en la capa de ozono y aunque es la que tiene más energía, sigue

siendo altamente perjudicial para los seres vivos, los rayos UV-B gran parte de estos rayos quedan absorbidos en la capa de ozono no obstante el resto son los responsables de que la piel se broncee, mas sin embargo en exceso puede llegar a quemar y causar cáncer; la radiación UV-A ocasiona degradación en materiales cuando es mucho el tiempo de exposición

- Radiación Visible – es la luz visible y los colores
- Rayos IR – conocidos también como radiación infrarroja, es la que proporciona calor al planeta, un 56% es absorbida en la corteza terrestre, un 19% se queda en las nubes y la atmosfera, y el resto es reflejado al espacio.

La radiación solar se clasifica según como se reciba, **Figura 12** en:

- Radiación directa – es aquel tipo de radiación que tiene una dirección que no sufre alteración alguna, podemos identificar que esta radiación está presente cuando vemos sombras bien definidas, es ese el momento en el que un objeto está recibiendo radiación directa.
- Radiación difusa – al entrar la radiación directa a nuestro planetas en muchas ocasiones se topa con nubes, neblina, contaminación o diferentes tipos de gases que al recibir el impacto de esta radiación absorberán o reflejarán los rayos de luz, lo cual generara una distorsión en la dirección de la luz haciendo que esta se refleje a diferentes puntos generando luz en todas direcciones, a esto lo conocemos como radiación difusa. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombras. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque sólo ven la mitad.

- Radiación reflejada – se le conoce así a la radiación que es reflejada por la atmosfera y la superficie terrestre, hacia el espacio exterior, también se le conoce como efecto albedo, que es de un promedio del 30% para la superficie terrestre, esto significa que del total de la radiación emitida por el sol un 30% es reflejado.
- Radiación global – es la suma de las 3 radiaciones mencionadas anteriormente.

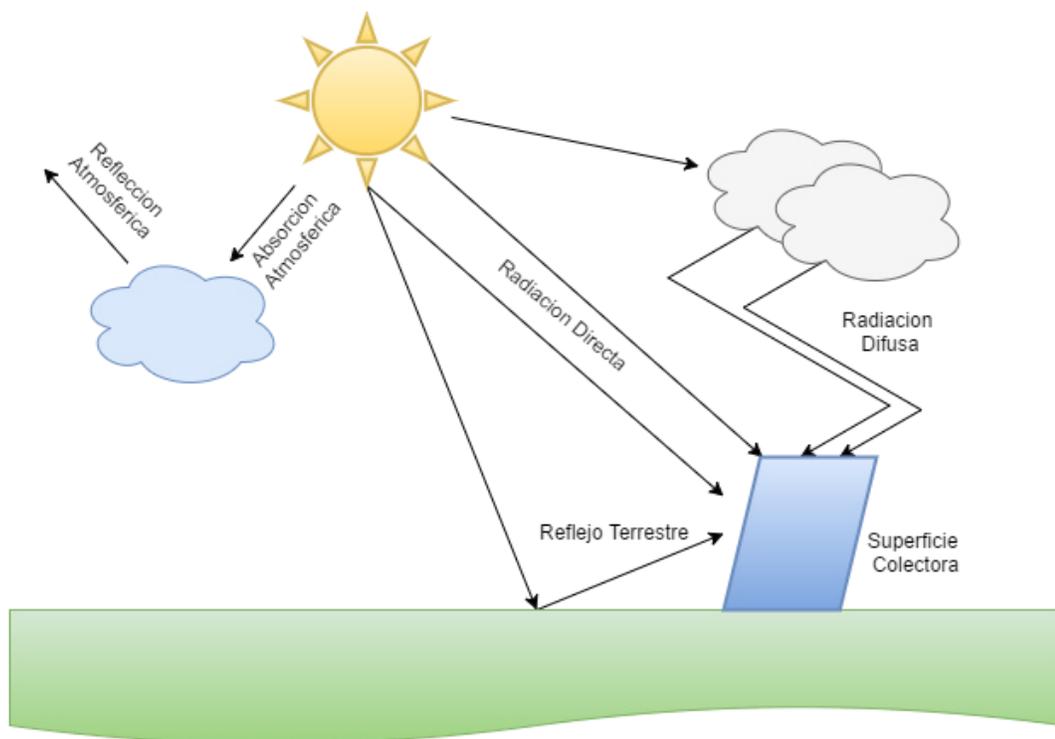


Figura 12. Componentes de la radiación solar (*Handbook of Renewable Energy*)

2.4.2 Irradiancia, irradiación e insolación.

La *irradiancia* se define como la cantidad de energía que se capta en un área determinada incidida por la radiación electromagnética, sus unidades son

kW/m²; que no debe confundirse con la *irradiación* que en términos prácticos es la energía incidida en una superficie en una unidad de tiempo siendo su unidad muy similar a la anterior pero tomando en cuenta el factor tiempo, siendo su unidad de medida más común kWh/m²; por último tenemos la *insolación* la cual se define como la irradiación medida en un tiempo específico pudiendo ser diaria, semanal, mensual o anual, medida que nos es útil para hacer análisis estadísticos, y se establece en kWh/m²/día o kWh/m²/mes.

2.4.3 Potencia, voltaje y corriente

La potencia se define como la cantidad de trabajo necesaria para que un equipo trabaje una determinada cantidad de tiempo, o poniéndolo de una manera más coloquial podemos decir que es la rapidez con la que se gasta la energía, la potencia se mide en watts (W) y se representa con la letra “P”. Un watt o vatio equivale a 1 J/seg (joule sobre segundo, cantidad de trabajo gastada en cierto tiempo. La ley de Ohm relaciona el voltaje, corriente y resistencia, pero se puede introducir también la potencia expresada en la **Ecuación 2**, partiendo de la fórmula de potencia eléctrica.

$$P = V * I \quad (2)$$

La fuerza electromotriz (F. E. M.) es lo que produce un desplazamiento de electrones, en términos básicos la F.E.M., es el resultado de la tensión eléctrica

que es el valor que se le da al trabajo realizado en la transferencia de electrones, dado por la **Ecuación 3**.

$$\varepsilon = \frac{u}{q} = \frac{\text{trabajo}}{\text{magnitud de la carga}} = \frac{J}{C} = \frac{\text{Joules}}{\text{Coulombs}} = V \quad (3)$$

Cuando un portador de carga eléctrica, un electrón libre se transporta de un lugar a otro, se genera una corriente eléctrica. Cuando estas cargas se mueven a través de un conductor la corriente lleva cierta intensidad, esta es dada por la cantidad de electrones q , que para fines prácticos se utiliza la unidad de medida *Coulomb* que se representa con la letra C y tiene un valor de $6.2415 \times 10^{18} e^-$, en determinada cantidad de tiempo t que cuando es medido en un segundos (**Ecuación 4**), acorde al sistema internacional de unidades, la unidad resultante de la intensidad se denomina *amperios A*.

$$I = \frac{q}{t} \quad \therefore \quad 1 A = 1 \frac{C}{s} \quad (4)$$

Existen 2 tipos de corrientes

- Corriente Directa (CD) es cuando los electrones viajan siempre en el mismo sentido.
- Corriente Alterna (CA) es cuando los electrones cambian el mismo sentido en el que viajan dentro del circuito.

2.4.4. Eficiencia Energética

Es el uso eficiente de la energía, está estrictamente relacionado con el consumo energético y el mal uso de la energía. Todas aquellas herramientas y utilidades o comodidades con las que estamos acostumbrados a vivir generan un gasto energético, si a esto le sumamos el desperdicio que ocasionamos por no apagar equipos electrónicos o tomar duchas demasiado largas o utilizar luz artificial en horas de luz natural vamos generando una ineficiencia energética, si nuestro comportamiento lo multiplicamos por cada individuo nuestro gasto energético es demasiado. La eficiencia de una celda solar depende la cantidad de radiación que ésta reciba, por lo que esta variara a lo largo del día, por la radiación incidente en la celda, se relaciona entre la potencia máxima entregada por la celda y la potencia de la radiación incidente.

2.4.5. Factor de forma

Otro factor importante a tomar en cuenta en cuanto a las celdas fotovoltaicas es el factor de forma el cual indica la potencia máxima de una célula fotovoltaica. Dicho de otra forma, se define como la relación entre la potencia máxima que puede entregar una celda solar entre la potencia ideal a la que debe trabajar una celda sin que existan pérdidas. De esta forma un FF de 100% indicara que la curva corriente – voltaje presenta un valor de corriente constante, reduciendo las pérdidas de energía del circuito, **Figura 13**.

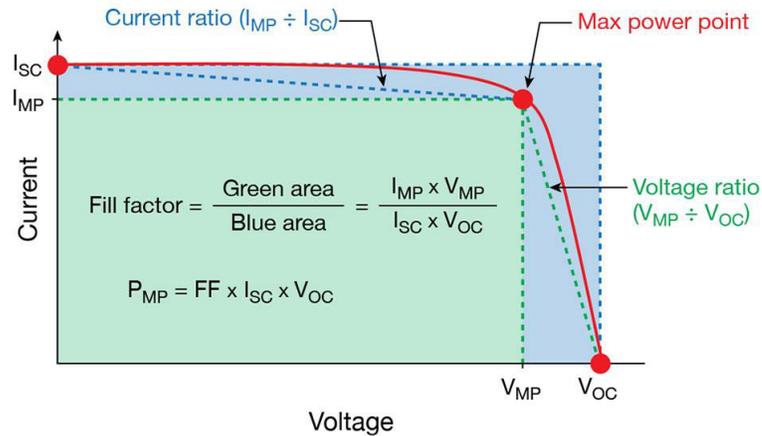


Figura 13. Curva de corriente – voltaje de una celda solar fotovoltaica

El factor de forma se determina dividiendo el área verde, que es donde convergen la corriente y el voltaje máximo, entre el área azul que está definido por la corriente de corto circuito y la de circuito abierto.

2.4.6. Voltaje de máxima potencia (V_{mp})

Tensión en el punto de su máxima potencia, es el punto de intersección del voltaje con la máxima intensidad de corriente (I_{mp}).

2.4.7. Voltaje de circuito abierto (V_{oc})

Momento de la tensión máxima cuando se produce una ruptura en el circuito, en este momento la resistencia es infinitamente alta y no hay corriente en el circuito.

2.4.8. Corriente de cortocircuito

La corriente de corto circuito ocurre cuando la impedancia es aproximadamente cero (cortocircuito) y se calcula cuando el voltaje en el módulo fotovoltaico es de cero volts

2.4.9. Coeficiente de temperatura

Un parámetro muy importante en el comportamiento de un módulo solar fotovoltaico es la temperatura de la célula. La influencia de la temperatura sobre la curva característica de una célula es notable, se estima que la tensión a circuito abierto desciende $-2.45 \text{ mV/}^{\circ} \text{C}$, mientras que la intensidad de cortocircuito apenas se ve afectada. Los gradientes de temperatura entre las distintas células que forman un módulo fotovoltaico, provocan igualmente ineficiencias en el comportamiento, ya que se produce un efecto denominado dispersión de parámetros, que ocurre cuando distintas células conectadas entre sí, trabajan en distinto punto de funcionamiento y por tanto con distinta curva característica. Estas pérdidas dependen del tipo de conexión que exista entre ellas, siendo más perjudicial la conexión en paralelo que la conexión en serie.

Capítulo 3

Especificaciones Técnicas

3.1 Descripción de la Ubicación

La zona metropolitana de Monterrey contaba en el 2010 con 4,106,054 habitantes, la cual está formada por 13 municipios del Estado de Nuevo León que son: Apodaca, Cadereyta Jiménez, Carmen, García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García, Santa Catarina y Santiago los cuales podemos apreciar en la **Figura 14** donde se puede ver en rojo y verde el área de los municipios antes mencionados. En amarillo, se muestra la mancha urbana, la cual se extiende en un área de 6,794 km², ubicada en el noreste de México, a las faldas de diferentes elevaciones montañosas. El centro de la zona metropolitana de Monterrey se localiza en el paralelo 25°40' de latitud norte y 100°18' de meridiano oeste, a 537 metros sobre el nivel del mar. (SEDESOL, CONAPO, & INEGI, 2012)

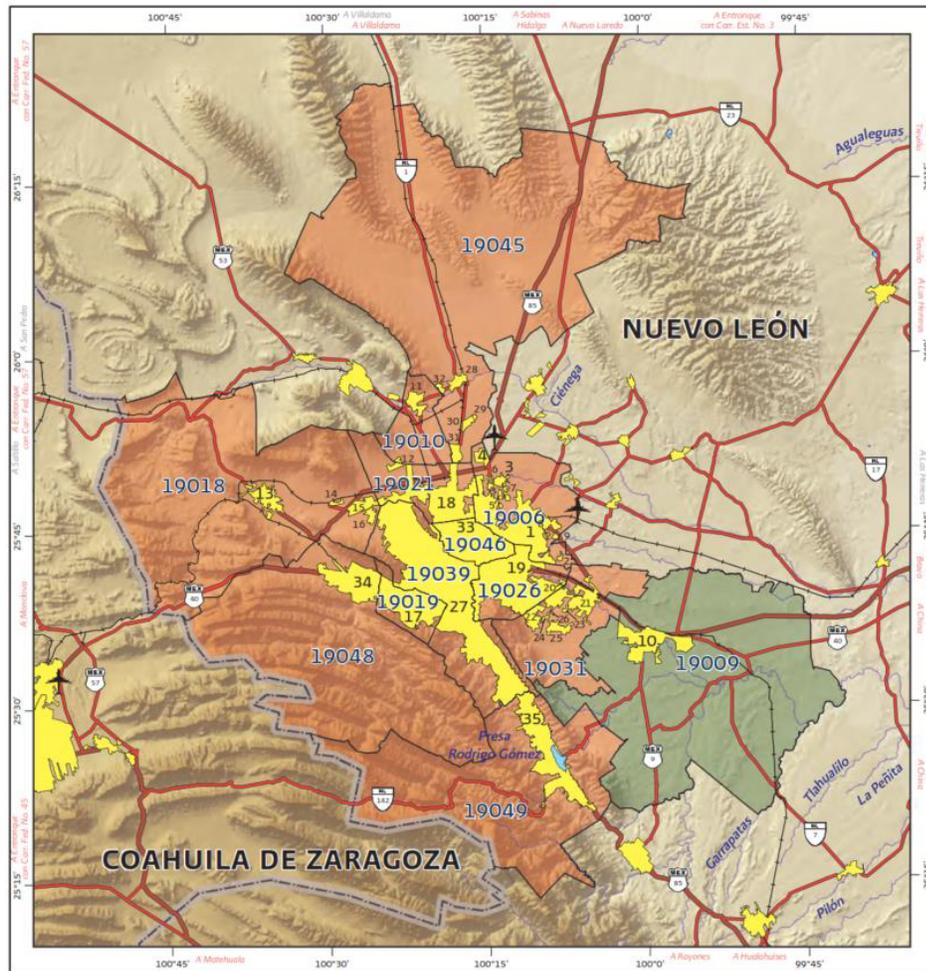


Figura 14. Área Metropolitana de Monterrey, fuente INEGI, Maco Geo estadístico Nacional actualizado al Censo de población y Vivienda 2010

El clima del área es extremo. Con temperaturas mínimas que rondan los 8°C y las máximas que están alrededor de los 45°; los meses más calurosos en la región son junio, julio y agosto. El promedio de lluvias es de 640.3mm, siendo julio, agosto y septiembre los meses con mayor precipitación pluvial.

En la **Figura 15** podemos ver un mapa de la República Mexicana en la cual el National Renewable Energy Laboratory (NREL), ha plasmado el resultado de sus estudios de radiación solar directa, basados en su promedio anual

correspondiente al 2010. En este mapa podemos apreciar que México tiene varias zonas de muy buena radiación solar algunas con más de 7 kWh/m²/día. Se puede observar que la zona metropolitana de Monterrey no es la zona con mejor radiación solar; sin embargo, es una zona económica muy activa, lo cual ha favorecido el auge de la tecnología fotovoltaica en el uso doméstico.

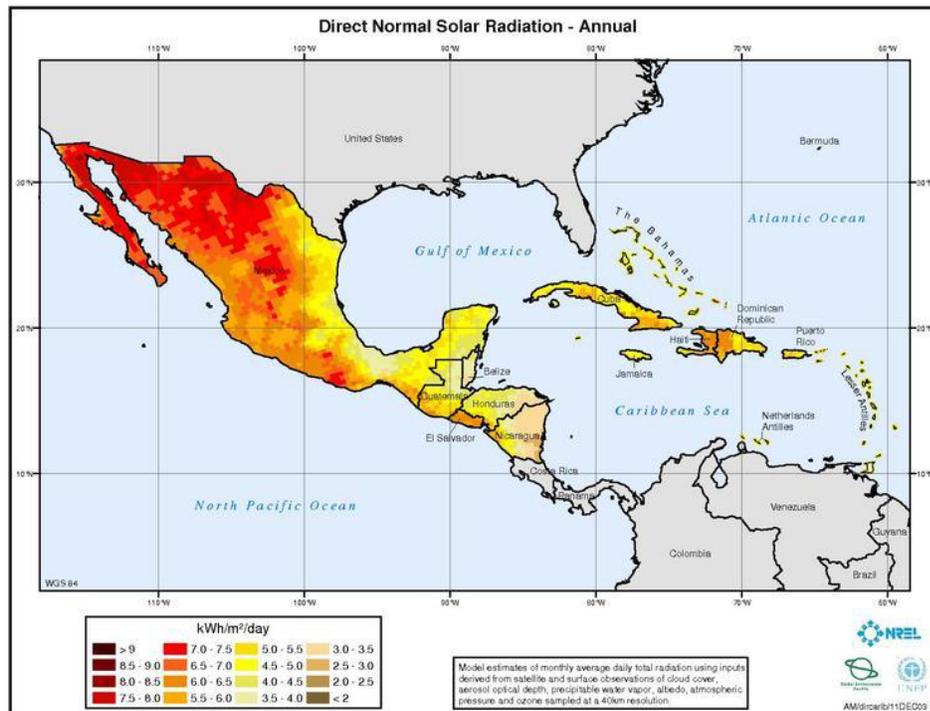


Figura 15. Radiación Solar Directa Anual, National Renewable Energy Laboratory 2010

Se ha reportado que junto con Sonora, el Estado de Nuevo León tiene un potencial atractivo de modo que se pueda aprovechar más el recurso solar a través de paneles solares. (Garcia, 2015)

A continuación se proporcionará la ubicación específica de la planta solar fotovoltaica bajo estudio del presente trabajo. Esta planta está ubicada en

25.807354 latitud norte y 100.194808 longitud Oeste, correspondiente al Municipio de Apodaca. En la **Figura 16** muestra su localización en un mapa del área metropolitana.



Figura 16. Ubicación geográfica de la planta solar

3.1.1. Principales Características Meteorológicas de la planta objeto de estudio

Como se puede apreciar en la **Figura 17** la temperatura de Monterrey varía anualmente entre 10° y 35°C, llegando muy raramente a más de 38°C y menos de 4°C. (WeatherSparks, 2016)

De acuerdo a datos del INEGI (INEGI, 2009), el clima predominante del área metropolitana de Monterrey es predominantemente semi-cálido con lluvias en verano, y con un rango promedio de precipitaciones que va de 500mm a 1000mm.

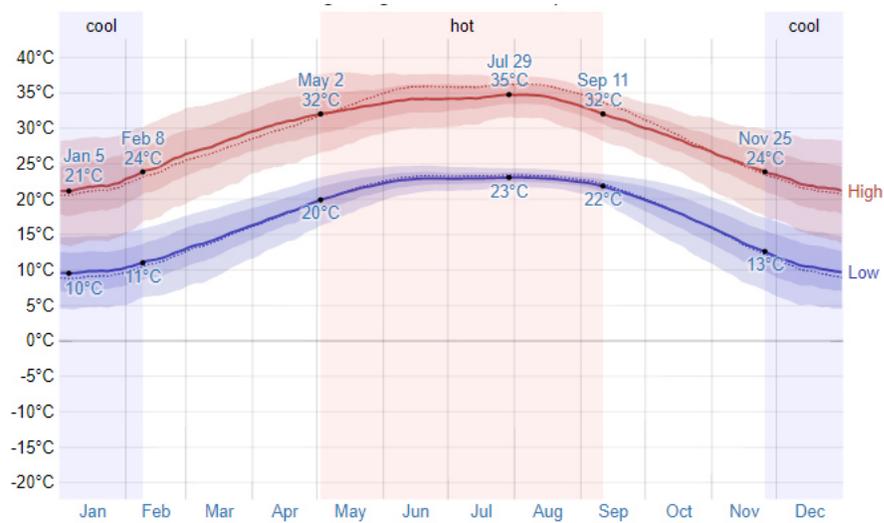


Figura 17. Temperaturas maximas (linea roja) y minimas (linea azul) basado en un analisis historico de 1980 al 2016, Weather Spark

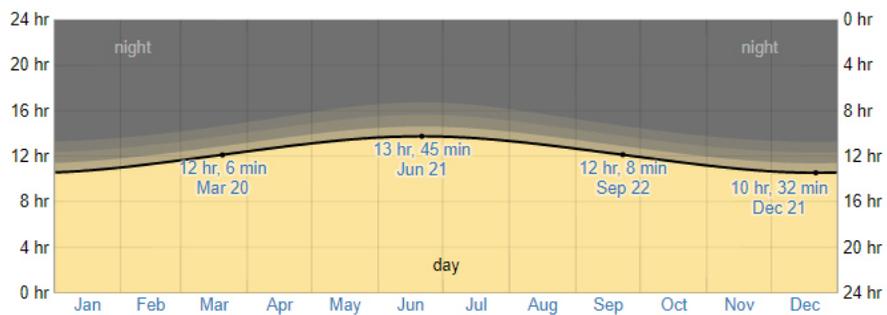


Figura 18. Número de horas de sol al mes (línea negra) durante el 2016

En la **Figura 18** se aprecia el promedio histórico de las horas de sol para el área metropolitana de Monterrey. A través de este gráfico se muestra que los meses de verano son los meses con mayor número de horas de sol al año, y durante los meses de invierno hay una pérdida de casi 2 horas de sol. El 21 de junio es en promedio el día con más horas de sol (13 horas y 45 minutos), mientras que el 21 de diciembre las horas de sol no superaron las 10 horas y 32

minutos. Estos datos corresponden a los solsticios de verano e invierno, respectivamente.

En la **Figura 19** se muestra la duración de horas de sol entre el alba y el crepúsculo durante 2016. Estos datos alimentarán el cálculo que realiza el modelo matemático para la obtención de horas de sol durante un año.

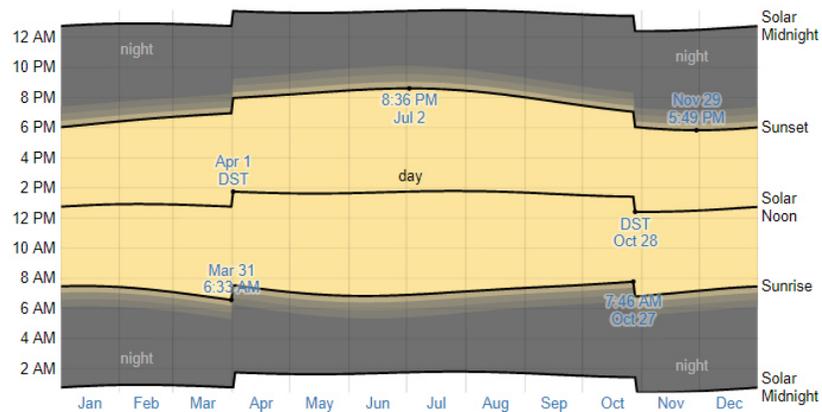


Figura 19. Duración de horas de sol entre el alba y el crepúsculo hasta el 2016

En la **Figura 20** se muestra el promedio diario durante un año de energía solar incidente sobre el área metropolitana de Monterrey. Cabe destacar que estos valores están dados para una superficie plana de 1 m² (WeatherSparks, 2016). Esta información servirá como punto de referencia para el cálculo de la radiación solar de planta bajo estudio del presente trabajo.

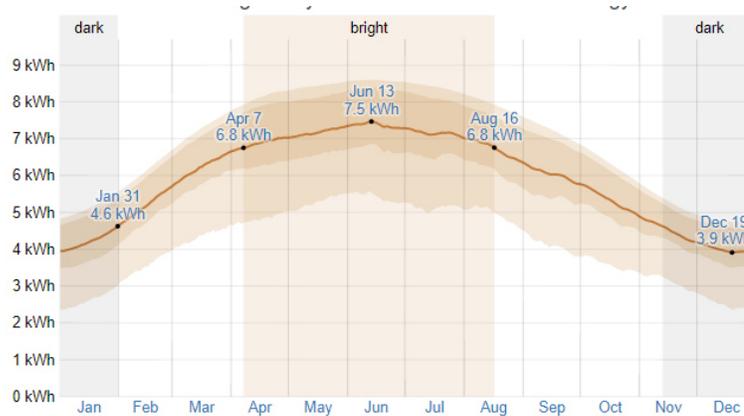


Figura 20. Promedio Diario de energía solar incidente durante un año.

3.2 Descripción de la Planta Solar

La planta solar a estudiar consta de 15 paneles fotovoltaicos OPT330-72-4-100 de 330W de la marca Suniva, conectados en dos bloques en serie, uno de 7 paneles y el otro de 8 paneles, respectivamente. Ambos bloques se encuentran conectados a su vez a un inversor de KACO Blueplanet 5.0 TL1. Los paneles fueron instalados en un segundo piso de una residencia, con una inclinación de 25° sobre la horizontal del piso en estructuras de aluminio marca Everest. En las **Figuras 21 y 22** podemos apreciar algunas imágenes de la planta solar objeto de estudio del presente trabajo.



Figura 21. Instalación de los 15 paneles solares.



Figura 22. Paneles solares con inclinación de 25° sobre la horizontal.

3.2.1. Descripción de Dispositivos

En esta sección se describirán las características principales definidas por el fabricante de los equipos que conforman la planta solar, de modo que sea posible conocer los factores para determinar la eficiencia de los mismos. Con esta información será posible realizar los cálculos de radiación solar y de conversión energética de dichos dispositivos.

3.2.1.1. Paneles Solares

La planta solar bajo estudio consiste en 15 paneles solares fotovoltaicos de silicio mono-cristalino modelo OPT330-72-4-100 Suniva serie OPTimus (**Figura 23**). La hoja de especificaciones de este dispositivo se encuentra en el **Anexo 1** de la presente tesis.

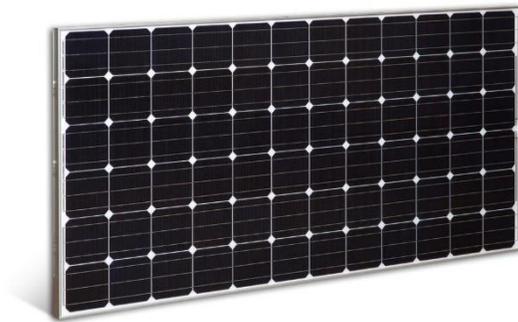


Figura 23. Suniva Optimus Series

Este panel solar está construido con 72 celdas de silicio mono-cristalino acomodadas en 6 series de 12 celdas, cuyas dimensiones son de 1970 mm x 990 mm, teniendo un aproximado de área efectiva equivalente a 1, 950,300 mm². Las especificaciones mecánicas de cada panel se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Especificaciones mecánicas del panel solar

Celdas	72 (6 x 12)
Dimensiones del Modulo	1979 mm x 990 mm (77.6 x 39 in)
Grueso del Modulo	38 mm (1.5 in)
Peso Aproximado	23 kg (50.7 lbs)

En la **Tabla 2** se muestran las características del panel en condiciones estándar (STC) lo cual significa una irradiancia de 1000W/m² y un espectro de masa de aire (AM) de 1.5 a 25°C. Estas condiciones representan el punto óptimo de desempeño, el cual proporcionan el punto de referencia para nuestro estudio.

Tabla 2. Características del panel en condiciones estándar

<i>Tipo de Modulo</i>	<i>OPT330-72-4-100</i>
<i>Potencia máxima (pmax)</i>	330 W
<i>Eficiencia del Módulo (%)</i>	16.92%
<i>Voltaje Máximo</i>	37.6V
<i>Corriente máxima</i>	8.78 A
<i>Voltaje de Corto Circuito (Voc)</i>	45.9 V
<i>Corriente de Corto Circuito (Isc)</i>	9.54 A

En la **Figura 24** se muestra la curva de corriente y voltaje a diferente potencia de irradiación incidente en el panel solar a temperatura constante (25°C). Esta gráfica permite identificar que la cantidad de radiación afecta directamente la potencia nominal del panel solar; es decir, a menor radiación menor energía aprovechada.

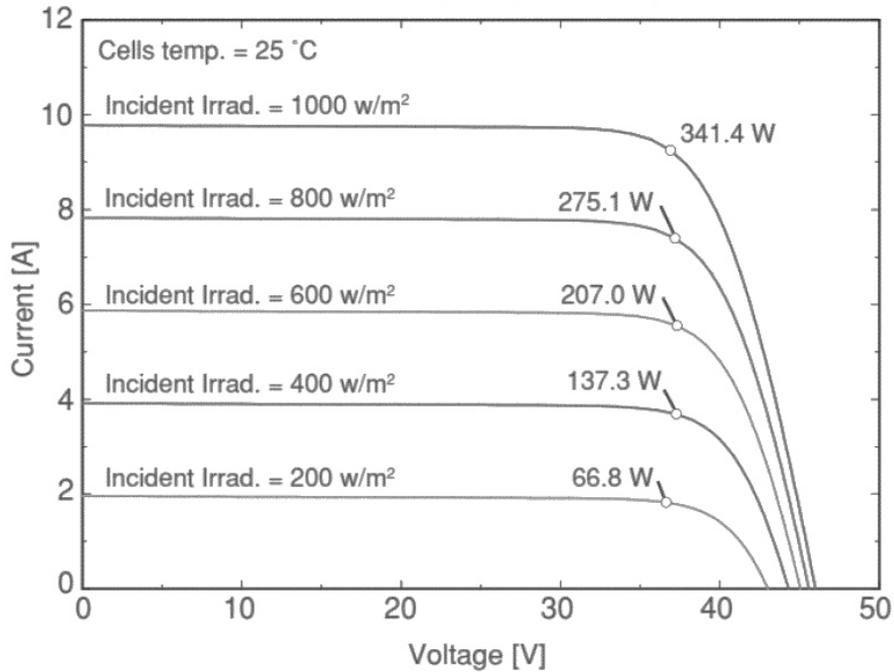


Figura 24. Curva de corriente y voltaje a diferente potencia de irradiación incidente en el panel solar

3.2.1.2. Inversores

La función de los inversores (**Figura 25**) es convertir la corriente continua generada por los paneles o almacenada en la batería en corriente alterna. El inversor utilizado en la planta solar estudiada posee una potencia nominal de 5 kW y una eficiencia de conversión del 96.5%. Este último dato es necesario para los cálculos de aprovechamiento energético de este dispositivo para nuestra simulación. La **Tabla 3** presenta las especificaciones del inversor KACO Blueplanet.



Figura 25. Inversor KACO Blueplanet

Tabla 3. Especificaciones del inversor KACO Blueplanet

Entrada	<i>V_{max PV}</i>	600 Vdc
	<i>I_{sc PV (max)}</i>	13.2 A (x2)
	<i>I_{nom PV}</i>	11 A (x2)
	<i>V – MPP at P_{nom}</i>	215 V – 510 V
	<i>V – Rango</i>	125 V – 550 V
Salida	<i>Voltage Nominal de AC</i>	208 V / 220 V / 240 V
	<i>Rango de Voltaje a Operación Continua</i>	166 Vac -276 Vac
	<i>Corriente (Continua máxima)</i>	22 A
	<i>Rango de Frecuencia</i>	45 Hz – 65 Hz
Potencia de Salida	<i>S_{nom} at 208 V U_{nom}</i>	4600 VA
	<i>S_{nom} at 220 V U_{nom}</i>	4800 VA
	<i>S_{nom} at 240 V U_{nom}</i>	5000 VA
Ambiente	<i>Poder Reactivo</i>	0 – 95 % S _{nom}
	<i>Cos phi</i>	1 – 0.3 ind/cap
	<i>Rango de Temperatura</i>	-25°C a 60°C / -13°F a 140°F
	<i>Tipo de Protección</i>	I / NEMA 3R

3.2.1.3. Estructuras

Se utilizaron estructuras de aluminio, para montaje de paneles solares marca *EVEREST Solar Systems*, dichas estructuras fueron colocadas a 25 ° de inclinación, orientadas hacia el sur. En las **Figura 26 y 27** se muestra el montaje de estas estructuras y su disposición final, respectivamente.

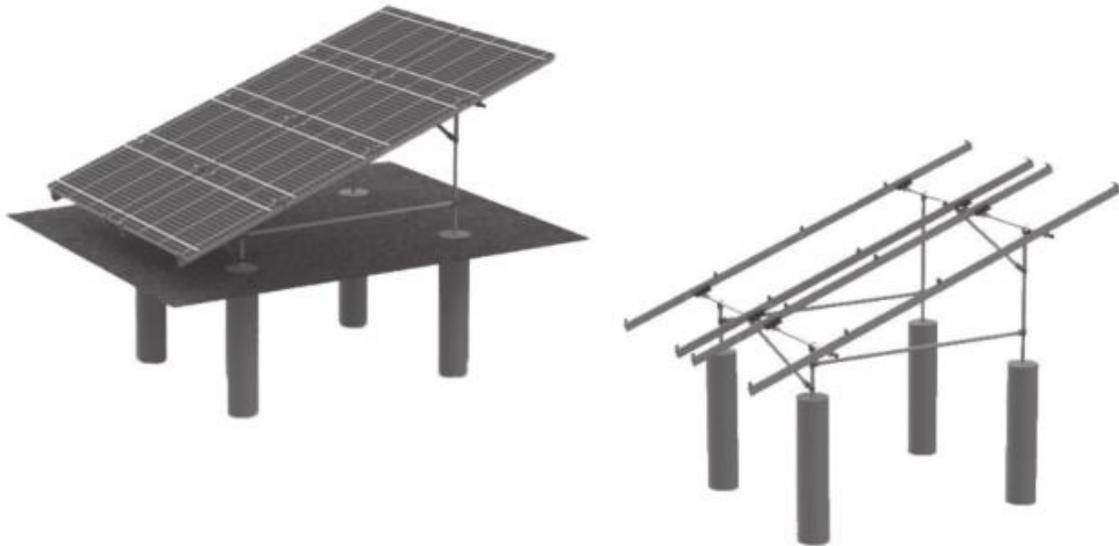


Figura 26. Montaje de la estructura Everest con paneles y superficie (lado izquierdo), y la estructura sin paneles (lado derecho)



Figura 27. Disposición de la estructura Everest

3.2.2. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques es la forma gráfica y sencilla de representar el funcionamiento, ordenamiento y el flujo de la información de un sistema. En este puede representarse de forma organizada el proceso del sistema, así como indicar los flujo de salida y entrada.

Comúnmente el diagrama de bloques que se utiliza para explicar el funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico varía dependiendo de si se trata de un sistema interconectado a la red, o si cuenta con un banco de baterías. En la **Figura 28** se ilustra un diagrama de bloques común de un sistema solar fotovoltaico.

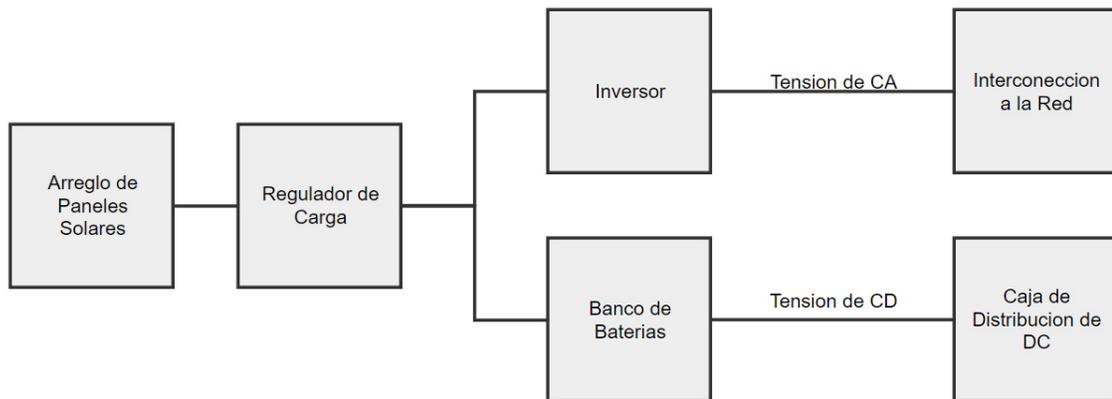


Figura 28. Diagrama de bloques de un sistema solar fotovoltaico común

Se puede observar en la **Figura 29** el diagrama de bloques específico del sistema solar fotovoltaico bajo estudio en el presente trabajo, el cual consiste

en 2 series de 8 y 7 paneles, respectivamente, conectados a la red eléctrica mediante un inversor de corriente.

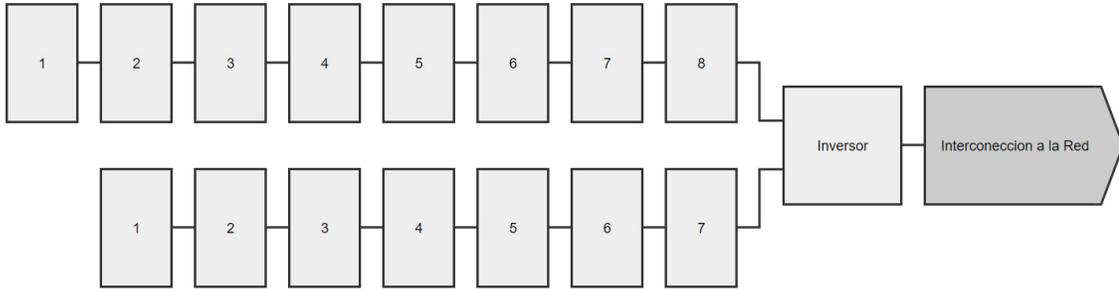


Figura 29. Diagrama de bloques del sistema solar fotovoltaico bajo estudio.

Capítulo 4

Análisis Teórico y Experimental

4.1. Descripción del Método Teórico

El cálculo de la radiación solar mediante la posición del sol y su movimiento a lo largo del día para una ubicación específica se basó en diferentes trabajos que hablan de este fenómeno. Entre ellos: “La red de Educación Fotovoltaica” (Stuart, 2013) , “Solar Calculations” (Holbert, 2007), “Radiación Solar y Terrestre” (Inzunza, 2008), “Spectral Distribution of Energy From the Sun” (Stair, 1954), “Calculating the position of the Sun” (Walraven, 1978) y Eduardo Lorenzo en “Energy Collected and Delivered by PV Moddules” (Luque,2003).

La planta solar motivo de análisis se ubica en 25.807354 latitud norte y 100.194808 longitud Oeste. Se considerará el día del año que se quiere calcular, ya que dependiendo de estas variables, podremos obtener la radiación solar para una ubicación específica en un día específico.

Del trabajo “Solar Calculatios” (Holbert, 2007) se obtiene la **Ecuación 5** que determina los valores aproximados de irradiación para un día específico (I_0). Este valor es aproximado ya que influye el que la órbita de la tierra sea elíptica y no circular.

$$I_0 = I_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{N}{365} * 360^\circ \right) \right] \quad (5)$$

Donde I_{SC} es la constante solar que equivale a 1,353 W/m², y N representa el número de día que queremos calcular, siendo el primero de enero el número 1.

En la **Figura 30** - *Inclinación del eje terrestre* muestra la inclinación del eje terrestre, la cual es de 23.45°. Esta inclinación y la forma elíptica de la órbita de nuestro planeta influye directamente en que existan días durante el año en los que el sol se encuentre más cerca o más lejos de la tierra, y a que ciertos lugares de la tierra reciban diferentes niveles de radiación.

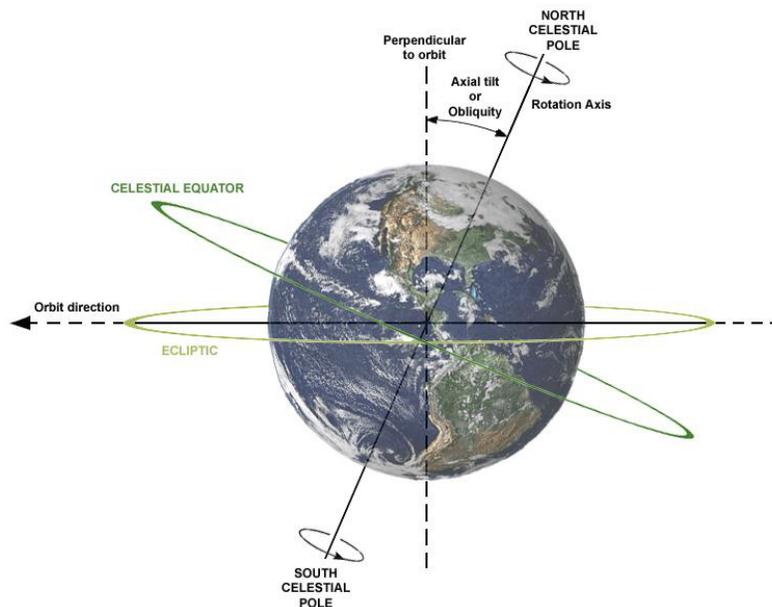


Figura 30 - Inclinación del eje terrestre

Por otra parte se calcula el ángulo de declinación δ para el hemisferio norte mediante la **Ecuación 6**. La declinación varía como se muestra en la .

Declinación del sol en diferentes días del año**1**.

$$\delta = 23.45^\circ \text{ sen} \left[\frac{N+284}{365} * 360^\circ \right] \quad (6)$$

Donde N representa el día del año a calcular, por ejemplo el 1ro de enero es igual a $N=1$ y el 31 de diciembre es igual a $N=365$.

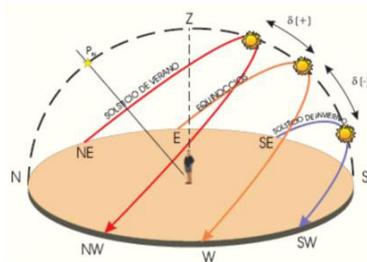


Figura 31. Declinación del sol en diferentes días del año

La tierra se divide en latitudes que son la división horizontal y longitudes que son las divisiones verticales, como se puede apreciar en la **Figura 32**. El ecuador es la latitud 0° y de ahí va avanzando hasta el polo norte llegando a los 90° o disminuyendo hacia el polo sur llegando a los -90° . Por otra parte, la longitud se medirá respecto a los meridianos siendo el meridiano de Greenwich el punto de partida con 0° avanzando y disminuyendo llegando a los 180° que en total son 360° representando la circunferencia total de la tierra.

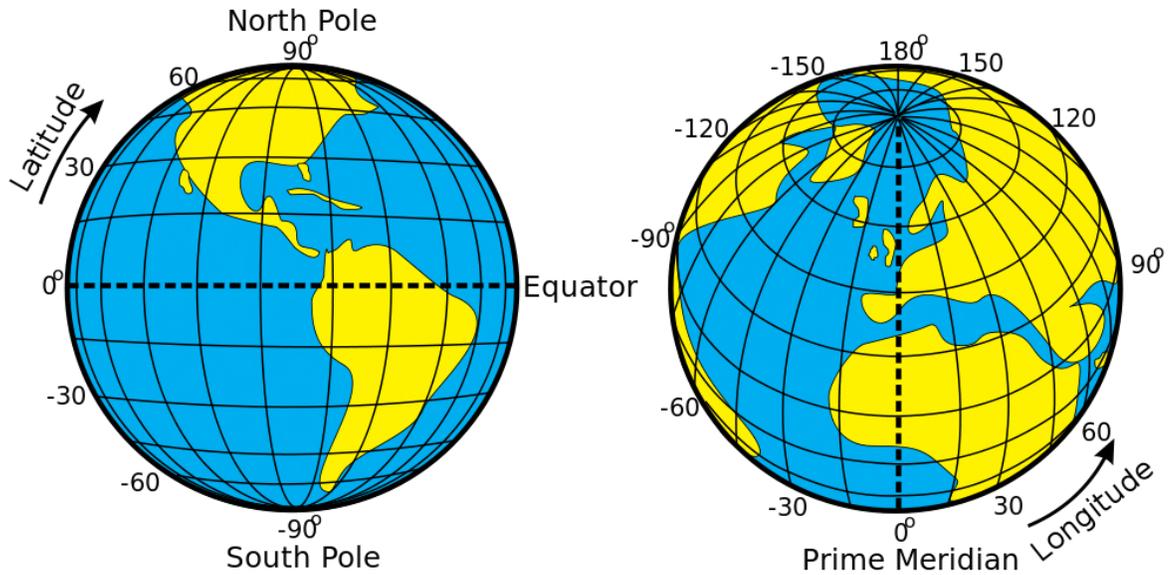


Figura 32. Latitudes y longitudes terrestres

Los meridianos dividen también los husos horarios y si un giro completo de la tierra (360°) se da en 24 horas (1,440 min), significa que 4 min son iguales a un grado y una hora es igual a 15° .

El siguiente paso es obtener el tiempo solar aparente o tiempo solar local (AST) dado por la **Ecuación 7**.

$$AST = LST + \left(4 \frac{\text{min}}{\text{deg}}\right) (LSTM - Long) + ET \quad (7)$$

Donde LST es la hora estándar local para la zona dada, $Long$ es la longitud local de la zona de interés, y $LSTM$ es el tiempo del meridiano local estándar, la cual está dado por la expresión matemática $LSTM = 15^\circ * \left(\frac{Long}{15^\circ}\right)$

La diferencia entre el verdadero tiempo solar y el tiempo promedio solar varía día con día; sin embargo, la **Ecuación 8** (Holbert, 2007) representa una

aproximación de esta diferencia y sus unidades están dadas en minutos. La relación de esta excentricidad puede apreciarse en la **Figura 33**.

$$EOT = 9.87 \sin(2D) - 7.53 \cos(D) - 1.5 \sin(D) \quad (8)$$

Donde $D = 360^\circ \frac{(N-81)}{365}$

Para calcular la insolación solar en un determinado punto de la tierra se determina la posición relativa del sol. Para ello se debe calcular el tiempo solar partiendo del tiempo local y haciendo un ajuste respecto al meridiano de Greenwich, de modo que para calcular la posición del sol es necesario conocer la hora local, por lo tanto, se calcula el meridiano estándar mediante la **Ecuación 9**.

$$LSTM = (15^\circ)(\Delta t_{GMT}) \quad (9)$$

Dónde ΔT_{GMT} es la diferencia entre la hora local (LT) y la hora promedio de Greenwich o Greenwich Mean Time (GMT) en horas. Este cálculo está basado en la siguiente relación $15^\circ = 360^\circ/24$ horas.

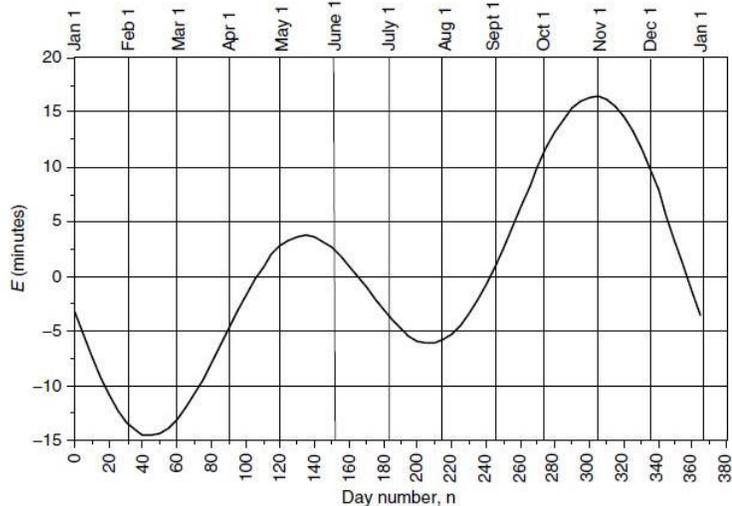


Figura 33. Variación de la Ecuación del Tiempo en Minutos

Aunado a esto existe otro factor de corrección del tiempo (TC) el cual estima la aproximación para un lugar en específico dentro de una zona horaria específica, esta ecuación representa el factor de corrección de tiempo neto, y está definida por la **Ecuación 10**.

$$TC = 4(Long - LSTM) + EoT \quad (10)$$

Donde el 4 representa el movimiento rotacional en minutos, ya que un grado de giro es equivalente a 4 minutos. La variable $Long$ representa la longitud del lugar. $LSTM$ la hora del meridiano estándar, y EoT representa la ecuación del tiempo, calculada previamente.

Con la aplicación de estas dos correcciones (EoT y TC), ahora es posible calcular el tiempo solar local, que definiremos con LST dado en horas, y dado por la **Ecuación 11**.

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad (11)$$

Donde LT es la hora local y TC es la corrección del tiempo neto

Se procederá ahora a calcular el ángulo horario (HRA) el cual convertirá la hora solar local en la cantidad de grados que el sol se ha movido sobre su trayectoria. El HRA se calcula mediante la **Ecuación 12**.

$$HRA = 15^\circ(LST - 12) \quad (12)$$

Donde 15° es el movimiento que representa el transcurso de una hora, y 12 corresponde al punto de inicio del ángulo horario correspondiente al medio día solar, el cual equivale a un ángulo horario de 0° ; por ende, los ángulos de la mañana serán dados en valores negativos y los de la tarde en valores positivos.

Ahora se determinará la inclinación que tendrán los rayos del sol para cierta hora y lugar específicos, por lo tanto se calcula la elevación del sol durante el medio día solar a través del uso de las Ecuaciones 13 y 14, para el hemisferio norte y sur, respectivamente.

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta \quad (13)$$

$$\alpha = 90 + \varphi - \delta \quad (14)$$

Dónde φ es la latitud de la ubicación que queremos calcular y δ es el ángulo de declinación. El 90 representa los 90° de la posición del medio día solar.

En la **Figura 34** muestra una representación gráfica del Cenit, que ubica al sol desde la vertical, la altura o elevación, que ubica al sol desde el plano horizontal, y finalmente el Azimut, que ubica al sol y su movimiento respecto al norte.

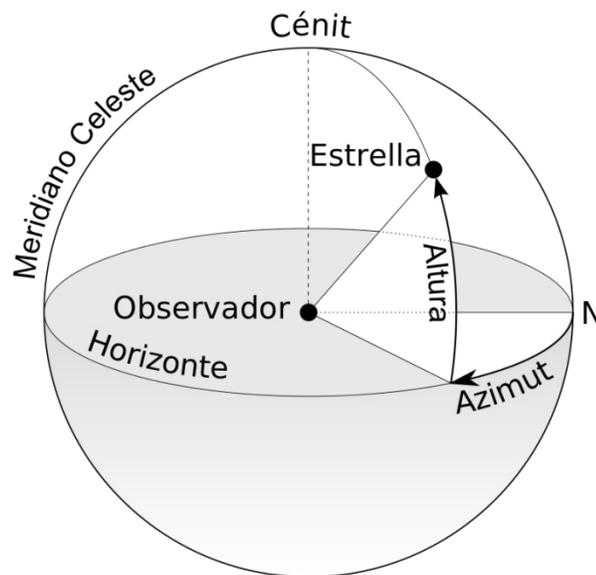


Figura 34.- Representación gráfica del Cenit, la elevación o altura y el Azimut

Para el cálculo del Azimut utilizaremos la **Ecuación 15**:

$$Azimut = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \delta \cos \theta - \cos \delta \sin \theta \cos(HRA)}{\cos \alpha} \right) \quad (15)$$

Donde α es la elevación, δ es el ángulo de declinación, θ es el ángulo de la vertical o cenit y HRA es el ángulo horario.

A continuación, se necesita saber cuántas horas de luz solar tendremos para una posición dada, lo cual se calcula obteniendo el momento en el que ocurren el alba y el ocaso. Para ello, se proponen las **Ecuaciones 16 y 17** para el alba y el ocaso, respectivamente.

$$alba = 12 - \frac{1}{15^\circ} \text{Cos}^{-1}(-\text{Tan}\varphi \text{Tan}\delta) - \frac{TC}{60} \quad (16)$$

$$ocaso = 12 + \frac{1}{15^\circ} \text{Cos}^{-1}(-\text{Tan}\varphi \text{Tan}\delta) - \frac{TC}{60} \quad (17)$$

Una vez obtenidos estos valores la duración del día es simplemente la diferencia dada entre el ocaso y el alba.

Hasta este momento hemos calculado para el modelo presentado en este trabajo: las horas de luz solar, el movimiento del sol en el cielo, y la hora solar. En consecuencia, se procederá a complementar dicho modelo mediante el cálculo de la radiación solar.

La irradiancia solar no sólo depende de la presencia de la luz solar, sino que también varía a lo largo del día, teniendo en cuenta la incidencia de la luz, la perpendicularidad de los rayos solares, la masa de aire y la radiación difusa. Estas variables influyen directamente en el funcionamiento del panel para la intensidad de la radiación global, la cual será mayor cuando la superficie irradiada se encuentre perpendicular a los rayos del sol.

La irradiancia y sus variaciones se determinan a partir de la relación de intensidades dada por la **Figura 35**, en la podemos observar cómo se relacionan la radiación incidente ($S_{\text{incidente}}$), la irradiación sobre una superficie inclinada ($S_{\text{módulo}}$) y la irradiación sobre una superficie horizontal (S_{horiz}).

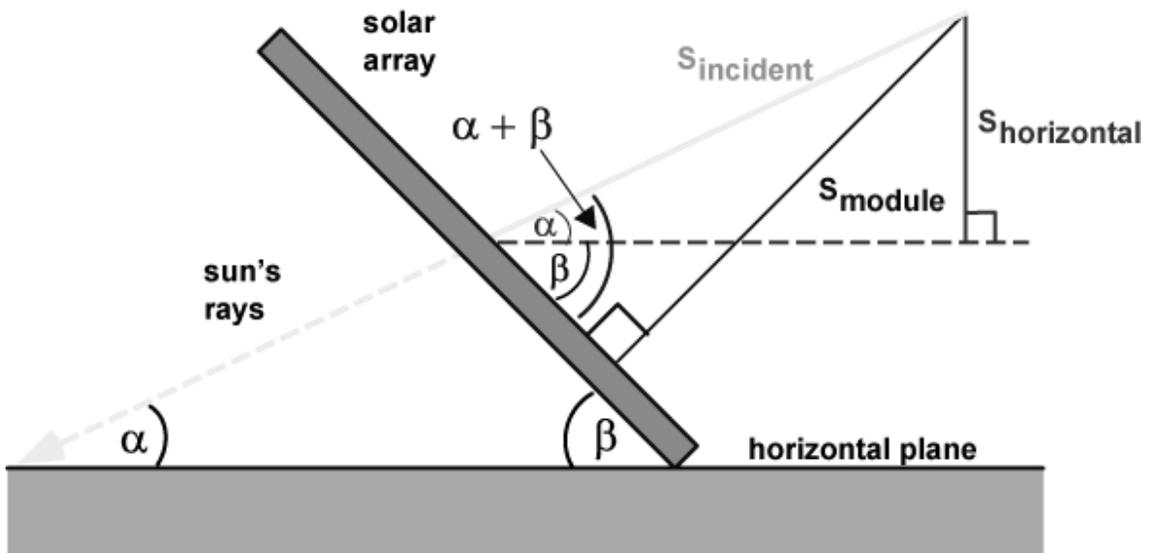


Figura 35. Relación de ángulos para la irradiación solar.

El cálculo de la intensidad de la radiación solar se divide en diferentes componentes, los cuales son radiación directa, difusa y reflejada. La intensidad de la radiación directa se calcula mediante la **Ecuación 18**:

$$I_D = 1353(0.7^{AM} 0.678) \quad (18)$$

Donde 1,353 representa la constante de la radiación solar extraterrestre, el 0.7 representa el 70% de la energía que cruza la atmósfera, 0.678 representa la potencia extra de las capas atmosféricas, y AM es la distancia que recorre la luz

del sol en un punto dado calculada mediante $AM = \frac{1}{\cos \theta}$. Esta ecuación está dada en Watts.

Una vez que obtenida la intensidad directa es posible calcular la intensidad global haciendo una aproximación que consiste en considerar el 10% de la radiación difusa dada por la **Ecuación 19**:

$$I_G = 1.1 * I_D \quad (19)$$

Donde I_G es la intensidad global e I_D es la intensidad directa.

Por ultimo para calcular la radiación incidente en una superficie inclinada, como los paneles del sistema fotovoltaico que esta bajo estudio. Se utilizara la **Ecuación 20**.

$$S_{module} = I_D \text{sen}(\alpha + \beta) \quad (20)$$

Donde α es el andulo de elvacion y β la inclinación del modulo sobre la horizontal.

4.1.1 Aplicación del modelo matemático en el Software Matlab

Para la obtención de datos utilizaremos el software Matlab, cuyo propósito servirá para desarrollar un código basado en el modelo matemático descrito en la **Sección 4.1** de este trabajo que determinará la radiación solar en una ubicación determinada. En este software se realizará la simulación en el cual se introducen los valores obtenidos teóricamente y mediante sus diferentes

herramientas se puede visualizar la respuesta más cercana que este puede presentar respecto a los valores ideales.

A continuación, se explicará a detalle el funcionamiento del código desarrollado.

```
clc; clear all;
```

Esta línea es la primera y lo que hace es limpiar la ventana cada vez que el código se ejecuta.

```
lat=25.807354;  
long=-100.194808;  
TGMT= -6;
```

Aquí se declaran las variables, *lat* que es latitud, *long* que es longitud y *TGMT* que es la diferencia entre la hora local y la hora del meridiano de Greenwich.

```
n=355  
LT=[0:0.1:24];
```

En esta sección del código se declara la variable *n* la cual representa el día del año del cual queremos calcular su radiación, esta variable deberá ser declararla por el usuario.

Para calcula la línea del tiempo declararemos la variable *LT* comenzando de cero y terminando en 24, ya que con esto se cubren las 24 horas del día, y el “0.01” representa el paso de tiempo entre los dos puntos del 0 al 24.

```
LSTM=15*TGMT;
```

Calcula la hora local del meridiano estándar

```
B=(360/365)*(n-81);  
EoT=9.87*sind(2*B)-7.53*cosd(B)-1.5*sind(B);
```

Se define el valor de B con base en la cantidad de días entre los grados que gira la tierra durante un día. Una vez obtenido el valor de B, calculamos la ecuación del tiempo *EoT*.

```
TC=4*(long-LSTM)+EoT;  
LST=LT+(TC/60);  
HRA=15*(LST-12);
```

TC es la corrección del tiempo donde multiplicamos el valor de 4 que representa el valor de un grado de giro equivalente a 4 min, multiplicado por la resta de la longitud menos el tiempo meridiano estándar más la ecuación del tiempo.

```
declinacion=23.45*sind((360/365)*(n-81));  
elevacion=asind(sind(declinacion)*sind(lat)+cosd(declinacion)*cosd(lat)*cosd(HRA));  
azimut=zeros(1,length(elevacion));  
for i=1:length(azimut)  
    azimut(i)=acosd((sind(declinacion)*cosd(lat)-cosd(declinacion)*sind(lat)*cosd(HRA(i)))/cosd(elevacion(i))));  
end  
  
z=90-elevacion  
azimut=acosd((sind(declinacion)*cosd(lat)-cosd(declinacion)*sind(lat)*cosd(HRA))/cosd(elevacion));
```

Se calculan los grados de declinación de la tierra para cierta posición. El código multiplica los grados de declinación que ya tiene la tierra por los grados de giro por día por los días del año para calcular la posición en el día N .

En la variable *azimut* se declara un vector que comience en cero. Se utilizará un ciclo *for* dentro del cual se declara que comience en 1 y llegue hasta el valor de la elevación. Esto permitirá que la ecuación para obtener el azimut se itere hasta que se cumplan todos los valores de elevación.

La elevación es la distancia desde la horizontal hasta donde el sol se encuentra antes de llegar a la vertical (90°) y el ángulo cenit z que es la diferencia entre los 90° de la vertical y la elevación.

```
sunrise=12-(1/15)*acosd(-tand(lat)*tand(declinacion))-  
(TC/60);  
sunset=12+(1/15)*acosd(-tand(lat)*tand(declinacion))-  
(TC/60);  
duraciondia=sunset-sunrise;
```

Aquí se calcula la duración de horas de sol para un día obteniendo la hora del alba y la del ocaso.

```
AM=NaN(1,length(LT));  
AMelv=NaN(1,length(LT));  
Idirecta=zeros(1,length(LT));  
Idifusa=zeros(1,length(LT));  
It=zeros(1,length(LT));  
Itt=zeros(1,length(LT));  
Ispt=zeros(1,length(LT));
```

En esta parte del código se declaran *AM* y *AMelv* como vectores que contendrán valores *NaN*, los cuales se emplean para evitar la obtención de números complejos. El resto de las variables declaradas en esta sección del código inician su valor en ceros.

```
for j=1:length(LT)
    if LT(j)>sunrise & LT(j)<sunset
        AM(j) = 1/(cosd(z(j))+0.50572*((6.07995+(90-
z(j))))^(-1.6364)));
        AMelv(j)=AM(j)^0.678;
        Idirecta(j)=1.353*(0.7.^AMelv(j));
        Idifusa(i)=Idirecta(j)*0.1;
        It(j)=Idirecta(j)+Idifusa(j);
        Ispt(j)=(It(j)*sind(elevacion(j)))*29.8;
    end
end
```

Se abre un ciclo *for* que determina que *j* tomará el valor de 1 hasta el valor del tiempo local. Inmediatamente después, se abre un ciclo *if* que establece que esta condición se cumplirá únicamente si *j* es mayor que el valor de la variable *sunrise* y menor que la variable *sunset*.

Dentro del ciclo *if* se calcularán las variables *AM*, *AMelv*, *Idirecta*, *Idifusa*, *It* y *Isp*, con el fin de almacenar cada resultado para cada valor de *j* en los vectores declarados anteriormente.

```
Isptp=Ispt*.169;
[~,Datos]=size(LT);
```

Se calcula el porcentaje de eficiencia de los paneles solares.

Se definen dos salidas de tamaño LT .

```
ii=1;
```

Define un valor inicial donde "ii=1"

```
for i=1:Datos
```

Comienza un ciclo *for* que ejecutará una iteración a partir de 1 hasta llegar a la variable *Datos*.

```
if LT(i)>=sunrise
```

Se declara un ciclo *if* que se ejecutará si el tiempo local, $LT(i)$ es igual o mayor que *sunrise*.

```
if LT(i)<=sunset
```

De igual modo, se declara un ciclo *if* que se ejecutará si el tiempo local, $LT(i)$ es menor o igual que *sunset*.

```
IsptArea(ii)=Ispt(i); IsptpArea(ii)=Isptp(i)
```

```
LTArea(ii)=LT(i);
```

El código declara aquí nuevas variables iniciales, que irán cargando un valor cada vez que el vector avance en el paso de tiempo.

```
ii=ii+1;
```

Aumenta el valor de "ii" en una unidad

```
LTArea=LTArea'; IsptArea=IsptArea';
```

Se utilizan los apóstrofes para transponer los vectores almacenados

```
Insolacion_Plana_T=trapz(LTArea, IsptArea)
```

```
Insolacion_Plana_T_P=trapz(LTArea, IsptpArea)
```

Volvemos a declarar 2 nuevas variables, las cuales almacenarán los resultados de la integral de los vectores declarados.

```
plot(LTArea, IsptpArea, '-', LTArea, IsptpArea, '-'); grid on;
```

Grafica las variables de los vectores declarados, *grid on* haciendo que la gráfica tenga la malla activada

```
legend(['Irradiacion Total',  
num2str(Insolacion_Plana_T), ' Wh/m^2'], ...  
       ['Irradiación a un 16.9%'],  
num2str(Insolacion_Plana_T_P), ' Wh/m^2'])
```

Este código sirve para poner una leyenda en la gráfica.

4.1.2 Obtención de datos experimentales

En esta sección se presentan los datos generados por la planta solar fotovoltaica que se utilizarán para compararlos con el modelo matemático.

En las **Figuras 36, 37 y 38**, se presenta la producción diaria de energía durante los meses de julio, agosto y septiembre, respectivamente, en la cuales podemos observar que el desempeño es fluctuante a lo largo del mes.



Figura 36. Producción de energía diaria del mes de julio.

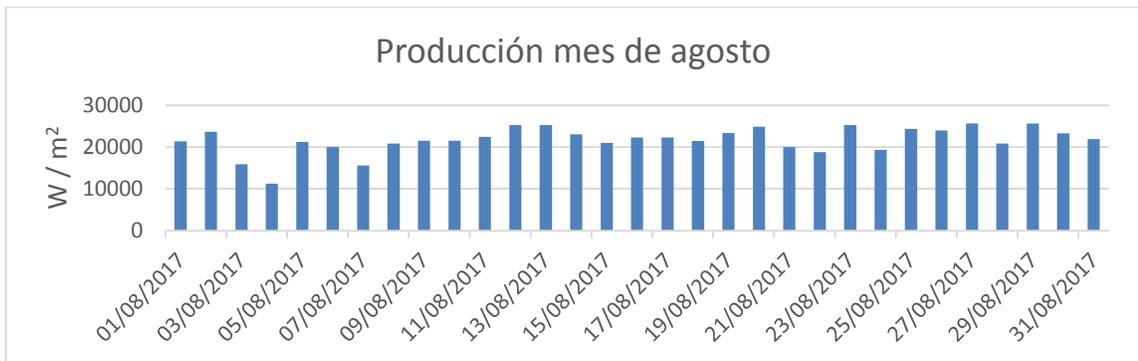


Figura 37. Producción de energía diaria del mes de agosto.

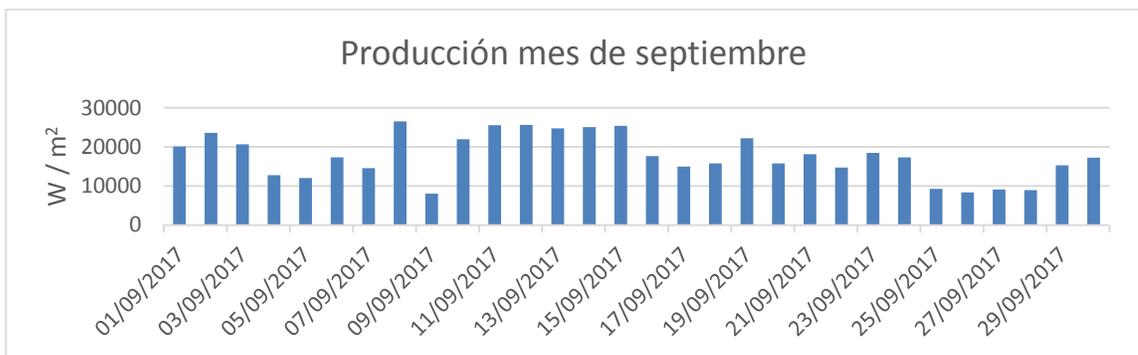


Figura 38. Producción de energía diaria del mes de septiembre.

4.1.3 Resultados del modelo teórico

Una vez implementado el modelo matemático en MatLab se puede obtener todo el recurso solar teórico disponible a lo largo de un mes, para compararlo con valores reales producidos por las estaciones meteorológicas.

Para el análisis de datos se seleccionaron los meses de julio, agosto y septiembre de 2017. El motivo es que son los meses de los cuales se cuenta con los datos de producción de la planta solar y recurso solar de la estación meteorológica.

En las **Figuras 39** y **40** se observa que el modelo matemático se encuentra por encima de los valores del recurso solar medido en la estación meteorológica, y de la producción de energía de la planta fotovoltaica, respectivamente.

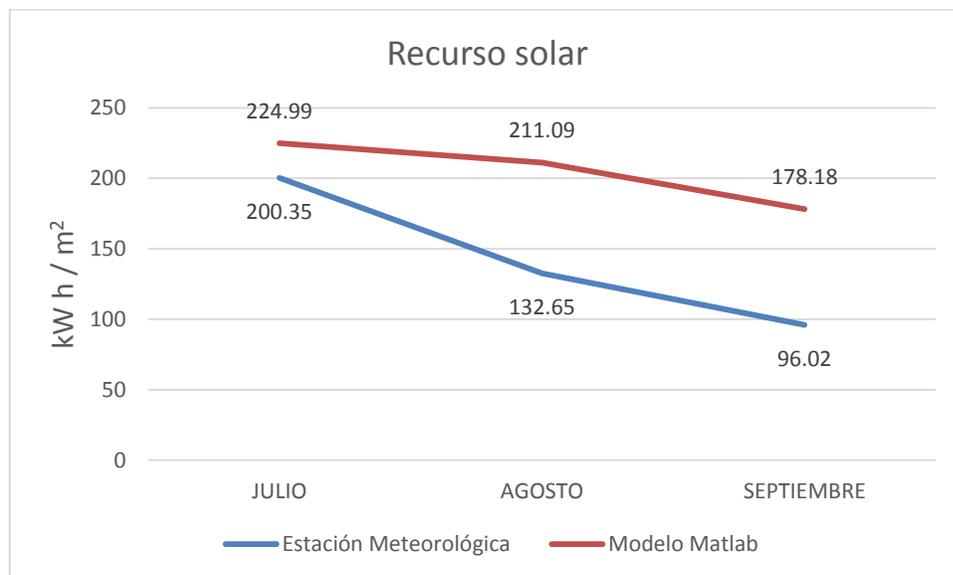


Figura 39. Comparación del recursos solar de la estación meteorológica vs el modelo matemático utilizado.

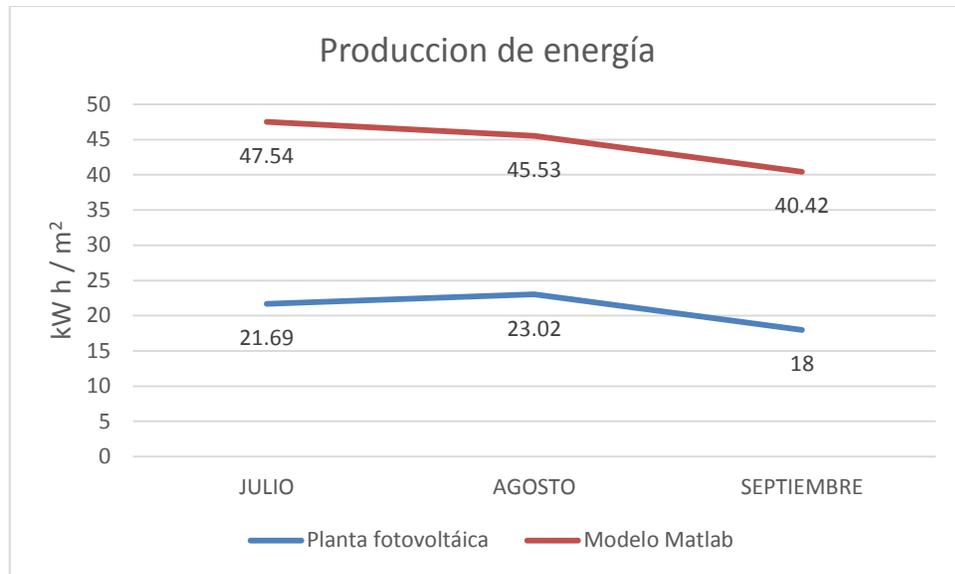


Figura 40. Comparación de la producción de energía de la planta fotovoltaica vs el modelo matemático utilizado

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente trabajo se realizó una comparación del desempeño de una planta solar de paneles fotovoltaicos mono-cristalinos en condiciones reales de operación con la simulación de este sistema basada en un modelo matemático en condiciones óptimas. Una vez obtenidos estos datos se analizó la diferencia entre los mismos.

Por otra parte, se definieron los parámetros de funcionamiento de una instalación solar fotovoltaica conectada a la red de distribución eléctrica de 4,950 W de potencia instalada en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León. Además, se analizó el desempeño de estos parámetros durante tres meses de manera experimental; cabe aclarar, que a pesar de contar con información de todo un año de producción de energía, sólo se contó con datos meteorológicos de los meses de julio, agosto y septiembre para efectos comparativos.

Se implementó un modelo matemático con base en las ecuaciones obtenidas de la literatura, simulando el comportamiento del modelo matemático ya definido mediante el programa Matlab, realizando el análisis comparativo de los datos reales contra los datos teóricos arrojados por el modelo.

Mediante este estudio se analizó el comportamiento real de una planta solar fotovoltaica interconectada a la red, modelando el efecto de la radiación solar y

su impacto en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, el modelo implementado difiere de la realidad como se aprecia en las figuras presentadas en la sección de resultados al final del Capítulo 4.

La principal limitación del modelo recae en que no se consideran los efectos climáticos, tales como, la nubosidad, el viento y la contaminación atmosférica, así como la temperatura y la suciedad superficial del panel.

Lo antes mencionado se puede apreciar en las **Figuras 36, 37 y 38** “Producción de energía diaria mensual”, ya que en ellas se observan caídas de producción provocadas los efectos ambientales ya descritos.

A través de este estudio se obtuvieron los datos reales de la producción de energía generados por una planta solar en el área metropolitana de Monterrey N.L.; no obstante, el modelo matemático utilizado en el presente trabajo no puede considerarse un punto de referencia válido para el desarrollo de nuevos productos e innovaciones en el área solar dadas las limitantes de dicho modelo.

Capítulo 6

Trabajos Futuros

- Mejorar el modelo matemático considerando dentro de las variables, el coeficiente de temperatura el cual puede modelarse con la velocidad del viento y temperatura ambiente, estos datos pueden obtenerse de las estaciones meteorológicas de la zona.
- Complementar el sistema de adquisición de datos con un nubofasímetro, el cuales permitirá obtener los datos de densidad de nubes.
- Robustecer el modelo matemático implementado, de manera que sea una herramienta para evaluar el desempeño de futuras instalaciones solares.

Bibliografía

- A. B. Meinel y Meinel, M. P., Applied Solar Energy. Addison Wesley Publishing Co., 1976.
- Abal, G. (2011). Fundamentos de Energía Solar RADIACIÓN SOLAR.
- A. Luque y Hegedus, S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2003.
- Actual, S., La, Y. P. D. E., & Solar, E. (1979). Situacion actual y perspectivas de la energia solar en mexico.
- Alrededor, K., & La, C. (n.d.). 3 . MEDIDA DE LA RADIACIÓN SOLAR, 13–42.
- A. Einstein, «Generation and transformation of light», Annalen der Physik, vol. 17, 1905.
- Ardani, K., & Margolis, R. (2011). 2010 Solar Technologies Market Report. *Nrel*, (November), 1–136. <https://doi.org/DOE/GO-102011-3318>
- Aristizabal, A. J., Bogotá, U. De, & Tadeo, J. (2013). Implementación de un Prototipo de Sistema Fotovoltaico Autónomo : Construcción , Caracterización y Monitoreo, (October).
- ASIF. (2008). Historia de la energia solar fotovoltaica, <http://edi-net6-4-0-6.wikispaces.com/file/view/ene>.
- Barrera, M. P. (2009). Simulación y caracterización de celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales, 168.
- Bostan, I., Gheorghe, A. V., Dulgheru, V., Sobor, I., Bostan, V., & Sochirean, A. (2012). *Resilient Energy Systems: Renewables: Wind, Solar, Hydro*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4189-8>
- Boxwell, M. (2012). Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy : how to Design and Install Photovoltaic Solar Electric Systems, 197. Retrieved from https://books.google.com/books?id=C9a1Mse_1-kC&pgis=1
- BP. (2016). Statistical Review of World Energy. *BP Statistical Review of World Energy*, (June), 1–48. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.172>
- Brabec, C. J. (2004). Organic photovoltaics: Technology and market. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 83(2–3), 273–292. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.02.030>

- Butti, K., & Perlin, J. (1980). A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology. *Energy Policy*. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(81\)90191-9](https://doi.org/10.1016/0301-4215(81)90191-9)
- C. Hu y White, R. M., *Solar Cells: From Basic to Advanced Systems*. New York: McGraw-Hill, 1983.
- Cámara de diputados del H. congreso de la unión. (2012). Ley General de Cambio Climático. *Dof 06-06-2012*, 1–44. Retrieved from
- Chouder, A., Silvestre, S., Taghezouit, B., & Karatepe, E. (2013). Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW. *Solar Energy*, *91*(September), 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.09.016>
- Cucumo, M., De Rosa, A., Ferraro, V., Kaliakatsos, D., & Marinelli, V. (2010). Correlations of direct solar luminous efficacy for all sky, clear sky and intermediate sky conditions and comparisons with experimental data of five localities. *Renewable Energy*, *35*(10), 2143–2156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.004>
- Del, E., Otros, T., Con, R., & Tiempo, E. L. (n.d.). Ecuación del tiempo – otros conceptos relacionados con el tiempo solar.
- DOLARA, A., FARANDA, R., & LEVA, S. (2009). Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, *1*(3), 152–162. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2009.13024>
- Duffie, J. a., Beckman, W. a., & Worek, W. M. (2003). *Solar Engineering of Thermal Processes, 4nd ed. Journal of Solar Energy Engineering* (Vol. 116). <https://doi.org/10.1115/1.2930068>
- Dufresne, J.-L. (2008). La détermination de la constante solaire par Claude Matthias Pouillet. *La Météorologie*. <https://doi.org/10.4267/2042/16943>
- Edition, S. (2011). *Photovoltaic Science Handbook of Photovoltaic Science*. <https://doi.org/10.1002/9780470974704>
- Enseñat Beso, J. M., Martínez Busto, C., Ahedo Valdivielso, J., Romero Ramos, M. Á., Serra Maria-Tomé, L., Romero Salvachúa, F., ... Melchor González, S. (2007). Energía solar Térmica y fotovoltaica. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 70. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Erick, B., González, V., Francisco, B., Velásquez, J., Juan, I., & Mena, G. (2016). Tesis Monográfico para Optar al Título de Ingeniero Eléctrico Tutor :

- Gasquet, H. (1997). Conversión de la luz solar en Energía Eléctrica: Manual Teórico y Práctico sobre los sistemas Fotovoltaicos. *Conversión de La Luz Solar En Energia Electrica: Manual Teorico Y Práctico.*, 52(90), 196. Retrieved from <http://www.solartronic.com/download/SistemasFV.pdf>
- González, E. (2008). Sistema fotovoltaico con mínimo almacenamiento de energía en el enlace de CD, *I*, 125.
- Green, M. A. (2004). Recent developments in photovoltaics. *Solar Energy*, 76(1–3), 3–8. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00065-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00065-3)
- Green, M. A. (2001). Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9(2), 123–135. <https://doi.org/10.1002/pip.360>
- Green, M. A. (2005). Silicon photovoltaic modules: A brief history of the first 50 years. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(5), 447–455. <https://doi.org/10.1002/pip.612>
- Green, M. A. (2002). Third generation photovoltaics: Solar cells for 2020 and beyond. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1–2), 65–70. [https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(02\)00361-2](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(02)00361-2)
- Guasch, M. D. (2003). Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos. *Universidad Politecnica de Cataluña*, 223.
- He, Z., Zhong, C., Huang, X., Wong, W. Y., Wu, H., Chen, L., ... Cao, Y. (2011). Simultaneous enhancement of open-circuit voltage, short-circuit current density, and fill factor in polymer solar cells. *Advanced Materials*, 23(40), 4636–4643. <https://doi.org/10.1002/adma.201103006>
- Herrera, L., Arango Zuluaga, E. I., Miranda, A., Ramos Paja, C. A., & González Montoya, D. (2013). Dimensionamiento de Sistemas de Generación Fotovoltaicos Localizados en la Ciudad de Medellín. *Tecno Lógicas*, 0(0), 289–301.
- Hersch, P., & Zweibel, K. (1982). Basic photovoltaic principles and methods. <https://doi.org/10.2172/5191389>
- Holbert, K. E. (2007). Solar Calculations. *Phoenix Usa*, (4), 1–7.
- Hoshikawa, K., Kohda, H., & Hirata, H. (1984). Homogeneous dopant distribution of silicon crystal grown by vertical magnetic field-applied czochralski method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 23(1), 37–39. <https://doi.org/10.1143/JJAP.23.L37>

Huertas, D. P., & Ortiz-solorio, C. A. (2016). República Mexicana (primera aproximación) Estimación de la radiación global para la República Mexicana (primera aproximación), (January 1993).

I. Reda y Andreas, A., Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications», 2003.

Instituto De Investigaciones Legislativas Del Senado De La República. (2004). Nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México (Análisis y propuesta). *Instituto De Investigaciones Legislativas Del Senado De La República*, 1–167.

Introducción, I., Abella, M. A., Digital, C., Convertidor, P., Ente Vasco, Chávez, ... Lojano Diego, R. O. (2011). Libro interactivo de energía solar y sus aplicaciones. Proyecto de fin de carrera en Técnico en Electricidad. *Agenergía*, 3(90), 1–59. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5022/1/Tesis.pdf%5Cnhttp://lucesparaaprender.org/web/wp-content/uploads/2012/05/PROFESORES-8-11-ficha-3-El-panel-solar-sus-usos-y-beneficios1.pdf%5Cnhttp://www.solartronic.com/download/SistemasFV.pdf>

Investigaci, T., Garc, C. A., Tecnolog, C. P. O. P., Fotovoltaica, S., Jes, P., & Serrano, T. (2010). *SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO PARA CASA DE Pablo Jesús Trujillo Serrano*.

Inzunza, J. (2008). Radiacion solar y terrestre. *Ciencias Integradas*, 15.

Jef Poortmans and Vladimir Arkhipov, Poortmans, J., & Arkhipov, V. (2006). *Thin Film Solar Cells Fabrication , Characterization and Applications. Solar Cells* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1002/0470091282.ch9>

Jimenez, F., & Solé, D. B. (2009). Estudio y simulación de sistemas de conversión fotovoltaica-eléctrica mediante Matlab/Simulink. *Saei '09*. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/13272>

Johnson, F. (1954). Johnson F (1954) The solar constant.pdf. *Journal of Meteorology*.

Kharseh, M. (n.d.). Solar Radiation Calculation - Lecture Slides.

King, D. L., Kratochvil, J. A., & Boyson, W. E. (1997). Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties, and results. *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997*, (September), 1183–1186. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654300>

King, R. R., Law, D. C., Edmondson, K. M., Fetzer, C. M., Kinsey, G. S., Yoon, H., ... Karam, N. H. (2007). 40% efficient metamorphic GaInPGaInAsGe multijunction

- solar cells. *Applied Physics Letters*, 90(18), 90–93.
<https://doi.org/10.1063/1.2734507>
- Kippelen, B., & Brédas, J.-L. (2009). Organic photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 2(3), 251. <https://doi.org/10.1039/b812502n>
- Llamas, P. L. (2009). Eficiencia energética y medio ambiente. *Información Comercial Española, ICE: Revista de Economía*, 75–92. <https://doi.org/10.2172/1011644>
- López, M. (2016). Guía sobre Energía Solar Térmica. *Viessmann*.
- Marion, B., Rodri, J., & Pruett, J. (2009). Instrumentation for Evaluating PV System Performance Losses from Snow Preprint. *National Solar Conference (SOLAR 2009)*, (April), 1–6.
- Martínez, A. Z., & Santos, M. (2015). Modelo y Simulación de un Sistema Fotovoltaico Portátil, 2–4.
- Masoum, M. a. S., Dehbonei, H., & Fuchs, E. F. (2002). Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(4), 514–522.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2002.805205>
- Mayfield, R. (2010). *Photovoltaic Design and Installation for Dummies*. Solar Energy.
- M. Planck, «Distribution of energy in the normal spectrum», *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, vol. 2, 1900.
- Mendoza, C. (2011). Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación de México, 26–54.
- Merla Rodríguez, G. (1990). *Nuevo León Geografía Regional*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mikati, M., Santos, M., & Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial*, 9(3), 267–281. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.010>
- Miles, R. W., Hynes, K. M., & Forbes, I. (2005). Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 51(1–3), 1–42.
<https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2005.10.002>

- Neville, R. (1994). *Solar Energy Conversion: The Solar Cell*, 25.
- Pezo, R. B. (2011). *Radiación Solar, 2017*. Retrieved from <http://www.blogdequk.com/2011/04/la-radiacion-termica-y-radiacion-solar.html>
- Poveda, M. (2007). Eficiencia Energética: Recurso no aprovechado. *Latin American Energy Organization*.
- Quer, G. D. E. (2014). Universidad Tecnológica de Querétaro.
- R. Perez, Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., y Stewart, R., Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, *Solar Energy*, vol. 44, 1990.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580–1608. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
- Redonda, M. (1972). La xxxix conferencia nacional de ingeniería. *ingeniería*, 1–14.
- Rivera López, F. de J. (2002). Diseño y Construcción de un enlace Optoelectrónico, (November 2016), 37–43.
- Robinson, B. (1999). The First Forty Years. *World*, 1(Smith 1960), 65–96.
- Robledo, L., & Soler, A. (2003). Modeling the luminous efficacy of diffuse solar radiation on inclined surfaces for all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 44(1), 177–189. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00202-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00202-3)
- Rodr, R. (n.d.). Con Matlab, 1–42. Retrieved from <http://www.mat.ucm.es/~rrdelrio/documentos/rrrescorial2002.pdf>
- Sabonnadiere, J. C. (2007). *Renewable Energies*. <https://doi.org/10.4324/9780203798027>
- SEDESOL, CONAPO, & meinel. (2012). Delimitación de las zonas metropolitanas de México. *Delimitación de Las Zonas Metropolitanas de México*, 1–105.
- SENER. (2015). Prospectiva de Energías Renovables. *Diario Oficial de La Federación*, 1, 156. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Silvestre, S., Castañar, L., & Guasch, D. (2008). Herramientas de Simulación para Sistemas Fotovoltaicos en Ingeniería. *Formación Universitaria*, 1(1). <https://doi.org/10.4067/S0718-50062008000100003>
- Sol, E., & Solar, S. (n.d.). LA ECUACIÓN DEL TIEMPO, 1–6.

- Stair, R., Johnston, R. G., & Bagg, T. C. (1954). Spectral Distribution of Energy From the Sun. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 53(2).
- Stuart (2013) Photovoltaic Education
<http://www.pveducation.org/es>
- T. ESRAM, P. L. C. et al. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- Toledo, A. F. (2007). Generación Eoloeléctrica con Almacenamiento de Hidrógeno. *Director*.
- Tsao, J., Lewis, N., & Crabtree, G. (2006). Solar FAQs. *US Department of Energy*, 1–24. Retrieved from <http://www.sandia.gov/~jytsao/SolarFAQs.pdf>
- Viñas, L. P. (2010). Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos, 1–61.
- Wang, A., Zhao, J., & Green, M. A. (1990). 24% Efficient Silicon Solar Cells. *Applied Physics Letters*, 57(6), 602–604. <https://doi.org/10.1063/1.103610>
- Zúñiga, R., & Generales, C. (n.d.). Introducción al Uso de MATLAB. Retrieved from <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/Matlabintro0408.pdf>
- Perez-Ineichen 1990 - Modelling Daylight (Se).Pdf. (n.d.).
- Taller: Modelo para representar la trayectoria del sol sobre el globo terrestre Ilce Tlanezi Lara Montiel y Julieta Fierro. (n.d.).
- ASIF. (2008). Historia de la energía solar fotovoltaica, <http://edi-net6-4-0-6.wikispaces.com/file/view/ene>.
- Cámara de diputados del H. congreso de la unión. (2012). Ley General de Cambio Climático. *Dof 06-06-2012*, 1–44. Retrieved from [file:///Users/Jordi/Documents/1.Articles/Mexican Government/Mexican Law on Climate Change 2012_lgcc.pdf](file:///Users/Jordi/Documents/1.Articles/Mexican%20Government/Mexican%20Law%20on%20Climate%20Change%202012_lgcc.pdf)
- Edition, S. (2011). *Photovoltaic Science Handbook of Photovoltaic Science*.

<https://doi.org/10.1002/9780470974704>

- Holbert, K. E. (2007). Solar Calculations. *Phoenix Usa*, (4), 1–7.
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Monterrey, Nuevo León., 9.
- Inzunza, J. (2008). Radiacion solar y terrestre. *Ciencias Integradas*, 15.
- Kharseh, M. (n.d.). Solar Radiation Calculation - Lecture Slides.
- SEDESOL, CONAPO, & INEGI. (2012). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México. Delimitación de las zonas metropolitanas de México.*
- Stair, R., Johnston, R. G., & Bagg, T. C. (1954). Spectral Distribution of Energy From the Sun. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 53(2).
- Toledo, A. F. (2007). Generación Eoloeléctrica con Almacenamiento de Hidrógeno. *Director.*
- Tsao, J., Lewis, N., & Crabtree, G. (2006). Solar FAQs. *US Department of Energy*, 1–24. Retrieved from <http://www.sandia.gov/~jytsao/Solar FAQs.pdf>

Anexo 1

Hoja de Especificaciones:

Panel Suniva Optimus



SUNIVA OPTIMUS® SERIES MONOCRYSTALLINE SOLAR MODULES

OPT SERIES: OPT 72 CELL MODULES (SILVER FRAME)

ENGINEERING EXCELLENCE

- Built exclusively with Suniva's premium ARTisun Select cells, providing one of the highest power outputs per square meter at an affordable price
- The leading US-born, US-operated crystalline silicon cell and module manufacturer, spun out of Georgia Tech's University Center of Excellence in Photovoltaics; one of only two such research centers in the U.S.
- Suniva's state-of-the-art manufacturing and module lab facilities feature the most advanced equipment and technology

QUALITY & RELIABILITY

- Suniva Optimus modules are manufactured and warranted to our specifications assuring consistent high performance and high quality.
- Rigorous in-house quality management tests beyond standard UL and IEC standards
- Performance longevity with advanced polymer backsheet
- UL1703 listed Type 2 PV module
- Passed the most stringent salt spray tests based on IEC 61701
- Passed enhanced stress tests based on IEC 61215 conducted at Fraunhofer ISE†
- PAN files are independently validated



Optimus® modules are known for their superior quality and long-term reliability. These high-powered modules consist of Suniva's premium ARTisun® Select cell technology and are designed and manufactured in the U.S.A. and North America using our pioneering ion implantation technology. Suniva's high power-density Optimus modules provide excellent performance and value.

FEATURES

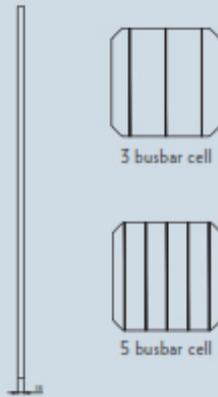
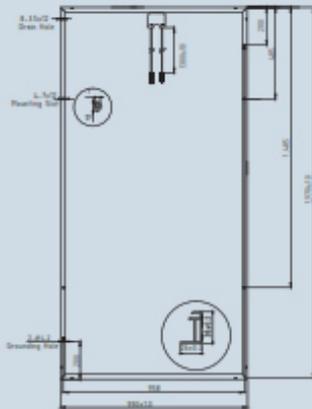
- Utilizes our premier American-made cell technology, ARTisun Select®
- Superior performance and reliability; enhanced stress tests conducted at Fraunhofer ISE
- Module families ranging from 325-340W
- Positive only power tolerance
- Marine grade aluminum frame with hard anodized coating
- Certified PID-free by PV Evolution Labs (PVEL)
- Made in North America
- Qualifies for Ex-Im Financing
- 1000V UL
- 25 year linear power warranty; 10 year product warranty



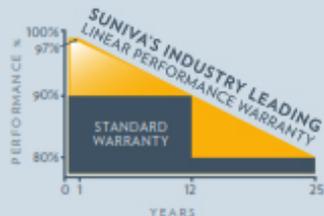
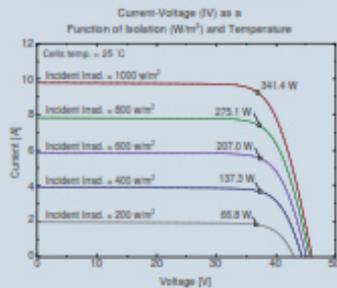
CERTIFICATIONS



www.suniva.com



PV module: Suniva, OPT340-72-4-100



PLEASE RECYCLE
AUGUST 19, 2015 (REV. 6) [SAMD_0051]

OPTIMUS SERIES: OPT 72 CELL MODULES

ELECTRICAL DATA (NOMINAL)

The rated power may only vary by $-0/+10W$ and all other electrical parameters by $\pm 5\%$

Module Type	OPT325-72-4-100	OPT330-72-4-100	OPT335-72-4-100	OPT340-72-4-100
Power Classification (Pmax)	325 W	330 W	335 W	340 W
Module Efficiency (%)	16.66%	16.92%	17.18%	17.43%
Voltage at Max. Power Point (Vmp)	37.5 V	37.6 V	37.7 V	37.8 V
Current at Max. Power Point (Imp)	8.67 A	8.78 A	8.89 A	8.99 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.8 V	45.9 V	45.9 V	46.0 V
Short Circuit Current (Isc)	9.42 A	9.54 A	9.66 A	9.78 A

The electrical data apply to standard test conditions (STC): Irradiance of $1000 W/m^2$ with AM 1.5 spectra at 25°C.

CHARACTERISTIC DATA

Type of Solar Cell	High-efficiency ARTiSun Select cells, 3 and 5 busbar options available
Frame	Silver anodized aluminum alloy
Glass	Tempered (low-iron), anti-reflective coating
Junction Box	NEMA IP67 rated; 6 internal diodes
Cable & Connectors	12 AWG (4 mm ²) PV Wire with multiple connector options available; cable length 1300 mm

MECHANICALS

Cells / Module	72 (6 x 12)
Module Dimensions	1970 x 990 mm (77.6 x 39 in.)
Module Thickness (Depth)	38 mm (1.5 in.)
Approximate Weight	23 kg (50.7 lbs.)

TEMPERATURE COEFFICIENTS

Voltage	β , Voc (%/°C)	-0.335
Current	α , Isc (%/°C)	+0.047
Power	γ , Pmax (%/°C)	-0.420
NOCT Avg	(\pm 2 °C)	46.0

LIMITS

Max. System Voltage	1000 VDC for IEC, 1000 VDC for UL
Max Series Fuse Rating	15 Amps
Operating Module Temperature	-40°C to +85°C (-40°F to +185°F)
Storm Resistance/Static Load	Tested to IEC 61215 for loads of 2400 Pa (50 psf); hail and wind resistant

Suniva® reserves the right to change the data at any time. View manual at suniva.com.

¹UV 90 kWh, TC 400, DH 2000. ²Tests were conducted on module type OPT 60 silver frame.

Please read installation manual before installing or working with module.

HEADQUARTERS		
Product	Modules per pallet:	Modules per full 53 ft. truck load, double stacked
OPT - 72 cell	22	660
5765 Peachtree Industrial Blvd., Norcross, Georgia 30092 USA Tel: +1 404 477 2700 www.suniva.com		

