



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Influencia de inversión
magnética solar en paneles
fotovoltaicos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera civil

P R E S E N T A

Isis Gutiérrez Páez

DIRECTOR DE TESIS

M.C Miguel Enríquez Vargas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Agradecimientos.

- A mis padres Francisco y Monica por llevar acabo la grandiosa tarea de ser padres conmigo, aprendimos juntos a ser familia y me trajeron hasta acá. Llegamos sin nada y miren ahora, ya lo tenemos todo. A mi hermano Paul, porque sin duda el tener las constantes miradas de alguien pequeño es un gran reto que siempre he tenido miedo a hacer mal y hoy puedo darte una prueba de que no soy tan mala como piensas.
- A mi familia mi abuela Rosita, mi tío Jesús, mi tía Brenda y mi primo Arturo; por hacerme sentir en un hogar, por acudir a mi rescate cada que tenía accidentes, por cada desayuno que realizaron para que yo pudiera comer algo en la escuela y por hacerme parte de la familia todos estos años de carrera.
- A mi tía Veronica, a Teresa y Valentina; gracias por secarme las lagrimas, ayudarme cuando estuve en peligro y ser mi apoyo cuando los ánimos no eran suficientes.
- A mis amigos: Berenice, David, Otto, Fernando, Rodrigo, Jorge, Carlos, Emmanuel, Ovidio, Adriana, Juan Alberto y George. Definitivamente, el creer en mí fue la pieza más importante en esta etapa de mi vida universitaria. Desde el apoyo en tareas hasta el consejo entre lagrimas, lo valoro infinitamente y agradezco compartir mi vida con ustedes.
- A mi asesor Miguel Enriquez Vargas por la grandeza de ser humano y profesor, por la infinita paciencia y la increíble experiencia que fue compartir un trabajo de este tamaño a su lado; me ha formado un carácter menos frágil y ha sido siempre con base a consejos.
- A los ingenieros Heriberto, Raymundo, Oscar y Rodrigo, por todo su apoyo durante la revisión de esta tesis. Pero sobre todo, por sus lecciones como profesores en cada uno de los semestres en los que interactuamos, me hicieron crecer mucho más de lo académico.

Índice.

INTRODUCCIÓN.....	3
Justificación	4
Objetivos.....	4
CAPITULO 1: El Sol.....	6
1.1 El magnetismo y ciclo solar.....	9
1.2 Espectro electromagnético	11
1.3 Distribución espectral de radiación solar.....	12
1.4 Radiación solar en México.....	15
CAPITULO 2: Energía Solar.....	23
2.1 Cinturón solar de la Tierra.....	23
2.2 Uso de la energía solar.....	25
2.3 Capacidad instalada México.....	26
CAPITULO 3 : Paneles fotovoltaicos.....	30
3.1 Principio fotovoltaico.....	32
3.2 Tipos de paneles fotovoltaicos y tecnología de celdas.....	37
3.3 Eficiencia y orientación.....	42
3.4 Uso de paneles fotovoltaicos en México	49
CAPITULO 4: Actividad solar y su influencia en paneles solares.....	51

4.1 Influencia de la variación anual en los paneles fotovoltaicos.....	51
4.2 Condiciones climáticas de México y su afectación en los paneles fotovoltaicos.....	57
4.3 Radiación incidente en el panel fotovoltaico inclinado.....	59
4.4 Influencia de la inversión magnética solar en los paneles fotovoltaicos.....	63
CAPÍTULO 5: Conclusiones.....	69
REFERENCIAS.....	71

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo, busca realizar una revisión en el comportamiento de la eficiencia de los paneles solares respecto a una variación de la actividad solar y su inversión magnética como estrella incandescente. En la actualidad, las energías limpias brindan la posibilidad de mantener una eficiencia y continuidad del recuso sin generar un impacto en el medio ambiente. Esto representa un reto para las futuras generaciones.

El trabajo fija en el comportamiento de la inversión magnética solar como un cambio en la liberación de radiación que es percibida en el planeta Tierra, por lo que cada 11 años existe una fluctuación donde puede existir calma y poca actividad solar o viceversa.

Si se considera un estado inicial del sol en mínima actividad solar el campo magnético se considera di-polo. Por lo contrario, si se considera un máximo de actividad solar como un estado inicial donde el polo magnético norte converge con el norte heliográfico sucede la inversión magnética solar 11 años después y el norte magnético ahora se encontrará en el sur heliográfico.

Por otro lado, la temperatura total de la superficie en la Tierra tiene diferentes fuentes de calor, una de ellas es el que proviene del núcleo de la Tierra y otra es la aportación de la radiación del Sol. Esta última fuente, tiene un impacto menor, hay varios estudios que informan a escalas lejanas de décadas, variaciones de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$

Debido a lo anterior, se explicará el uso e importancia de la energía solar como energía renovable, con su principio fotovoltaico y abordará la utilización del silicio como metaloide semiconductor.

Asimismo, se abordará la geometría solar para la eficiencia y orientación del panel solar dependiendo de su ubicación en el planeta Tierra pues para cada ubicación, la incidencia del rayo solar será diferente.

El balance de energía en la Tierra esta conformado del rayo incidente y el reflectado, y en el transcurso de éste existirán diferentes tipos de radiación que el panel fotovoltaico podrá detectar y utilizar para generar energía. Por lo tanto, con el sol como principal fuente de

energía de nuestro planeta, es lógico que la naturaleza utilice esta energía en todos sus procesos biológicos y físicos. Los paneles fotovoltaicos incluyen células fotovoltaicas, que convierten eficientemente la radiación solar en energía eléctrica. Ante todos los problemas que ya se avecinan en un futuro próximo con otras fuentes de electricidad no renovables o menos eficientes, lo que paso a paso será conveniente pero más contundente es el uso intensivo de paneles solares para empresas y entidades estatales e incluso el sector residencial.

Justificación

En la actualidad la energía eléctrica y la producción de ésta, representan un reto por lo que las energías limpias son una opción para dar satisfacción a las necesidades del ser humano generando una mayor demanda de paneles fotovoltaicos. Con el crecimiento de ésta se busca una mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía solar, por lo que es necesario un análisis más detallado de la contribución radiativa con base en el comportamiento solar y en particular con la inversión magnética que presenta.

Objetivos.

1. Realizar una revisión histórica del comportamiento de la inversión magnética solar y su relación con la irradiancia que llega a la Tierra.
2. Análisis de las curvas características I-V de los paneles fotovoltaicos con base en la variación de irradiancia solar y temperatura histórica promediada a través de los años.
3. Calculo del impacto porcentual de dicha variación para paneles de silicio.

CAPITULO 1: El Sol

El Sol es la estrella central del sistema solar en el que se encuentra la Tierra, y está compuesta principalmente de Hidrogeno y Helio, la masa que éste aporta al sistema solar representa el 99.68% de la masa total del mismo (Foukal, 2004)

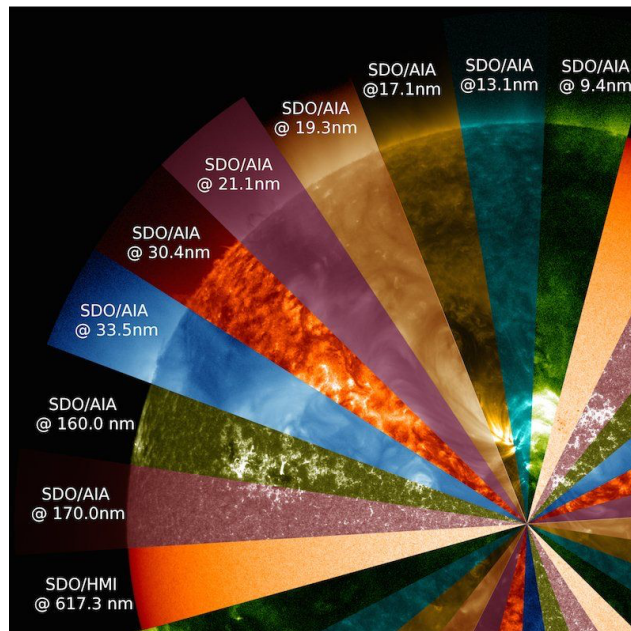


Fig. 1.1 El Sol con diferentes frecuencias.
(Solar Dinamic Observatory, 2019).

En el centro del Sol las condiciones de temperatura y presión pueden generar una fusión nuclear (Olindo, 2016). Para la reacción nuclear principal, existe una reacción protón-protón que a través de varios pasos cuatro de ellos reaccionan para producir:

- 1 núcleo de helio (dos protones y dos neutrones);
- 2 positrones (las antipartículas de los electrones);
- 2 neutrinos;
- radiación electromagnética.

El Sol tiene reacciones de fusión nuclear en su núcleo y para determinar las reacciones que se llevan a cabo en el núcleo de la estrella, los factores involucrados tienen relación

con la presencia en abundancia de las especies que reaccionan al igual que las probabilidades de reacción a grandes temperaturas como las que se encuentran en el núcleo del Sol (Sturrock et al., 1986). La reacción principal es la cadena protón-protón :



Esto sucede cuando cuatro de los protones del núcleo se fusionan para producir un helio y éste se libera en forma de radiación electromagnética, rayos gamma (γ), neutrinos y positrones .

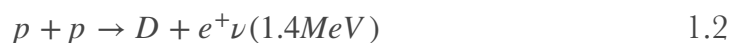
Los neutrinos al tener interacción prácticamente nula con el medio, estos escapan del núcleo del Sol y los fotones al viajar a la velocidad de la luz presentan múltiples procesos de absorción y liberación, todo esto en el núcleo solar; y para alcanzar la superficie del Sol a todos estos procesos les toman miles o millones de años.

Existen tres tipos de cadenas protón-protón que son (Stix,1990):

- PPI
- PPII
- PPIII

La producción de Helio a través del Hidrogeno, son resultado de estas tres cadenas de reacciones, pero en particular la cadena PPI es la que sucede en un mayor porcentaje de probabilidades y por esto el 85% por ciento de la energía producida por el Sol se le asocia a dicha cadena.

La cadena PPI tiene tres reacciones dentro de ese ciclo, en la primera de ella la reacción que se lleva a cabo son dos protones se fusionen para generar un deuterón, un positrón y un neutrino.



Para la segunda reacción o fase de este ciclo, el deuterón de la reacción inicial reacciona ahora con un protón formando así un núcleo de He^3 y un fotón.



En la tercera reacción ya han ocurrido 2 veces cada una de las dos reacciones anteriores por lo que dos núcleos de He^3 tienen una fusión que produce como resultado un núcleo de He^4 y un fotón se libera.



Durante la reacción se ha perdido masa, que se convierte en energía mediante la relación de energía y masa, descrita por Einstein $E = mc^2$. La reacción que se produce en la fusión esta dada por:



En las tres reacciones que se llevan acabo la cadena protón- protón PPI la masa que se encuentra de lado izquierdo excede a la masa que se encuentra de lado derecho, lo que genera que se realice una reacción exotérmica. El Sol tiene una estructura interna definida por capas, éstas se encuentran clasificadas de acuerdo al mecanismo por el cual transportan energía (Stix,1990).

En la Vía Láctea existen 200,000 millones de estrellas aproximadamente, donde el Sol forma parte de ese conjunto. Para los seres humanos, en el planeta Tierra, el Sol representa más que una estrella dentro de dicho conjunto pues es la estrella que

constituye el aporte energético principal para que la vida se desarrolle en éste. La edad del Sol se estima entre los 4500 y 5000 millones de años.

El Sol realiza un movimiento giratorio sobre sí mismo con una inclinación de 7° (grados), estos con respecto a la eclíptica, se le han asignado meridianos, un ecuador y paralelos para poder ubicar las marcas superficiales que puede tener durante el paso del tiempo.

Distancia a la Tierra	149 598 000 km
Tiempo que toma la luz en llegar a la Tierra	8.3 min
Temperatura superficial	5777 K°
Radio	696000 km (109 veces el tamaño de la Tierra)
Tipo espectral	G2
Velocidad Orbital	220 km/seg

Tabla 1. Propiedades físicas y termodinámicas del Sol.

1.1 El magnetismo y ciclo solar.

El magnetismo solar tiene ocurrencia en diferentes escalas. El Sol es el prototipo de una estrella magnética de secuencia principal con un amplio espectro de fenómenos magnéticos como regiones activas, prominencias magnéticas, coronas térmicas y ciclos activos. Este ciclo de 22 años de actividad magnética consta de dos ciclos consecutivos de manchas solares, donde tienen una duración de 11 años. La cercanía del Sol nos permite observarlo constantemente, la resolución espacial y temporal ha aumentado durante los últimos cuatro siglos (Barry y Chorley, 1992). El diagrama de la mariposa solar muestra el componente longitudinal medio de la línea de visión del campo magnético. Se observa claramente las ramas ecuatorial y polar de la actividad solar durante varios ciclos, e Inversión de polaridad de un ciclo de manchas solares a otro.

Algunas características de la variabilidad observada están asociadas con una presencia fuerte y constante del cambio que tiene el campo magnético. Sin duda, la presencia de regiones convectivas en superficies con comportamiento similar al de un fluido turbulento

y un fuerte magnetismo contribuyen a los cambios y dinámicas multi-escala observados así como el flujo de masa y radiación solar.

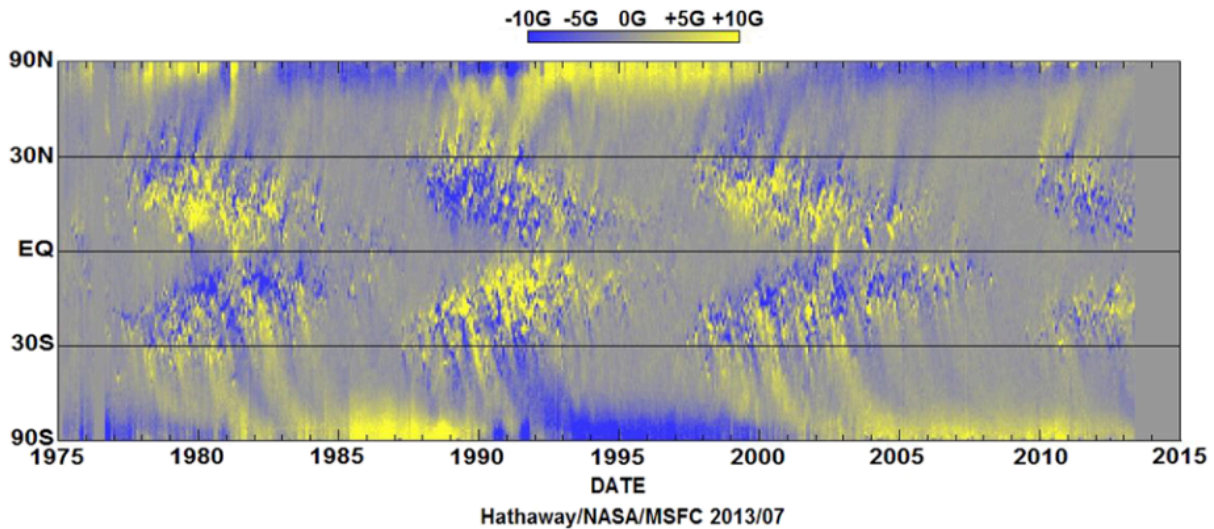


Fig 1.2 Diagrama de Mariposa (A. S. Brun,2013)

El Sol como la estrella mas cercana a nuestro planeta, tiene una actividad magnética que influye y afecta de manera fuerte en el entorno del planeta Tierra, esto a través, por ejemplo, de las tormentas geomagnéticas.

El Sol no es un cuerpo solido, es una esfera compuesta de gases comprimidos de manera gravitacional, por lo que cuenta con un periodo rotaciones diferencial, éste varia con su latitud, y tiene una duración de 25 días cercano al ecuador y 32 días en los polos. Para una escala de tiempo y espacio diferente, el campo magnético del Sol cuenta con un periodo de 11 años de actividad (Wells, 1999).

La configuración del campo magnético solar cuando es de un dipolo magnético, se denominada mínima actividad solar. Esta fase es caracterizada por tener los hoyos coronales o zonas de líneas abiertas en el campo magnético que se encuentran en los polos heliográficos; la figura 1.2 detalla un flujo integrado de campo polar, que muestra la asimetría Norte-Sur y el tiempo de retraso entre las reversiones, así como el promedio del periodo de tiempo ya mencionado. Se debe tener en cuenta que la inversión del casquete polar está casi completa (Shiota et al. 2012).

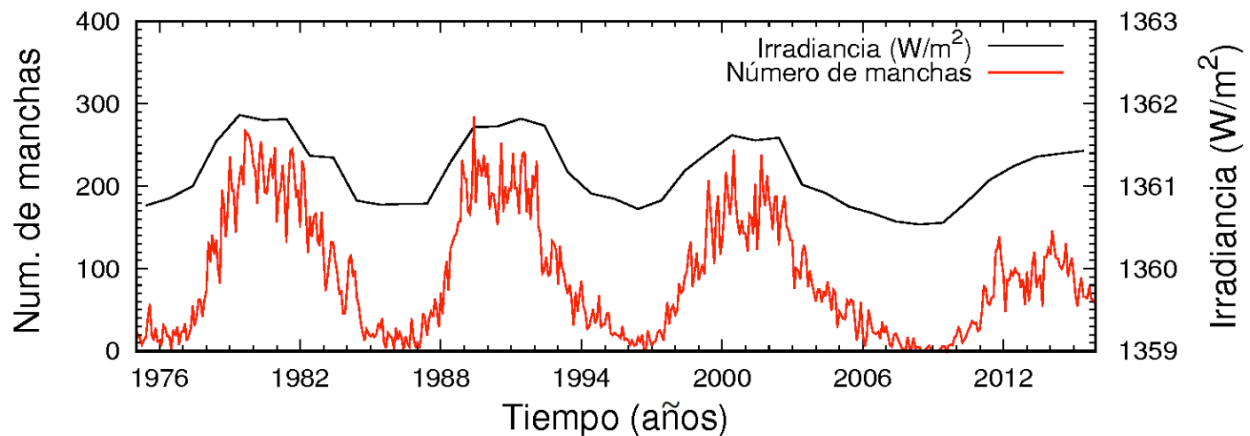


Fig.1.3 Irradiancia solar y manchas solares (Enriquez M. ,2018)

El tiempo secular es una variable en la escala de la luminosidad debido a que cuenta con una lenta evolución en las principales secuencias de la evolución estelar. Para la escala del tiempo que tiene el ser humano, la luminosidad del Sol se puede considerar constante y se encuentra en el valor aproximado de 1366 W/m^2 en la órbita del planeta Tierra. Estudios recientes han demostrado que ese valor constante, ha reducido a un valor de 1362 W/m^2 en la última década (Kopp y Lean 2011; Schmutz et al. 2012). La figura 1.3 muestra el comportamiento de la irradiancia que va de la mano con la aparición de manchas solares,

La Irradiación Solar Total, TSI por sus siglas en inglés, es por definición la radiación solar integrada a 1UA (UA, Unidad Astronómica es una unidad de longitud que equivale a la distancia media entre la Tierra y el Sol. $1\text{UA}=150 \times 10^6 \text{ km}$), la cual para energías y presupuestos de radiación en la Tierra es de gran importancia (Domingo et al. 2009)

1.2 Espectro electromagnético

La técnica de análisis de la luz se conoce como espectroscopia; estudia e investiga la longitud y frecuencia de la onda puede absorber o emitir una sustancia y se ve reflejado en un espectro denominado espectro electromagnético. Éste abarca desde los rayos gamma, rayos x, ultravioleta, infrarrojos hasta microondas. Sin embargo, cuando se habla

del espectro electromagnético que el ser humano logra ver, es una pequeña porción del mismo y éste se denomina espectro visible.

Esa pequeña porción visible, se logra identificar en los arcoíris y al mismo tiempo en éstos existen las frecuencias extra al rededor del violeta y el rojo que no logramos percibir como se muestra en la figura 1.4. El espectro electromagnético es continuo, pero existen diversas ocasiones en las que los colores de éste logran superponerse y figuran líneas oscuras o en su contrario más brillantes; esto debido a en esas ocasiones el espectro tiene falta de pureza. (Ktichin Chris, 2002)

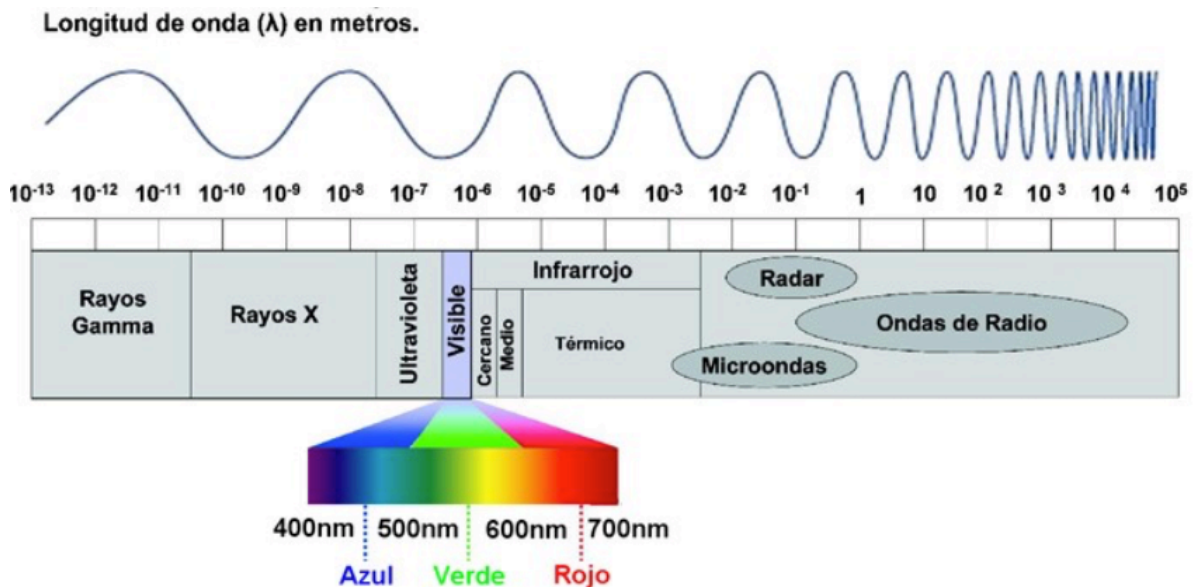


Fig 1.4 Las longitudes de onda que abarca el espectro electromagnético, sólo una parte es visible, este es conocido también como espectro de emisión continuo, los paneles solares buscan aprovechar (educarchile).

1.3 Distribución espectral de radiación solar.

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol, el cual se comporta como un cuerpo negro que tiene emisión de energía siguiendo la ley de

Planck con una aproximación de temperatura a los 6000 K (Bertotti and P. F. Arinella, 1990).

La intensidad de radiación emitida por un cuerpo negro en equilibrio termodinámico depende de la longitud de onda y de su temperatura que viene dada por la expresión:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5[\exp(\frac{ch}{k\lambda T}) - 1]} \quad 1.6$$

Donde:

$B_{\lambda}(T)$: Energía por unidad de superficie por unidad de tiempo y por unidad de intervalo de longitud de onda λ , en función de la temperatura, en unidades de W/m^3

T: Temperatura de la superficie del cuerpo, en unidades absolutas y grados Kelvin .

h: Constante de Planck con valor de $6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$

k: Constante de Boltzmann con valor de $1.38 \times 10^{-23} J/K$

λ : Longitud de onda en metros

c: Velocidad de la luz con un valor de $2.99 \times 10^8 m/s$

Cualquier cuerpo con una temperatura T emite radiación, la cual abarca un amplio rango de longitud de onda al no ser monocromática. El área bajo las curvas presentadas a continuación en la figura 1.5, representan la energía emitida, a mayor temperatura mayor energía emitida; al mismo tiempo la longitud de onda que existe en el pico de máxima intensidad disminuye conforme la temperatura aumenta

La mayor parte de la radiación solar se emite desde la fotosfera, ésta es opaca y fuertemente ionizada y por lo mismo puede absorber y emitir todo el espectro de radiación. En la figura 1.6 cada región corresponde a una fracción de la energía total incidente en la atmósfera superior (denominada radiación solar extraterrestre), distribuida de la siguiente manera: 7,2% ultravioleta, 47,2% visible y 45,6% infrarrojo cercano

La luz observada, denominada espectro visible, cubre sólo un pequeño intervalo del espectro electromagnético, que va de 0,4 mm a 0,7 mm, y muestra el rango de valores de

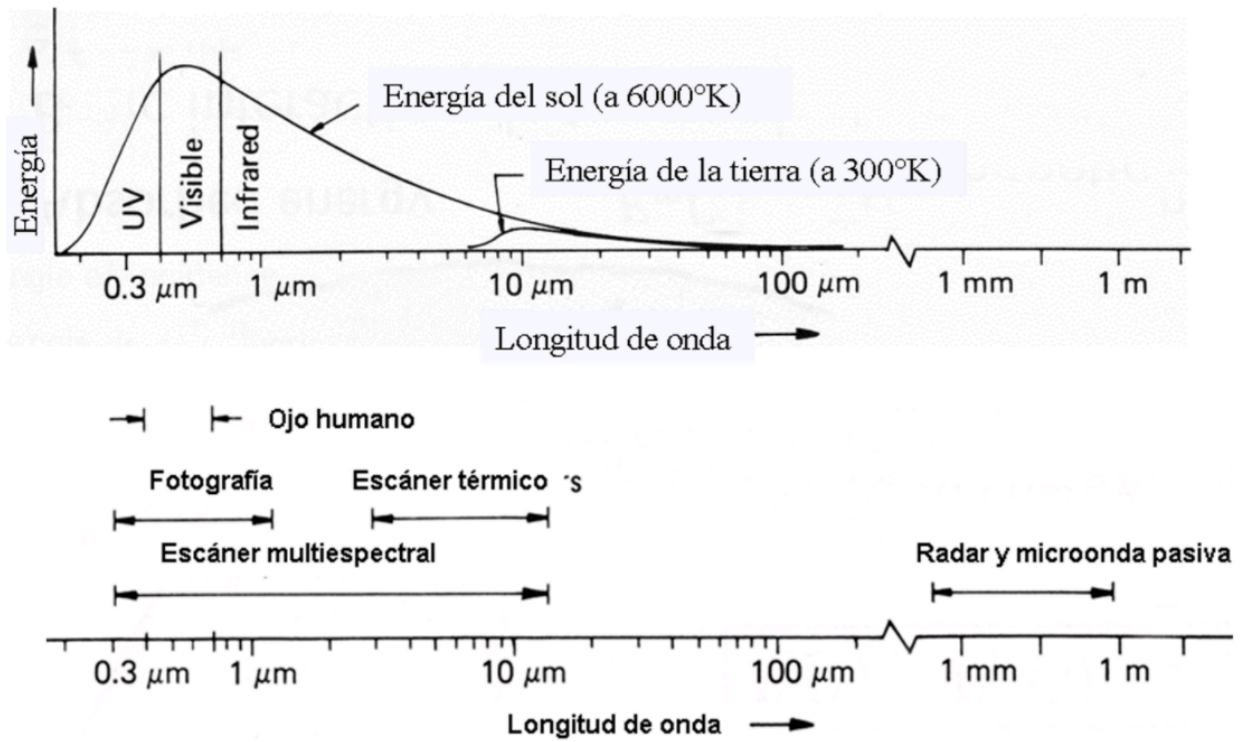


Fig. 1.6 Energía radiada por el Sol y la Tierra con su longitud de onda (IDEAM)

longitud de onda asociados con el color captado por el ojo humano. Por lo tanto, al considerar el rango de longitudes de onda que componen la energía solar, se puede determinar que está compuesta por ultravioleta (UV), luz visible y Infrarrojos (IR) (White H.1982).

Rango de longitud de onda [μm]	Valor medio [μm]	Color
0.38-0.43	0.41	Violeta
0.43-0.5	0.47	Azul
0.5-0.57	0.55	Verde
0.57-0.6	0.58	Amarillo
0.6-0.64	0.61	Naranja

Rango de longitud de onda [μm]	Valor medio [μm]	Color
0.64-0.77	0.66	Rojo

Tabla 2. Rangos de longitud de onda con definición de colores en micras(Alonso M, Finn E. Campos y Ondas).

Existen diferentes tipos de estándares de irradiancia según los reportes de la NASA medidos en masa de aire (AM) son:

- AM0 La radiación extraterrestre, aplicable a los satélites en espacio.
- AM1 La incidencia vertical de la luz solar en el ecuador a nivel del mar.
- AM1.5 La luz del sol que irradia a través de una masa de aire 1,5 veces mayor que el caso vertical. (J. Moreno, 2014)

Para la energía solar que tendrá una aplicación en la energía fotovoltaica, generalmente se usa AM 1.5 y se utiliza todo el rango del espectro solar, de 280 a 4000 nm, con una energía o valor promedio del fotón (APE) que se obtiene para el espectro estándar el valor del promedio de energía del fotón y éste se obtiene para el espectro estándar es de 1.60 eV, mientras que si se realiza el cálculo con los valores del espectro visible más el infrarrojo cercano (de 350 a 1050 nm) que es la parte del espectro donde hay mayor contribución de energía, el APE es de 1.88 eV. Este valor se reporta en la mayoría de las publicaciones (J. Moreno, 2014).

1.4 Radiación solar en México

Existen diferentes rangos para los espectros de radiación que recibimos del Sol, los cuales tienen efecto en procesos físicos y biológicos dentro de los ecosistemas que forman los diversos climas y biodiversidad. La radiación solar ultravioleta en su banda B o UVB, es una pequeña fracción del espectro electromagnético con un rango de longitudes de 0.280 a 0.320 micras, en el cual los fotones transportan energía para romper moléculas de

componentes que se encuentran en suspensión dentro de la atmósfera como el Ozono, el

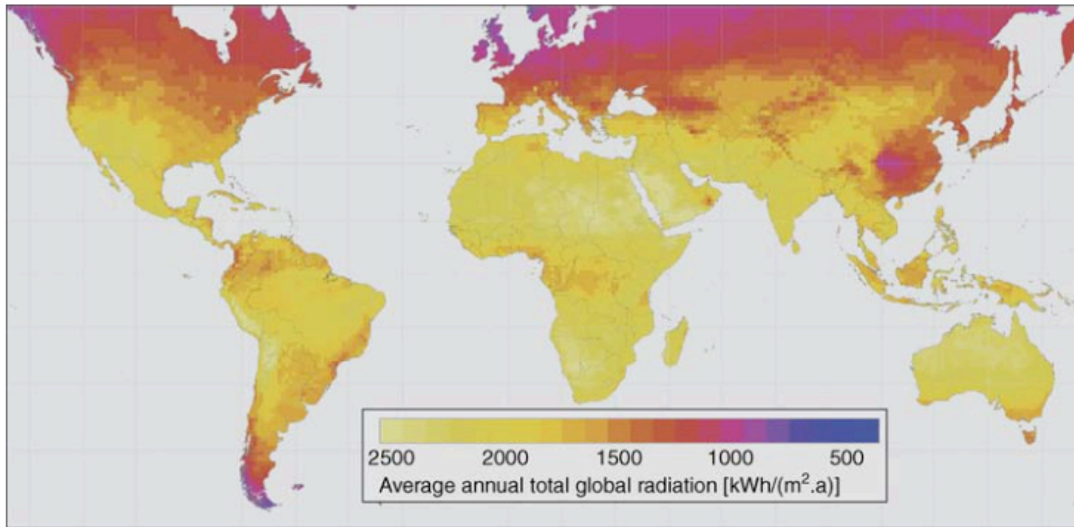


Fig. 1.7 Mapa de radiación anual en el mundo en kWh/ m^2 año

Dióxido de Carbono, Nitrógeno, etc.

Por lo mismo, la radiación ultravioleta esta relacionada con los procesos fotoquímicos que se llevan acabo en la superficie Terrestre y en la figura 1.7 se muestra como el promedio de la radiación en México de valores medios, lo que es ideal para la diversidad de climas y especies con los que cuenta éste.

Cuando el Sol está más alto en el cielo (en el cénit), la atmósfera bloquea alrededor del 77 % de los rayos UV del sol y la absorción aumenta en longitudes de onda UV más cortas. A nivel del suelo, con el sol en el cénit, la luz del sol es 44% luz visible, 3% ultravioleta y el resto infrarrojo (Peixoto y Oort, 1992).

La República Mexicana durante la temporada invernal recibe una irradiación solar que tiene los valores anuales más bajos en el norte con datos cercanos a los 2 a 2.5 kWh/ m^2 día y en el lado donde se encuentra el Golfo de México se tienen efectos frontales por época de invierno. En cambio, en el sur de la República Mexicana se encuentra ligeramente con aumentos en los valores conforme disminuye la latitud de la zona de estudio y se llegan a valores de manera temporal de 4.5 a 5 kWh/ m^2 día, dicha región sur esta comprendida por los estado de Oaxaca, Morelos, Michoacán, Guerrero, Puebla y

Chiapas. Asimismo en la temporada invernal, pero en la península de Yucatán se encuentran valores con cifras intermedias dentro del rango de 3.5 a 4.5 kWh/m²día como se muestra en la figura 1.8

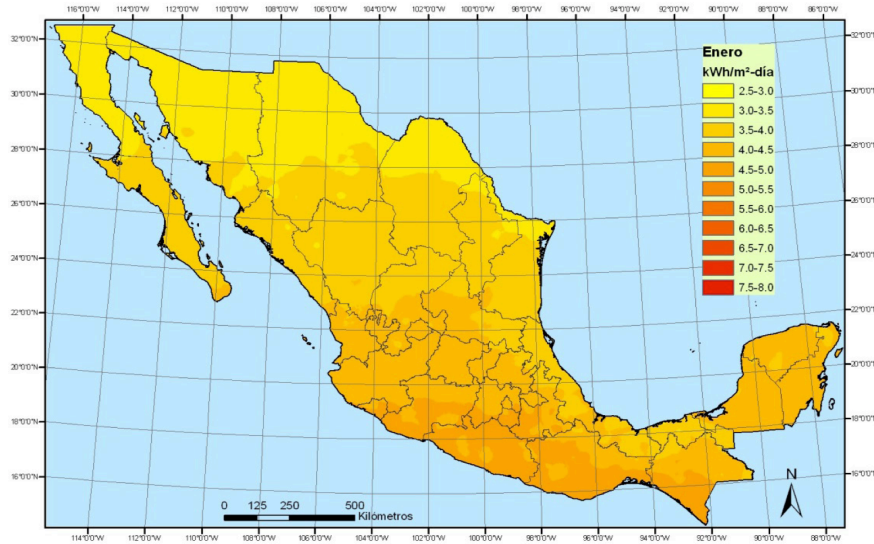


Fig.1.8. Irradiación solar global del mes de enero medida en kWh/m²día (A.Tejedra Martínez , G. Gómez Azpeitia 2015)

Posteriormente, se presenta un periodo comprendido entre los meses de enero y abril donde el aumento de irradiación global es mucho mas observable en todo el territorio nacional, dicho aumento se presenta con mayor intensidad en el área del noroeste de la República Mexicana con valores máximos de 7 kWh/m²día, después de esto el dato mayor es de 6 kWh/m²día en el resto del país. como se muestra en la figura 1.9

La figura 1.10, muestra la irradiación solar global anual, donde se observa la irradiación alta en la región noroeste de la República se debe a la semipermanencia del anticiclón del océano Pacífico y también ésta se ve disminuida en época de verano por la presencia se neblina y vientos alisios. En la vertiente del Golfo encontramos valores anuales bajos con datos de 5.5 a 6 kWh/m²día y esto se debe a los sistemas polares o bajas de presiones a baja escala y al aire marítimo tropical generado en el verano.



Fig. 1.9 Irradiación global en el mes de abril medida en kWh/m²día (A.Tejada Martinez , G. Gómez Azpeitia 2015)

La irradiación solar directa que se presenta en la República Mexicana en la época invernal cuenta con los valores bajos por la ubicación geográfica en donde se encuentra el paso de frentes fríos y vaguadas polares. Los valores de la irradiación directa en lugares

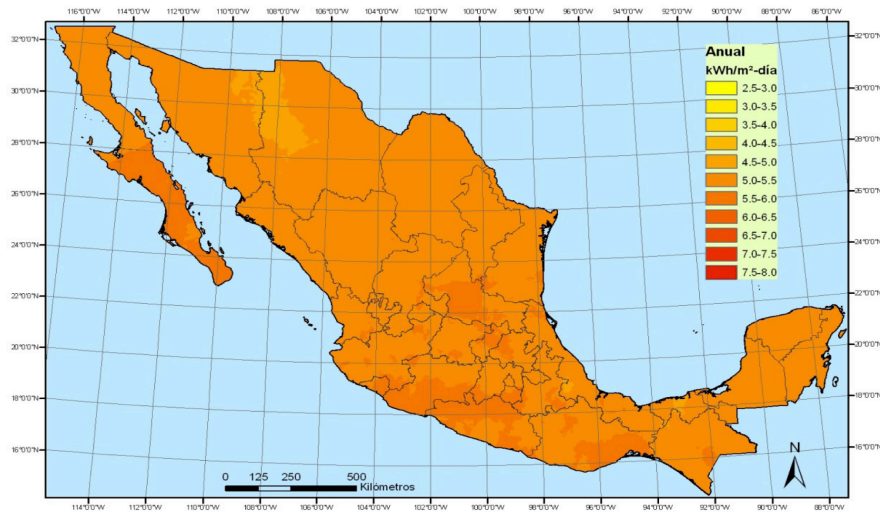


Fig. 1.10. Irradiación global anual medida en kWh/m²día (A.Tejada Martinez , G. Gómez Azpeitia 2015)

con latitudes mayores a 26°N tienen valores de 1.5 a 2 kWh/m²día como en el norte de Nuevo León o en el norte de Tamaulipas, en la mayor parte del estado de Veracruz y

Tabasco, en el lado de la sierra septentrional del estado de Chiapas sucede lo mismo. A la vez la irradiación que presenta el centro de la República Mexicana tiene valores de 2.3 a 3 kWh/m²día y tiene un aumento de un 0.5 kWh/m²día en los estados que se encuentran ubicados mas al sur del país como Colima, Michoacan, Guerrero, Ciudad de México, Puebla, Oaxaca y el sur de Chiapas como se muestra en la figura 1.11

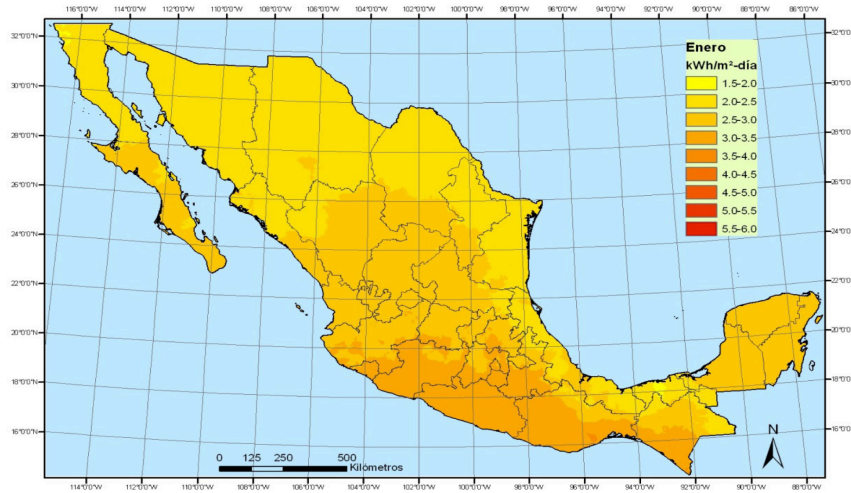


Fig 1.11 Muestra Irradiación directa en el mes de enero expresada en kWh/m²día (A.Tejada Martinez , G. Gómez Azpeitia 2015).



Fig. 1.12 Muestra la Irradiación directa en el mas de abril con datos en kWh/m²día (A.Tejada Martinez , G. Gómez Azpeitia 2015).

En la figura 1.12 se muestra como la irradiación directa como logra un alcance de 4 a 4.5 kWh/m²día en la superficie de la República Mexicana en la mayoría del territorio para el mes de abril . Los valores más altos con datos de 5 a 5.5 kWh/m² día los tienen los estados de Baja California Sur, Jalisco, Colima; Guerrero, Michoacán, Morelos, Occidente de Sonora, Sur de Sinaloa, Zacatecas, Guanajuato, Queretaro y Jalisco; mismo caso en el occidente y norte de la península de Yucatan por la influencia que tienen la inversión térmica en los vientos alisios.

La irradiación directa anual se muestra en la figura 1.13. Se observan los valores promedio elevados de 3.5 A 4 KWH/m²día debido a que durante el año existe el anticiclón semipermanente del Pacífico, la corriente en chorro y en general los sistemas frontales en los estados de Baja California y parte central del país.

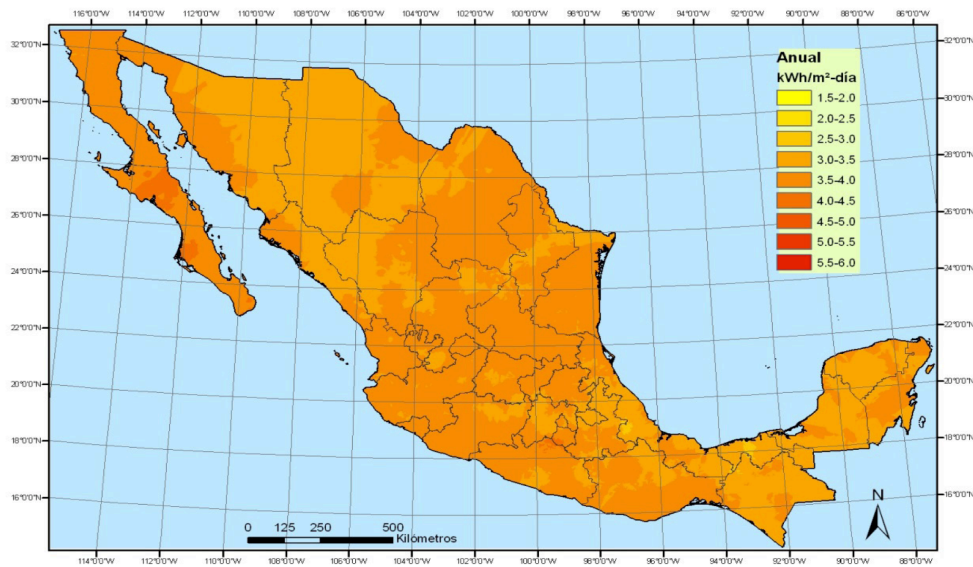


Fig. 1.13 Irradiación directa anual en kWh/m²día (A.Tejada Martinez , G. Gómez Azpeitia 2015).

Para la radiación solar difusa en el país durante el mes de enero, como se muestre en la figura 1.14 tiene valores bajos con un rango de 1 a 1.25 kWh/m²día para el norte del país, pero en el centro y sur cuenta con valores más altos con un rango de 1.75 a 2 kWh/m²día. Los valores mencionados son menores en comparación con el resto del año y esto

es debido a los frentes fríos frecuentes en esta temporada, principalmente en las vertientes del Golfo de México.



Fig.1.14 Difusa del mes de enero en $\text{kWh}/\text{m}^2\text{día}$ (A.Tejada Martinez , G. Gómez Azpeitia 2015).

La radiación difusa para el mes de junio presenta valores mucho mas altos en la zona occidental y una porción del sureste con un rango de 2.25 a 2.50 $\text{kWh}/\text{m}^2\text{día}$, al mismo

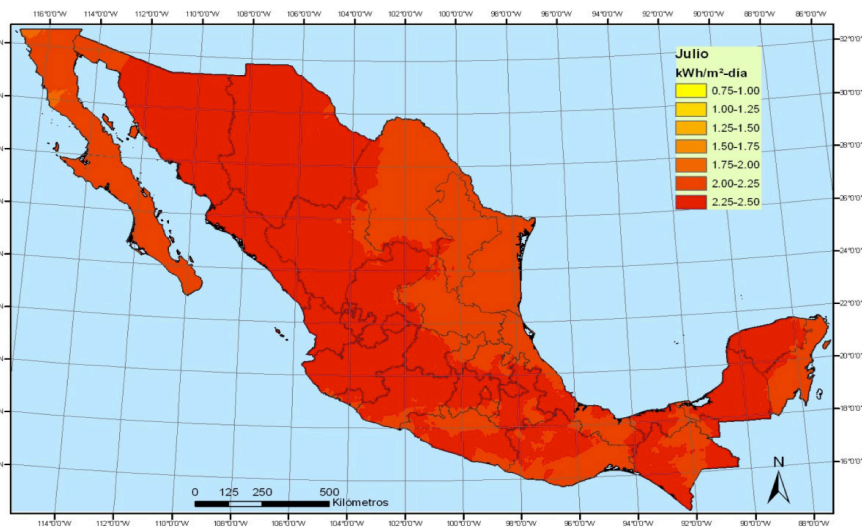


Fig.1.15 Difusa de junio en $\text{kWh}/\text{m}^2\text{día}$ (A.Tejada Martinez , G. Gómez Azpeitia 2015).

tiempo en la sierra madre occidental donde se presenta el barlovento de los vientos al sur de Oaxaca y Veracruz los valores disminuyen con rangos de 2 a 2.5 kWh/ m^2 día como se muestra en la figura 1.15

CAPITULO 2: Energía Solar

La energía es un concepto con muchas formas y definiciones, por lo que existen diferentes tipos de formas como lo son: energía gravitatoria, energía cinética, energía térmica, energía elástica, energía eléctrica, energía química, energía radiante, energía nuclear, energía de biomasa.

La sociedad moderna depende en gran medida de la capacidad de los seres humanos para convertir la energía de una forma a otra, los países más prósperos y tecnológicamente avanzados son también los que obtienen y consumen la mayor cantidad de energía per cápita, por lo mismo mucha gente considera que el mayor reto dentro del siglo XXI es el abordaje del tema energético. (Olindo, 2016).

El consumo energético proviene de la energía nuclear, combustibles fósiles y la geotermia; cualquier forma de calor se ha logrado convertir en energía aprovechable y finalmente la radiación es una de ellas. Hoy en día no existe una forma de cambiar totalmente la radiación solar que sea directa para el consumo humano y esto es debido a:

1. No existe máquina que logre la conversión eficiente de ésta.
2. La radiación tiene bajo contenido energético.
3. la energía solar no es constante, pues tiene variaciones diarias, estacionales, geográficas y propias del ciclo solar (J. Fricke, 2013).

Los recursos que están dentro de la clasificación como energéticos renovables, son afortunadamente abundantes en planeta Tierra. La energía solar recibida en 10 días en nuestro planeta equivale a las reservas de petróleo, gas y carbon (Estrada Gasca, C. A. 2013).

2. 1 Cinturón solar de la Tierra.

Los paralelos 40°N y 35°S definen el Cinturón solar, o franja solar, dentro de ésta se cuenta con la peculiaridad de albergar al 70% de la población mundial y esto de la mano con la recepción de energía solar en el planeta. México se encuentra dentro del Cinturón

solar y esto nos habla de un potencial de aprovechamiento en energía solar entre los más altos en el mundo.

El cinturón solar de la Tierra se encuentra entre ambos hemisferios a lo largo de 20 paralelos, lo que comprende en México el Desierto de Sonora, Desierto de Mojave en Estados Unidos de América, en África con el Desierto del Sahara y en dos de los desiertos de la península arábiga que son el Desierto de Namib y el Desierto de Kalahari; de igual manera encontramos al Desierto de Gobi dentro del territorio Chino y al Desierto del Oeste en Australia. En América sur Chile cuenta con el Desierto de Atacama en el norte de éste país (Bernardelli, 2010).

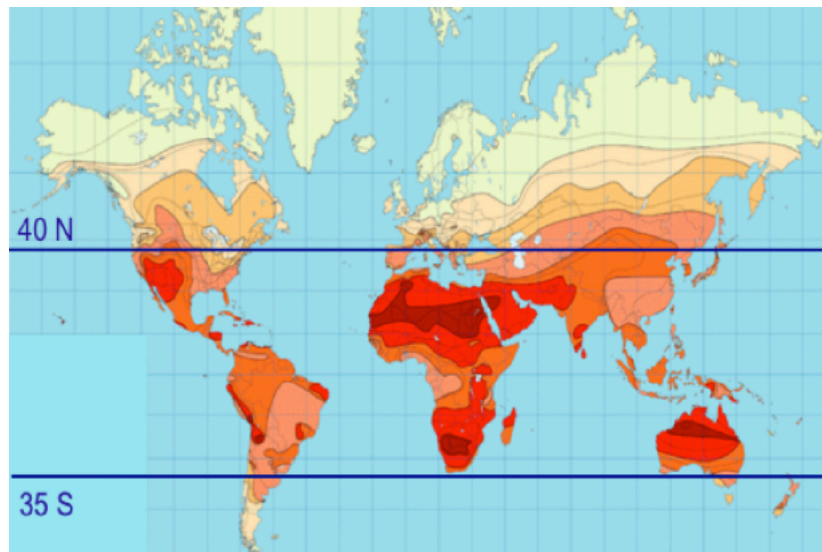


Fig. 2.1. Distribución de la energía solar en el mundo, kWh/m²/año (Instituto de Energías Renovables, UNAM).

La ubicación geográfica de México, como se muestra en la figura 2.1, y sus recursos solares de clase mundial lo convierten en uno de los países más atractivos del mundo para invertir en proyectos solares fotovoltaicos. De acuerdo con diferentes estudios, el potencial para desarrollar proyectos solares fotovoltaicos en México es muy atractivo, ya que el país se ubica en el llamado “cinturón solar”, con más de 5 kWh de radiación por metro cuadrado por día (Alemán Nava, et al., 2014).

2.2 Uso de la energía solar

El aprovechamiento de la energía solar tiene distintos tipos de dispositivos que dependen de la manera en que esta energía proviene:

Para la energía solar pasiva, no se necesitan sistemas mecánicos ya que la energía aprovecha el calor del Sol sin necesidad de tecnologías.

Los distintos tipos de aprovechamientos son observables en:

1. Energía solar fotovoltaica: aprovecha con base a la energía lumínica del Sol, la producción eléctrica mediante placas de semiconductores que se alteran con la radiación solar; estos sistemas se llaman Paneles Solares Fotovoltaicos (PFV)
2. Energía solar térmica: a través de la energía calórica del Sol, calienta algún tipo de fluido que sea de interés con baja temperatura, comúnmente observamos este tipo de energía aplicada al calentamiento del agua para uso sanitario y calefacción de piscinas. Este tipo de sistemas se denominan colectores solares.
3. Energía solar termoeléctrica: la energía hace que el aprovechamiento calórico tenga una aplicación directa en la generación eléctrica, esto se realiza través de un ciclo termodinámico convencional, durante éste, el fluido del sistema (aceite térmico) se calienta a alta temperatura.
4. Energía solar híbrida: se utiliza además de la energía solar otro tipo de energía, tal cual como su nombre lo dice se realiza una hibridación y dependiendo del tipo de combinación será clasificada dentro de:
 - Energía renovable
 - Energía fósil
5. Energía eólico solar: el aire calentado por el Sol, hará que los generadores giren en la parte superior de la chimenea, donde estos se ubican. (Medina M., 2010).

2.3 Capacidad instalada en México.

En la última década, la energía solar fotovoltaica se ha desarrollado rápidamente y está a punto de convertirse en una importante fuente de generación de electricidad en el mundo. Es una de las fuentes de energía más sostenibles, y se espera que el gas natural, el carbón, el petróleo y la energía nuclear proporcionen solo el 15 % de la energía mundial para 2100, mientras que la fotovoltaica proporcionará el 70 % (WEC 2013).

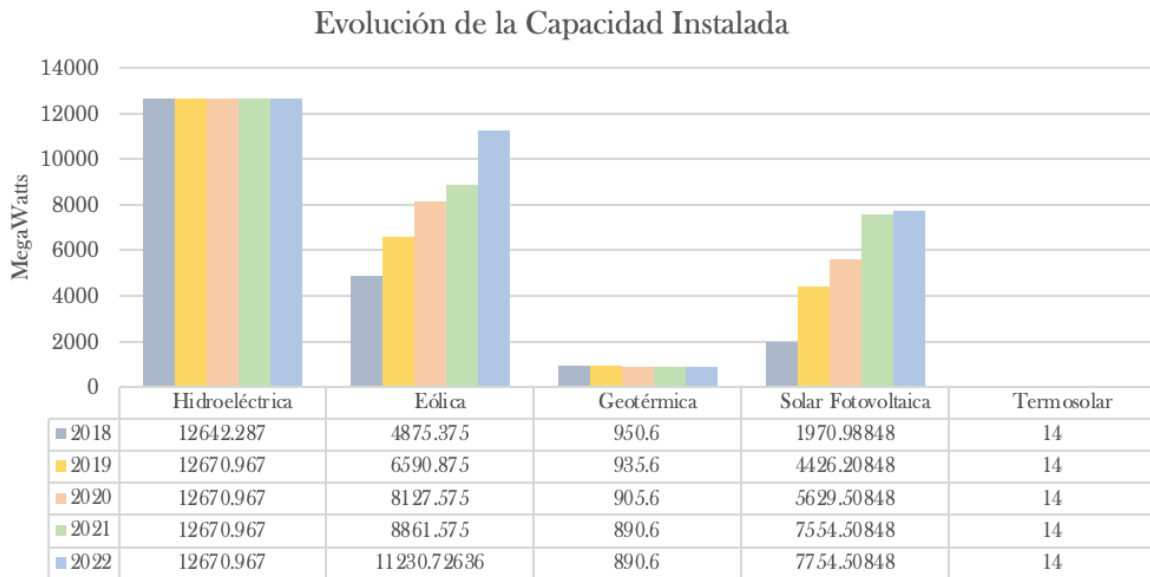


Tabla 2 Evolución de la capacidad a través del tiempo en México https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cveca=DIPS_SE_C33_ESP

La capacidad instalada en México con respecto a sistemas fotovoltaicos es de tan solo 8 MW de acuerdo a lo mostrado en la gráfica y tabla 2 (SENER), México tiene una amplia gama de capacidad solar y se considera uno de los países en una posición privilegiada para desarrollar este recurso su desarrollo ha tenido un crecimiento desde el año 2018 como se muestra en la tabla 2 con respecto a la energía hidroeléctrica .

Desde 2011, cuando se emitió el primer contrato de energía solar conectada a la red de pequeña escala y se puso en marcha la primera planta de energía fotovoltaica a una mayor magnitud, tanto la capacidad solar instalada como la generación de energía han aumentado (Rodríguez Suarez, 2017). Éste pasó de 18,5 MW y 8,8 GWh en 2007 a

170,24 MW y 190,26 GWh en 2015. Este crecimiento se vio reforzado por un aumento significativo en los contratos de interconexión tradicionales (pequeños a medianos), que han crecido significativamente desde 2010.

En México, al 2015 se reportaron nueve plantas de energía solar fotovoltaica, éstas son distribuidos en distintas áreas operativas: dos en Baja California, uno en Baja California Sur, uno en el Noroeste, 2 en el Norte, 2 en el Oeste, 1 en el Centro y el último en Mulegé (municipio de Mulegé, en el estado mexicano de Baja California Sur) (Gámez, et al., 2012). En conjunto, se logra contar una capacidad combinada de 56,0 MW y generan 78,0 GWh de electricidad como se muestra en la figura 2.2.

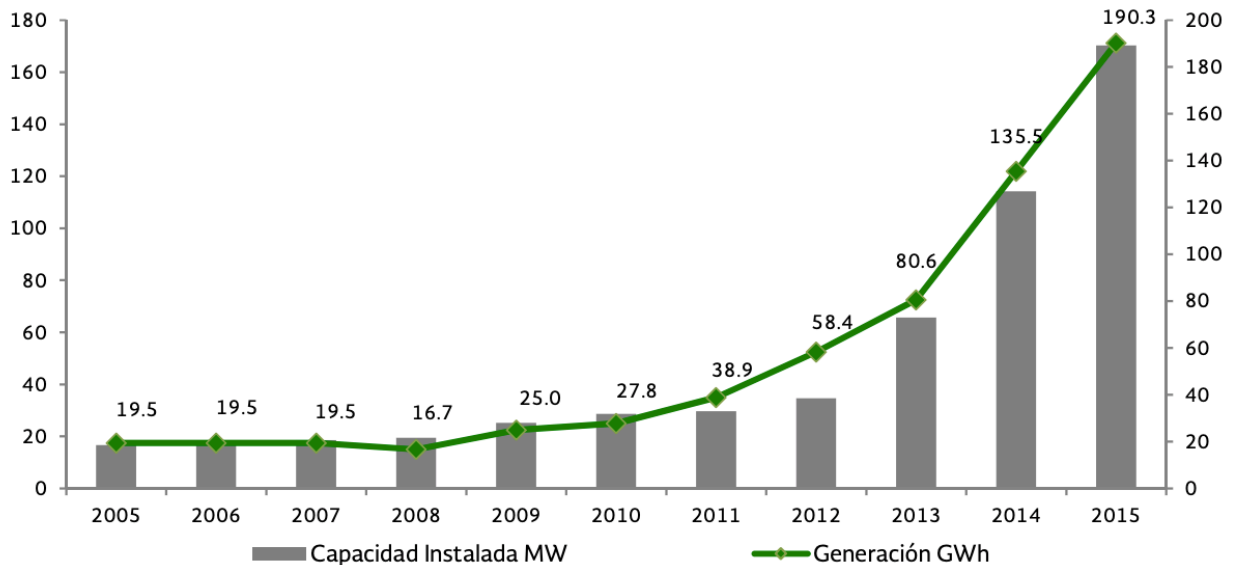


Fig. 2.2 Capacidad efectiva instalada y generación bruta en centrales solares fotovoltaicas del año 2005 al 2015 en MW y GWh (PRODESEN, 2017-2031)

El Plan de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2017 – 2031), toma que en México se cuenta con 17 plantas fotovoltaicas en operación, que representan menos del 1% de la capacidad instalada total del país y el 0.05% de la generación eléctrica de México en el año 2016. Además, el número de licencias de plantas fotovoltaicas concedidas en 2017 fue de 59. Mientras que las generadoras hidroeléctricas se cuenta con una producción de 96.97 petajoules para el año 2020, para los cuales

Existen un total de 731 centrales hidroeléctricas destinadas al servicio público de energía eléctrica y éstas se encuentran distribuidas en 16 estados de la República. Las principales centrales hidroeléctricas en el país son: El Novillo, Huites, Aguamilpa Solidaridad, El Cajón, Zimapán, Necaxa, Infiernillo, La Villita, Caracol, Temascal, Peñitas, Malpaso, Chicoasén y Angostura (SENER)

El uso de la energía solar para generar electricidad a través de la tecnología fotovoltaica se puede dividir en dos áreas principales: proyectos de generación de energía a gran escala y sistemas fotovoltaicos de tamaño pequeño y mediano, distribuidos en sitios de consumo.

Los proyectos solares de gran escala se desarrollan principalmente para satisfacer las necesidades energéticas de las empresas generadoras de energía como CFE y los grandes consumidores de energía como lo es el parque solar en Sonora que se muestra en la figura 2.3. El desarrollo de estos proyectos requiere de un ciclo de financiamiento más largo, el cual debe ser considerado al momento de planificar la expansión de todo el Sistema Eléctrico Nacional. Por otro lado, en sectores de consumo final como el residencial, comercial y MIPYME (Micro, Pequeñas y Medianas Empresas, término empleado en México por la Secretaria de Economía), se implementan aplicaciones de menor escala en forma de generación distribuida.



Fig. 2.3. Parque Solar en Sonora, México (SENER)

En la actualidad la energía solar para México tiene un gran potencial para el uso e implementación de generadores energéticos con recursos renovables, en los últimos años se ha dado un incremento crucial en la generación de energía de fuentes alternativas. La generación de Energía Limpia considera la generación Eoloeléctrica, Fotovoltaica-Solar, Bioenergía.

CAPITULO 3: Paneles fotovoltaicos.

El efecto fotovoltaico fue descubierto por primera vez en 1839 por el físico francés Alexandre Edmund Becquerel. Su investigación sobre el espectro solar, el magnetismo, la electricidad y la óptica es la columna vertebral científica de la energía fotovoltaica. La celda de Silicio que se usa actualmente, proviene de la patente del inventor estadounidense Russell Ohl, construida en 1940 y patentada en 1946. Más tarde, en 1954, Bell Labs fabricó la primera célula solar a partir de silicio cristalino con una eficiencia del 6 % (Lorenzo, 2007).

Las propiedades ópticas de los materiales cubren muchos aspectos de la interacción de la radiación con los materiales. Específicamente, se considera cuánta radiación absorbe el dispositivo como parámetro de rendimiento cuando éste es alimentado por energía solar. La absorbancia representa las propiedades ópticas del material fotovoltaico e indica cuánta radiación es absorbida a una longitud de onda determinada. Cada material absorberá al menos una pequeña cantidad de radiación y a mayor grosor, mayor absorbancia; pero no se puede crear un espesor infinitamente grueso y absorber la mayor radiación por lo que la absorbancia es la magnitud que nos permite que parte de la radiación sea capturada y con ello se busca la componente de optimización para equilibrar el transporte, la conductividad eléctrica y térmica, y realizar un dispositivo rentable y eficiente. (Mackay, 2005)

La cantidad de radiación real que llega a un punto geográfico de la Tierra, es extremadamente variable; la variación regular, diaria y anual está relacionada al movimiento aparente del Sol y por ello se deben tener en cuenta las variaciones causadas por las condiciones atmosféricas locales que son irregulares, como lo es la neblina o las nubes. Dichas condiciones influyen en los componentes directos y difusos particularmente.

La radiación solar cuenta con una componente directa, que es parte de la luz solar que llega a la superficie terrestre de manera directa; la dispersión de ésta, al mismo tiempo

tiene una componente llamada difusa; y por último el albedo puede presentarse dentro de la radiación solar total como una radiación de reflexión por la superficie de la Tierra o cualquier otra superficie cercana al punto de interés. La radiación total es el término que se le asocia a la radiación global y se compone con las tres componentes mencionadas.

Las celdas fotovoltaicas o celdas solares, son dispositivos electrónicos que convierten la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (flujo libre de electrones) a través del efecto fotoeléctrico, produciendo energía solar fotovoltaica. Está formado por materiales con efecto fotoeléctrico: absorben fotones y emiten electrones. Cuando estos electrones libres quedan atrapados, el resultado es una corriente eléctrica que se puede utilizar como energía para distintos objetivos.

Las células solares y los módulos fotovoltaicos son producidos por muchas empresas y laboratorios diferentes. Además, se investigan y venden muchas tecnologías diferentes de celdas solares. Por lo tanto, es crucial definir las condiciones que permitan comparar todas las diferentes células solares y módulos fotovoltaicos. Estas condiciones son condiciones de prueba estándar (STC) caracterizadas por una irradiación de 1000 Wm^2 , un espectro AM1.5 y una temperatura de celda de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. El espectro AM1.5 es la distribución espectral solar de referencia, tal y como se define en la norma internacional IEC 60904-3 (IEC 60904-3, 2008). El diseño del sistema fotovoltaico óptimo, se realiza con respecto a un lugar particular o específico ya que depende de la base de datos de insolación solar en el punto geográfico del proyecto. La irradiancia solar integrada durante el tiempo es la que se conoce como irradiación solar, ésta tiene una media anual diferente para cada región y en el cinturón solar puede llegar a tener un valor medio de 2200 kWh/m^2 . (Olindo, 2016)

La generación de energía eléctrica fotovoltaica (PV) tiene distintas aplicaciones, se encuentran satélites espaciales y estaciones de órbita, fuentes de energía para cargas en una ubicación remota y hasta centrales eléctricas. Aprovecha la radiación del Sol como una forma de generación eléctrica sin emisión de gases nocivos para el medio ambiente. (Imene Yahyaoui, 2018)

3.1 Principio fotovoltaico.

Un panel solar o celda fotovoltaica como su nombre lo dice, se basa en el efecto fotovoltaico, es decir, en una generación de diferencia de potencial en la unión de dos materiales distintos en una respuesta electromagnética. El efecto fotovoltaico tiene una relación directa con el efecto fotoeléctrico. En éste efecto se tiene un material que ha absorbido luz y emite electrones con una frecuencia superior a la frecuencia umbral definida como la mínima frecuencia de luz incidente sobre la superficie de un material. En el año de 1905, Albert Einstein logró explicar este fenómeno asumiendo que la luz consiste en fotones y la energía de éste esta dada por (Lorenzo, 2007):

$$E = h\nu \quad 3.1$$

h: Constante de Plank ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

v: Frecuencia de la luz

Posteriormente, varios experimentos demostraron que las partículas atómicas, incluidos los fotones, pueden exhibir patrones de interferencia y difracción, características que corresponden a ondas en lugar de partículas. Sin embargo, a finales de los años veinte, la mecánica cuántica dio la teoría de cómo la luz tiene manifestaciones de partículas y ondas, es decir, tiene una naturaleza dual, estos dos conceptos no se pueden descartar. La luz aparece como una onda o una partícula, según el instrumento utilizado para analizarla (Butti, 1980).

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se ilumina con una corriente de fotones (Delgado A., 2008). La superficie de dicho material se ilumina y con cualquier tipo de fotones éste logra emitir únicamente electrones. Teniendo la variabilidad de efectos con respecto al material, pues siendo éste un material con exceso de electrones los perderá o en un caso donde el material tenga un estado neutro perderá los electrones que tiene el átomo en estado normal. Cuando el material

está cargado positivamente éste no emitirá nada por defecto de electrones. El estado fotoeléctrico demuestra que no existen cargas positivas o negativas solamente cuerpos con exceso o déficit de electrones.

Las celdas fotovoltaicas son actualmente de silicio debido a que es el material más utilizado en la industria energética solar; la aplicación de éste como semiconductor consiste en dos capas que se formaron previamente en un proceso conocido como “dopaje”, lo que generará el flujo de electrones (Schmalesee, 2015). El dopaje es la introducción de átomos extraños, que generan una unión p-n en la celda que genera un campo eléctrico en el cristal. La luz incidente que llega a la celda solar hace que los portadores de carga se logren disolver fuera de los enlaces de cristal y que estos tengan un movimiento por el campo eléctrico a los componentes exteriores. Los contactos de las celdas solares tendrán como resultado la creación de una tensión la cual será aproximadamente de 0.5 V 0.5V (Dubey et al., 2013). La corriente liberada va vinculada con la radiación y el área de la celda pero en un rango común se encuentran entre 0 y 10 A. Para lograr voltajes utilizables en el rango de 20 a 50 V, muchas celdas se conectan en serie en un módulo solar. Además de esto, las células solares de los módulos están mecánicamente protegidas y selladas contra influencias ambientales como la intrusión de humedad.

El silicio, es un material semiconductor que se utiliza para otras cosas entre ellas, transistores, diodos y chips de computadoras.

La absorción tiene lugar dentro de la región de carga espacial. El campo que prevalece en la región de carga espacial separa el par electrón-hueco generado y conduce a los dos portadores de carga en diferentes direcciones. El electrón se mueve a la región n y de allí al contacto negativo de la celda solar. El agujero se mueve en la dirección opuesta.

La iluminación que produce el fotón incidente crea agujeros en pares de electrones para la región de carga espacial y ésta se desplazará generando una corriente fotoeléctrica en la dirección de polarización inversa (D. A. Neaman, 2012), como lo muestra la figura 3.1.

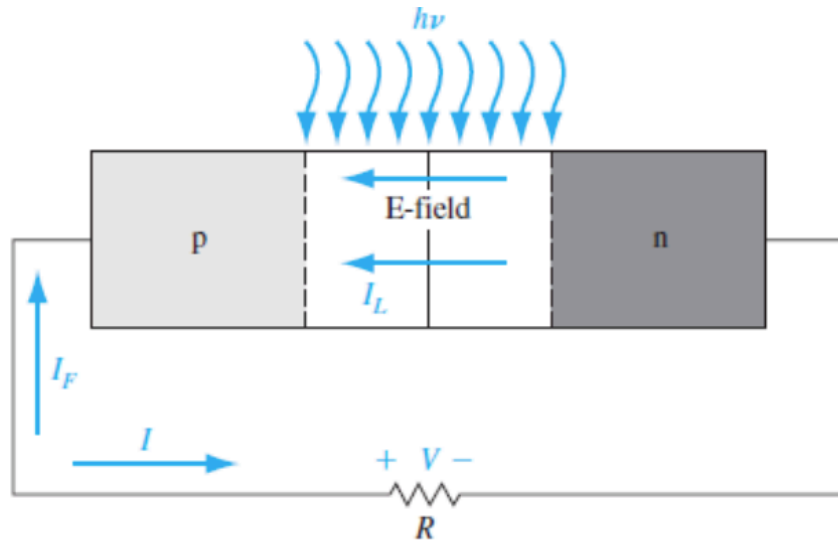


Fig. 3.1 Diagrama de la unión p-n simple para una celda solar asumiendo una resistencia de carga (Mertens, 2014).

La curva I-V hace referencia al funcionamiento del panel solar fotovoltaico, ya que es la representación gráfica de la función característica que muestra la corriente que el panel proporciona en función del voltaje. Esta gráfica muestra los posibles valores de voltaje y corriente, éstos a su vez dependen de una irradiancia solar y una temperatura recibida por el la celda solar. La curva característica I-V resulta de la variación de carga que se encuentre en los bornes del panel obteniendo valores de voltaje en [v] y corriente [I]. El producto de dichos valores nos entrega la potencia que entrega el panel solar.

La curva I-V para una celda solar es la superposición de una curva característica I-V del diodo de las celdas solares, pero aplicado a la oscuridad (F. A. Lindholm, Fossum, J. G., et al., 1979). La luz hace que la curva se desplace por los diferentes cuadrantes de una gráfica donde se puede extraer energía del diodo. Iluminar una celda se suma a las corrientes "oscuras" normales en el diodo, de modo que la ley del diodo se vuelve

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L \quad 3.2$$

Donde :

I_L : Corriente generada por la luz .

I_0 : Corriente de saturación oscura.

n: Factor ideal.

T: Temperatura en K

V: Voltaje

La ecuación para la curva IV en el primer cuadrante es:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad 3.3$$

Para cada valor de radiación y temperatura, la energía generada a partir de PV es variable con su voltaje terminal. La figura 3.2 indica los valores de voltaje y corriente de un panel fotovoltaico típico bajo ciertas condiciones de luz solar y temperatura, que se obtienen a través de mediciones experimentales.

Cambiando la resistencia externa de cero a infinito, se pueden medir varios valores del par (i-V), formando una curva característica por interpolación con la ecuación 3.3.

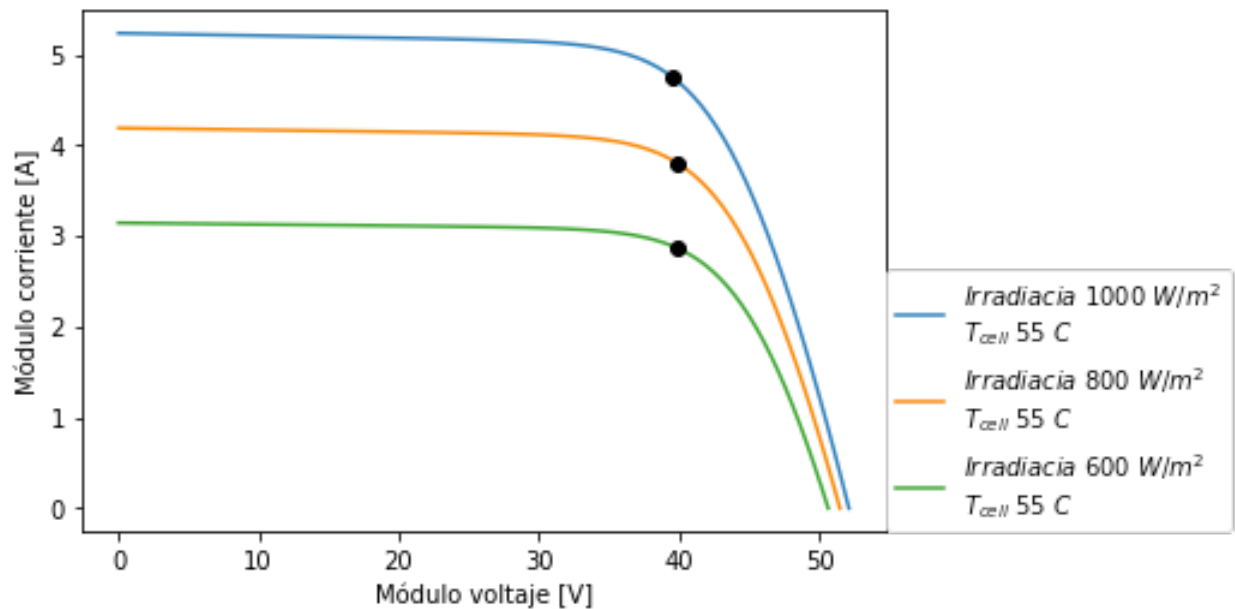


Fig. 3.2 Representación gráfica de la curva I-V con temperatura de 55°C y irradiancias variables.

La radiación solar incidente real, se le conoce como la insolación y ésta es la potencia solar incidente por unidad en un lugar determinado y varía según (Imene Yahyaoui., 2018):

1. Posición en la Tierra, debido a la inclinación del eje de rotación de la Tierra.
2. Tiempo debido a la rotación de la Tierra.
3. Como la tierra gira alrededor del sol, los meses del año.
4. Ángulo de incidencia.
5. Presencia e impacto ambiental de nubes en masas de aire.

En un sistema fotovoltaico que incluye baterías, las propias baterías son la carga del sistema, por lo tanto, la corriente requerida es la corriente nominal de carga de las baterías. Básicamente, las células solares se pueden combinar para cumplir con una amplia gama de requisitos de carga en términos de corriente, voltaje y potencia. Los parques solares se subdividen en conjuntos más pequeños llamados paneles solares, que se componen de módulos. Luego de esa construcción se genera una gran matriz desde el módulo. En las condiciones de prueba estándar de AM1, los módulos suelen tener una potencia nominal de 12 V, 6 A y 72 W. Dado que cada celda contribuye con una salida de 0,5 V, y para ello se deben conectar al menos 24 celdas en serie para obtener 12 V. Dado que las celdas solares tienen que impulsar la carga incluso cuando la radiación solar es inferior a AM1, el módulo contiene de forma fiable 36 células en lugar de 24 células.

El módulo que tienen las celdas solares es una matriz unitaria que se encuentra en el generador fotovoltaico. Éste consiste en celdas solares conectadas que se encuentran conectadas en serie para la construcción de la fuerza motriz y en paralelo para suministrar la corriente que se requiere en el sistema.

3.2 Tipos de paneles fotovoltaicos y tecnología en celdas.

En la actualidad ya existen tres tipos de tecnologías para los paneles solares que dominan el mercado mundial: silicio monocristalino, silicio policristalino y película fina. Dichas tecnologías para la producción de energía fotovoltaica utilizan arsenurio de galio y células de union múltiple, pero son menos comunes dentro del mercado debido a su alto costo sin embargo son mayormente recomendables para sistemas fotovoltaicos de alta concentración y para uso en aplicaciones satelitales o espaciales. (Gul, Kotak, & Muneer, 2016)

- Paneles de silicio.

El punto de partida de las células solares es el silicio (del latín silicia: suelo de grava). Después del oxígeno, es el segundo elemento más común en la Tierra. Sin embargo, casi nunca se presenta en forma pura en la naturaleza, sino principalmente en forma de sílice (arena de cuarzo). Entonces, el Silicio en el verdadero sentido es como la arena en una playa.

El Silicio se reduce primero en un horno de arco eléctrico con carbón y energía eléctrica añadida a una temperatura de aproximadamente 1800 °C.

Para la obtención del grado metalúrgico del silicio, se necesita la siguiente reacción:



Llamado así (Grado Metalúrgico: MG-Si) porque cuenta con una pureza del 98% y es una designación que se utiliza en la producción del acero. Para el uso del silicio en las celdas solares, se realiza una limpieza compleja al MG-Si . El proceso de silano, se genera una mezcla de el silicio finamente molido dentro de un reactor de lecho fluidizado ácido clorhídrico (cloruro de hidrógeno, HCl). En una reacción exotérmica esto resulta en triclorosilano ($SiHCl_3$) e hidrógeno.

El triclorosilano tiene una mayor limpieza mediante una destilación repetida, en el que se busca su punto de ebullición el cual es de 31.8°C. En el reactor (*Siemens Reactor*) se recupera el silicio, en éste el triclorosilano gaseoso con hidrogeno a través de una varilla de silicio alimenta con una temperatura de 1350 °C; en la barra el silicio se separa como poli silicio de pureza alta otorgando como resultado varillas de 30 centímetros de diámetro y 2 metros de longitud.

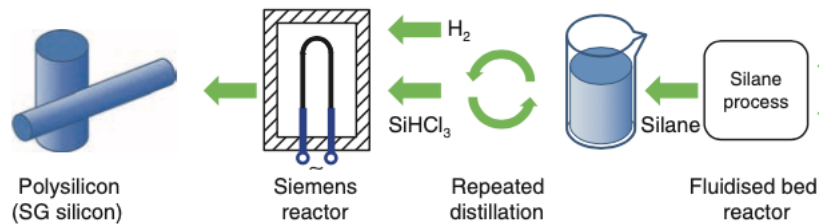


Fig. 3.3 Procesos de Reactor Siemens del silicio . (Mertens, 2014).

La pureza que debe tener el poli silicio es de 99.99% o designación 5N , para lograr ser llamado Silicio de grado solar (SG-Si). En el proceso de el rector Siemens, se realiza un consumo alto de energía, por lo tanto la búsqueda de nuevas alternativas para la limpieza del Silicio ha tenido un trayecto largo durante años. El Silicio tiene una posibilidad de separación con un rector fluidizado que asegura una continuidad con pureza, con una tasa de producción mas alta y un menor uso de energía hasta en un 70% que el reactor Siemens, aunque el procedimiento requiere personal especializado y con experiencia pues resulta más difícil.

La promesa de una producción de silicio directamente purificado (Mejora de Grado Metalúrgico: UMG-Si), para el que actualmente existen distintas versiones. Para la producción de silicio UMG requiere sólo aproximadamente la mitad del esfuerzo energético del proceso de Siemens. Sin embargo, la pureza deseada aún no se acerca a la alcanzada por el proceso de Siemens (Sollmann, 2009).

- Paneles de Silicio monocristalino.

La producción del silicio monocristalino se realiza a través de un proceso llamado Czochralski o proceso CZ, en éste se funden piezas de polisilicio en un crisol da 1450 °C y se sumerge un cristal semilla que se encuentra fijado a una barra de metal, en la masa fundida. Posteriormente, con una ligera rotación se procede a retirar de forma ascendente y es donde el silicio fluido se adhiere a éste y se cristaliza. Consecuentemente tiene como resultado de un lingote de Silicio monocristalino con un espesor es ajustable con respecto a la temperatura y la velocidad de extracción que pueden ser variantes.

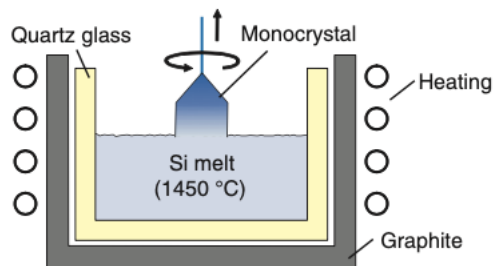


Fig. 3.4 Adherencia del silicio monocristalino (Mertens, 2014).

Con este método se pueden producir varillas con un diámetro de hasta 30 cm y una longitud de hasta 2 m. Para la energía fotovoltaica, el diámetro suele ser de 5 a 6 pulgadas (12,5 a 15 cm).

De requerirse una calidad mayor en el cristal, se realiza un proceso llamado Float-zone o proceso FZ, en lugar del proceso CZ. Aquí se tiene que realizar la colocación de un cristal semilla debajo de una barra de Polisilicio que se encuentra colgado de manera vertical para posteriormente con una bobina de inducción y empuje, lentamente en dirección de abajo hacia arriba sobre la misma barra. Para este caso, el Silicio solo se funde en la zona de inducción, por lo que la formación del monocristal se presenta de abajo hacia arriba .

En el proceso CZ los contaminantes que pueden existir son impulsados hacia arriba con la masa fundida en la cristalización, esto logra una calidad de cristal particularmente alta. Sin embargo, para la realización de un FZ-Si existe un aumento en los costos de manera

significativa que realizando un CZ-Si y por lo mismo, este monocristal es usado para energía fotovoltaica en casos o circunstancias muy excepcionales.

- Paneles de silicio Policristalino

La producción de un silicio Policristalino se realiza de una manera más sencilla. Se realiza un vertido de las piezas de Polisilicio en un crisol de grafito y en éste se funden con calentamiento por inducción. Posteriormente, jalando el anillo calefactor en dirección hacia arriba, se busca el enfriamiento de abajo hacia arriba. Se busca, que generando el enfriamiento de manera vertical, los cristales se coloquen y crezcan hacia arriba en columnas y esto es conocido como crecimiento columnar. En las capas límite existen desplazamientos de los cristales y éstos se hacen centros de recombinación en la celda fotovoltaica; la recombinación es asociada a la vida útil de una celda solar. Por esta razón, el tamaño de los monocristales es de suma importancia y se busca que sean del mayor tamaño posible.

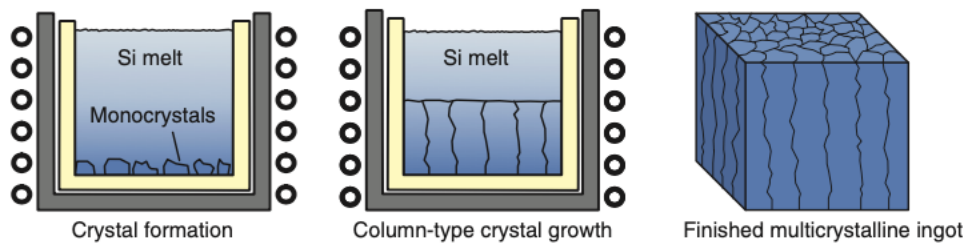


Fig. 3.5 Formación de los lingotes (Mertens, 2014).

Después de la cristalización de todo el fundido, el bloque de silicio se divide en cubos (lingotes) de 5 o 6 pulgadas a lo largo de los bordes. Pero debido a la calidad pobre que existe en el material de silicio Policristalino, la eficiencia de las células solares fabricadas con este material suele ser entre un 2 y un 3 % inferior a la de las células solares monocristalinas.

- Paneles solares de Silicio amorfo (hidrogenado) o capa fina.

Los semiconductores directos tienen coeficientes de absorción extremadamente altos. Con ellos, la luz solar puede ser absorbida en "células de película delgada" de una micra (Podewils, 2009). El material de película delgada más famoso es el silicio amorfo y para la producción de celdas de película delgada a-Si, se utiliza un depósito químico de vapor mejorado con plasma (PECVD).

Los gases iniciales Silano (SiH_4) e Hidrogeno (H_2) con una temperatura de aproximadamente $200^\circ C$ fluyen ambos para entrar en un campo de alta frecuencia. Esto generando que los electrones individuales se aceleren y se separan las moléculas de los gases de partida mediante ionización por impacto en sus partes constituyentes (SiH_3^+ , etc).

Las partículas cargadas forman como resultado un plasma que contiene iones altamente reactivos, que reaccionan con la superficie que se usa como sustrato y se depositan en él como se muestra en la figura 3.6.

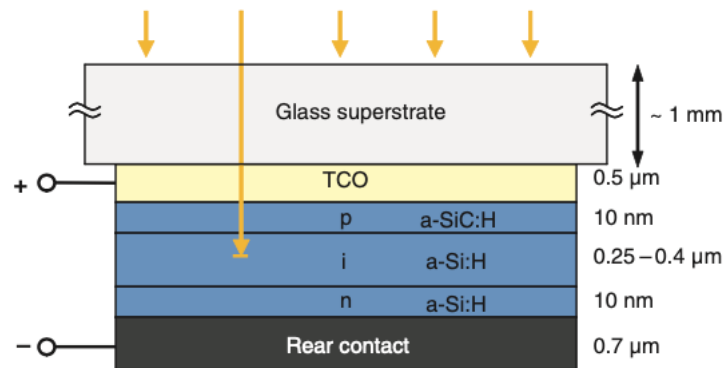


Fig. 3.6 Deposito de la capa de silicio. (K. Mertens 2014).

Esta capa de a-Si:H continúa creciendo con la adición adicional de los dos gases de proceso. El proceso también funcionaría sin la mejora del plasma (deposición normal en fase gaseosa - CVD), pero entonces se requerirían temperaturas de más de $450^\circ C$ para

romper los gases iniciales y esto limitaría fuertemente la selección de materiales de sustrato.

Las tasas de depósito típicas están en la región de 0,2 nm/s. La producción de una capa de a-Si:H de 0,5 mm de espesor lleva unos 40 min. Este tiempo es realmente demasiado largo para la producción en masa; deseable sería una reducción por un factor de 10. Hay muchos procesos nuevos prometedores disponibles para esto (e.g. PECVD de muy alta frecuencia y CVD de alambre caliente) con altas tasas de deposición, que, sin embargo, a menudo aumentan el número de defectos en el a-Si:H (Repmann, 2003).

Pese a sus desventajas como una absorción baja que incrementa los espesores y con ellos los costos y un ancho de banda de 1,12 eV no ideal, se tiene la teoría que con materiales de mayor ancho de banda se consiguen mayores eficiencias.

3.3 Eficiencia y orientación

La importancia de tomar en cuenta la radiación solar en las regiones extraterrestres es por la dirección que tiene de una manera determinada a la terrestre. La atenuación atmosférica ocurre cuando la radiación viaja a través de una atmósfera compuesta por gases de efecto invernadero. La cantidad de atenuación está determinada por la calidad del aire. La masa de aire es la relación entre el camino que recorre la radiación solar a través de la atmósfera y la masa que recorre la radiación solar cuando el Sol está en el cenit (Figura 3.7). Para el mediodía, la relación es uniforme. Valores más altos de calidad del aire significan una menor atenuación. Una expresión que relaciona la masa de aire y su ángulo de incidencia con la superficie terrestre es:

$$Masa\ aire(m) = \frac{AB}{AC} \quad 3.5$$

Para los mismos efectos : $= \frac{m_o}{H_o} = sec\theta_z = \frac{1}{cos\theta_z}$ para un $\theta_z \leq 0$

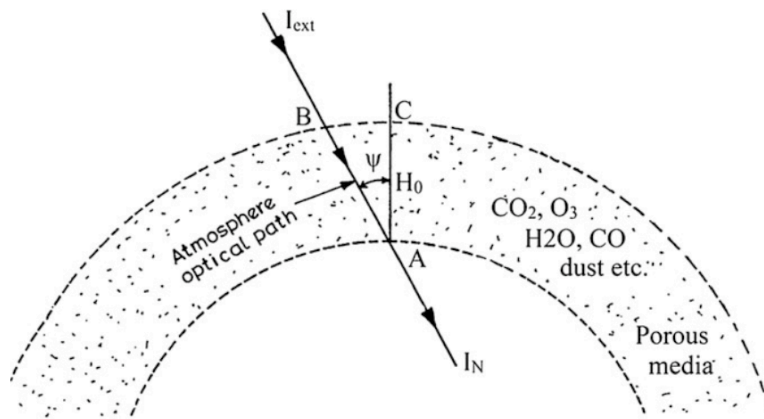


Fig3.7 Diagrama de cuerpo libre de un rayo de sol que atraviesa la atmósfera e incide en la superficie terrestre (G. N Tiwari , A. Tiwari 2016).

Posteriormente Kasten (1989), propuso una expresión modificada para el calculo de la masa de aire con la siguiente forma:

$$m = [\cos\theta_z + 0.15 \cdot (93.885 - \theta_z)^{1.253}]^{-1} \quad 3.6$$

Al pasar por la región extraterrestre a la terrestre, la radiación solar sufre de unas perdidas llamadas de dispersión y absorción atmosférica. Después de dicha absorción que sucedió en la atmósfera, la irradiancia solar normal, también conocida como la tasa de flujo solar normal que recibe la superficie terrestre se determina a través de:

$$I_N = I_{ext} \cdot \exp[-(m \cdot \varepsilon \cdot T_R + \alpha)] \quad 3.7$$

Donde:

m: Masa de aire dada por su expresión.

T_R : Factor de turbidez o factor de neblina para una atmósfera concentrada.

ϵ : Espesor óptico integrado de la atmósfera terrestre clara y seca/atmósfera de Rayleigh (adimensional), viene dada por la siguiente ecuación:

$$\epsilon = 4.529 \times 10^{-4} \cdot m^2 - 9.66866 \times 10^{-3} \cdot m + 0.108014 \quad 3.8$$

α : Parametros atmosféricos agrupados. Éstos se adaptan a una mayor atenuación de la irradiación normal directa en la zona terrestre debido al nivel de nubosidad y neblina, el comportamiento anisotrópico y los cambios impredecibles en las condiciones atmosféricas mientras alcanzan la superficie de la Tierra.

En la figura 3.8, se muestra el comportamiento del ángulo, con respecto al horario en el que se pretenda ver al Sol, teniendo en cuenta que entre más cerca éste se encuentre del ángulo vertical, mas optima será la incidencia del rayo.

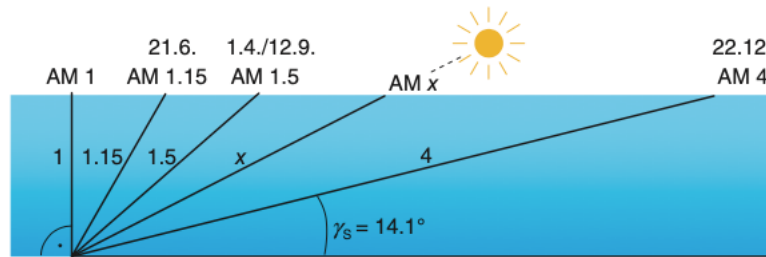


Fig. 3.8 Para la masa de aire: x representa el valor que tiene la extensión de la trayectoria que recorrerá la partícula comparada con la distancia vertical a través de la atmósfera (Mertens, 2014).

La pérdida adicional que existe en la irradiación normal directa se atribuye normalmente veces a las siguientes razones:

- Variación en el contenido y tamaño de partículas en el aerosol.
- Variación de perturbaciones de manera irregular en la región terrestre, a razón de la diferencia de temperaturas que se produce en las diferentes capas. (Linke y Beitr, 1922)

El movimiento rotacional que realiza la Tierra genera un movimiento de ésta sobre su propio eje, dicha revolución tiene una duración de 23 horas, 56 minutos y 4 segundos; esto conocido como día sideral. Al mismo tiempo la Tierra gira al rededor al Sol siguiendo una órbita, esto conocido como movimiento de traslación.

La Tierra tarda 365 días y 6 horas en dar una vuelta completa al rededor del Sol, el acumulado de las 6 horas sobrantes en un periodo de 4 años se genera un día completo adicional.

El Sol como referencia, el año trópico es el periodo que se necesita para que exista la repetición de las estaciones del año. El año tropical tiene una duración de 365 días, 5 horas, 48 minutos y 45 segundos, recordando que la Tierra se desplaza sobre una órbita al rededor del Sol que tiene una trayectoria elíptica.

La posición que el ser humano u objeto que se encuentre situado en la superficie terrestre, tiene una referencia de ubicación dada por sus coordenadas geográficas conocidas como latitud y longitud; la posición del Sol con respecto al humano u objeto viene dado por el vector de posición:

$$\vec{s} = \begin{cases} (sen\Omega t \cdot cos\delta)\vec{i} \\ (cos\Omega t \cdot cos\delta * senL - sen\delta \cdot cosL)\vec{j} \\ (cos\Omega t \cdot cos\delta * senL + sen\delta \cdot cosL)\vec{k} \end{cases} \quad 3.9$$

La siguiente figura 3.9 esta referenciada a un sistema de coordenadas cartesianas, cuyo plano “0YX” es el plano horizontal; entonces el eje 0z será el normal a la Tierra y coincidirá con el zenith, el 0y esta con orientación al sur y por consecuente el 0x será con dirección al Oeste. En la ecuación del vector \vec{s} se presenta un vector unitario para la posición solar, que apunta directamente al Sol. La orientación del vector (\vec{s}) depende de la

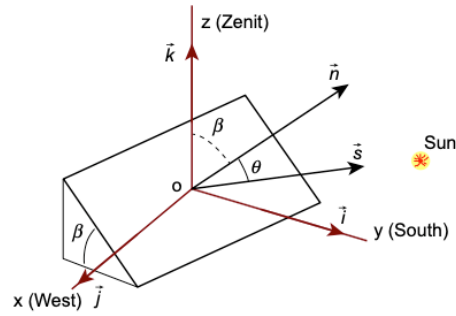


Fig. 3.9 Diagrama de cuerpo libre que representa los vectores que importan en la posición solar (G. N Tiwari , A. Tiwari 2016).

declinación solar (δ), la latitud (L), la velocidad angular de la Tierra (Ω) y el tiempo solar (t).

El ángulo de incidencia de los rayos solares en cualquier superficie o sobre un panel fotovoltaico, se traduce a un vector unitario (\vec{n}) que es perpendicular a la superficie. Éste será dependiente del ángulo azimutal o de orientación de la superficie (γ) y la inclinación propia del panel fotovoltaico (β).

$$\vec{n} = \begin{cases} (-\text{sen}\beta \cdot \text{sen}\gamma)\vec{i} \\ (\text{sen}\beta \cdot \text{cos}\gamma)\vec{j} \\ (\text{cos}\beta)\vec{k} \end{cases} \quad 3.10$$

Con el producto escalar del vector \vec{s} y el vector unitario \vec{n} se genera la relación que existe entre éste y el ángulo de incidencia solar.

$$\text{cos}\theta = \vec{s} \cdot \vec{n} \quad 3.11$$

La radiación solar incidente en la superficie de la Tierra es la suma de tres componentes distintos, radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada como lo muestra la figura 3.10. Los porcentajes reales de estos componentes varían según el clima, la ubicación y otras condiciones atmosféricas

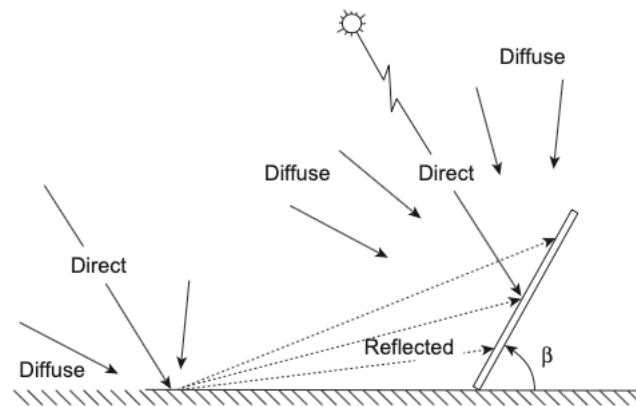


Fig.3.10. Componentes de la radiación (G. N Tiwari , A. Tiwari 2016).

- Irradiación del rayo de Sol : Proviene directamente del sol.
- Radiación Difusa: Esta es la radiación solar (en W/m^2) dispersada por aerosoles y otras partículas; la radiación difusa no tiene una dirección definida. En un día claro y soleado, esta energía representa alrededor del 15 por ciento de la radiación global. Sin embargo, en días nublados, la radiación es dispersada por las nubes, por lo que el porcentaje de radiación directa es muy bajo, mientras que el porcentaje de radiación difusa es mucho mayor.
- Radiación Reflejada: Reflejada por la superficie de la Tierra. La cantidad de radiación reflejada depende de la reflectancia de la superficie, también conocida como albedo.
- Para contemplar una orientación eficiente, se toma en cuenta una geometría solar que cuenta con diferentes.

- Radiación total (I): Es la suma de la radiación (directa) y difusa en W/m^2 . También se conoce como "radiación global".
- Irradiación (exposición a la radiación): La radiación solar incidente/radiación superficial medida en J/m^2 por hora o día se denomina "irradiación". Se obtiene integrando radiación haz/difusa/global durante 1 hora o un día.

Al diseñar proyectos fotovoltaicos, la radiación solar a menudo cuenta con componentes desconocidas; por lo tanto, deben estimarse utilizando datos de uso común, la radiación superficial diaria global H, que es la energía radiante incidente por metro cuadrado durante todo el día.

La ecuación expresada anteriormente da la magnitud de la irradiancia normal (radiación solar) en la región terrestre. Esto significa que la magnitud de la radiación difusa, que no tiene dirección debido a la dispersión desde debajo de la atmósfera, dependerá de una diferencia entre la Irradiancia ($I_{ext} - I_N$) Por lo tanto, la expresión para la radiación difusa en W/m^2 ha sido propuesta por Singh y Tiwari (H.N. Singh, e.t, 2005) de la siguiente manera:

$$I_d = K_1(I_{ext} - I_N)\cos\theta_z + K_2 \quad 3.12$$

Para los valores de K_1 y K_2 son datos numéricos para diferentes condiciones meteorológicas. Y esta ecuación es aplicable para una superficie horizontal o superficie tangencial a la persona observadora en la superficie exterior de la Tierra.

Las clasificaciones meteorológicas para diferentes condiciones climáticas se definen por las horas de sol, y las proporciones de la radiación difusa diaria a la global.

La eficiencia, expresada en porcentaje, define el rendimiento de una célula solar. Está mide la relación potencia de la célula solar y la potencia de la energía del sol que incide sobre el panel fotovoltaico:

$$\eta = \frac{P_{max\ panel}}{P_{Radiacion\ solar}} \quad 3.13$$

$$P_{Rad\ solar} = A \cdot E$$

A: Area del panel fotovoltaico m^2

E: Radiación solar sobre el panel solar en W/m^2

$$P_{max\ panel} = V \cdot I$$

V: Voltaje

I: Intensidad

El cambio de la intensidad de la radiación solar supone una variación de la corriente de salida sea cual sea la tensión, es decir, la corriente varía proporcionalmente con la radiación, manteniéndose constante la tensión. La exposición del módulo al Sol aumenta su temperatura, produciendo un incremento en la corriente, y éste al mismo tiempo presenta una disminución mayor en proporción del voltaje, el efecto total es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo.

3.4 Uso de paneles fotovoltaicos.

En la actualidad, existen dos formas de aprovechar la energía fotovoltaica:

- **Uso propio:** El equipo es un elemento no conectado a la red pública que se utiliza para alimentar una vivienda aislada, utilizando energía eléctrica generada para uso propio. Los usuarios utilizan sus propias baterías para obtener de forma independiente su propia energía cuando se pone el sol.
- **Integración a la red:** Las instalaciones solares están conectadas a la red pública, lo que permite que se lleve a cabo el intercambio energético de esta conexión a la red está asociado al exceso de aporte y su uso en periodos de baja producción.

En los próximos años se espera que el uso de esta tecnología aumente sustancialmente a nivel mundial debido a las probadas ventajas de esta tecnología a varios niveles, lo que traerá múltiples beneficios tanto económicos como ambientales.

CAPITULO 4: Actividad solar y su influencia en paneles fotovoltaicos

La variabilidad del Sol se concibe como: los aspectos que suceden en el Sol y los que recibimos en la Tierra. La variabilidad solar entonces será resultado de las manchas solares y los factores geométricos en relación de la posición Tierra. Sol, esto nos arrojará variaciones estacionales y factores atmosféricos.

Los factores atmosféricos para los seres humanos son de gran importancia para criterios de diseño, de análisis y estimación, siempre recordando que la naturaleza cuando no es tomada en cuenta para la realización de obras puede generar pérdidas humanas.

4.1 Influencia de la variación anual en los paneles fotovoltaicos

En el movimiento de traslación, la Tierra gira alrededor del sol a lo largo de una elipse de baja excentricidad, con el Sol ocupando uno de los puntos focales. La duración de esta campaña define un año. Este movimiento está contenido en el llamado plano de la eclíptica (Figura 5.1). Debido a la baja excentricidad de la elipse, la distancia del Sol a la Tierra durante el movimiento de traslación es variable. Al mismo tiempo, el movimiento de rotación donde a Tierra gira de oeste a este, al igual que los demás planetas del sistema solar (con la excepción de Venus y Urano). Desde el Polo Norte, la Tierra gira en sentido anti-horario. Se necesitan 23 horas, 56 minutos y 4 segundos para dar una vuelta completa relativa a una estrella.

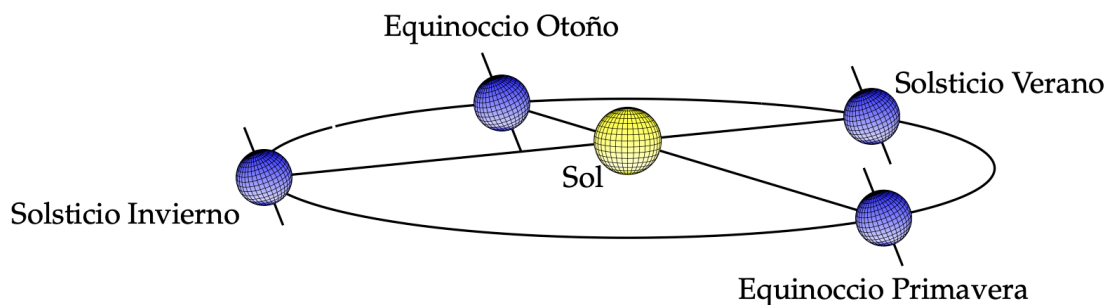


Fig. 5.1 Movimiento de trayectoria Sol- Tierra (Mertens, 2014).

Dentro de un año, la Tierra gira alrededor del sol en un círculo casi perfecto. Debido a que el eje de la Tierra está inclinado, la altura del sol cambia a lo largo del año. La figura 5.2 muestra este vínculo entre los cambios de verano e invierno. El ángulo φ es el ancho geográfico (latitud) de la ubicación en consideración.

$$\gamma_{smax} = 113.4^\circ - \varphi \quad 5.1$$

En verano, el Polo Norte está inclinado hacia el Sol, de modo que existen grandes ángulos del sol (a menudo también llamado altitud solar). La altitud solar máxima γ_{smax} (mediodía) se puede determinar con una simple consideración del ángulo:

$$\gamma_{smax} = 113.4^\circ - \varphi \quad 5.2$$

La figura 5.2 que se muestra a continuación nos muestra la declinación solar de 2 casos extremos, Esto se entiende como la respectiva inclinación del eje de la Tierra en la dirección del Sol. Sin embargo, esto cambia de manera constante durante el año lo que nos genera diferentes ángulos y por consiguiente se debe realizar el cálculo de la trayectoria del Sol con la ayuda de esta imagen se puede determinar la declinación del Sol para cada día del año.

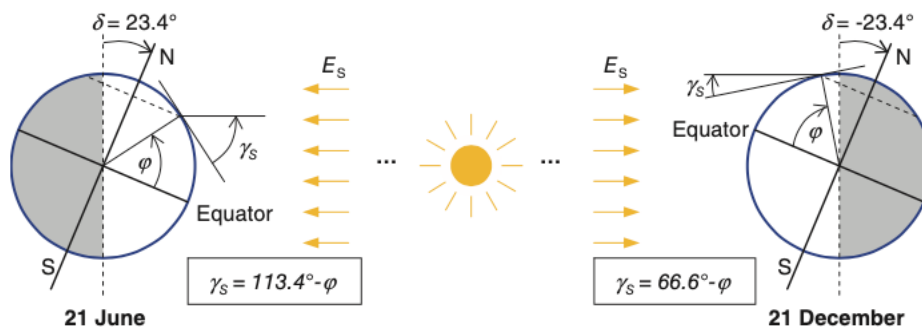


Fig 5.2 Influencia de la inclinación de la Tierra en la posición solar del Medio día γ_{smax} para el solsticio de verano e invierno. Dependiendo el valor de la latitud φ éste valor será distinto (Mertens, 2014)..

Conocer la trayectoria del sol en un día determinado ayuda en la planificación detallada de la planta ante posibles sombras. Para simplificar los cálculos se utiliza el llamado tiempo solar local (LST) u hora solar. Este es el momento en que el sol está justo en el sur al mediodía, alcanzando así el punto más alto del día. Sin embargo, el Tiempo Universal Coordinado (UTC) se referirá al meridiano cero de Greenwich. Por lo tanto, solo es correcta la hora solar local a 0° de latitud.

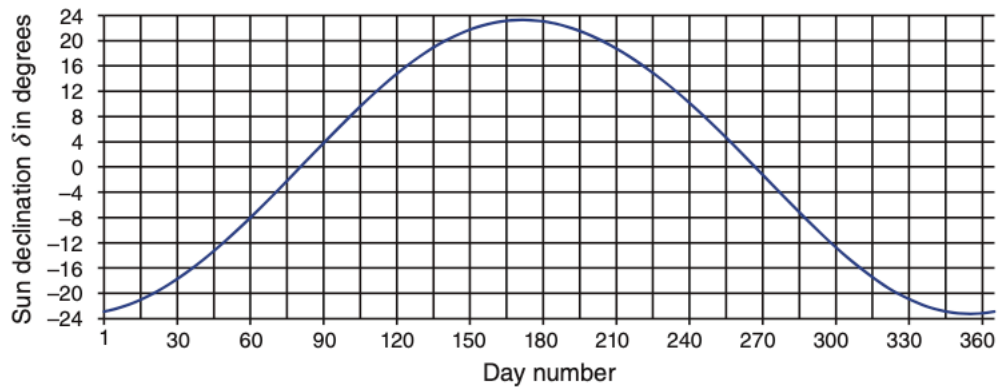


Fig 5.3. Declinación solar en en transcurso del año (K. Mertens 2014).

La diferencia entre los dos tiempos se puede determinar aproximadamente a partir de sus respectivas ubicaciones geográficas Λ , ya que la tierra gira cada 24 horas (360°), por lo que 1 hora corresponde a solo 15°. Algebraicamente denotado por la siguiente ecuación:

$$LST = UTC + 1h \cdot \frac{\Lambda}{15^\circ} \quad 5.3$$

La declinación solar (Fig. 5.3) tiene diversas formas para calcularse, pero la simplificación más utilizada en ingeniería es la siguiente ecuación (Duffie y Beckman, 1991):

$$\delta = \varepsilon_{ob} \text{sen} \left[\frac{360(284 + n_j)}{365} \right] \quad 5.4$$

donde:

δ : Ángulo de declinación solar expresado en grados.

ε_{ob} : Constante dada por el ángulo de oblicuidad de la elíptica con valor de 23.45°

n_j : Día juliano del año donde el valor de éste será día calendario, 1 de enero $n_j=1$ 31 de diciembre $n_j=365$

El ángulo horario ω , es producto de la incidencia del rayo solar con el plano meridional del sitio donde nos encontramos, éste medido en el plano que contiene la trayectoria solar. La medición se realiza desde el plano meridional, por lo que se obtiene un $\omega=0$ cuando el sol se encuentra a medio día 12:00. Se toma en cuenta la dirección por lo que al oriente se encontrará el lado positivo y al poniente el lado negativo como se muestra en la figura 5.4

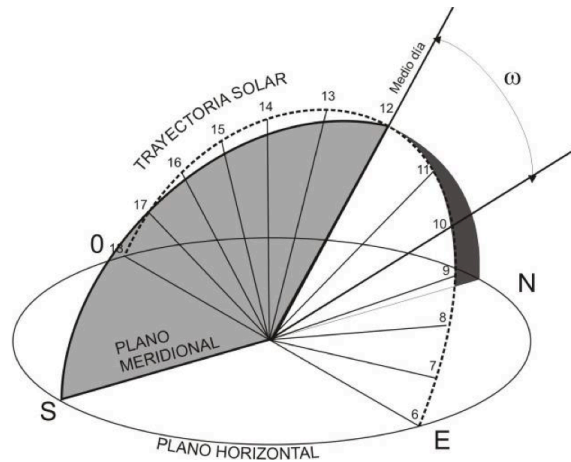


Fig5.4 Diagrama para determinar el ángulo horario (Mertens, 2014).

Existen tablas para obtener el ángulo horario y un método analítico. La siguiente ecuación calcula la hora solar local en la respectiva posición de rotación de la Tierra

$$\omega = (LTS - 12) \cdot 15^\circ \quad 5.6$$

Para el caso del amanecer el ángulo horario se expresa con una ecuación (Rehman, 1997):

$$\cos \omega = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \quad 5.7$$

donde:

δ : Declinación solar.

φ : Latitud del sitio.

La elevación solar tendrá el valor del ángulo formado por el rayo del Sol y el plano horizontal del sitio y éste va a tener un parámetro de variación de 0° a 90° . El valor de la altura solar se obtiene con la siguiente ecuación (Olgyay, Olgyay. 1957):

$$\text{sen } h = \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \varphi + \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \varphi \cdot \text{cos } \omega \quad 5.8$$

Misma ecuación de la que se puede obtener el valor del azimuth solar, definida como la proyección del rayo solar en el plano horizontal del sitio con la línea norte-sur del plano meridional, este último dependiendo el cuadrante donde se encuentre el Sol como lo muestra la figura 5.5.

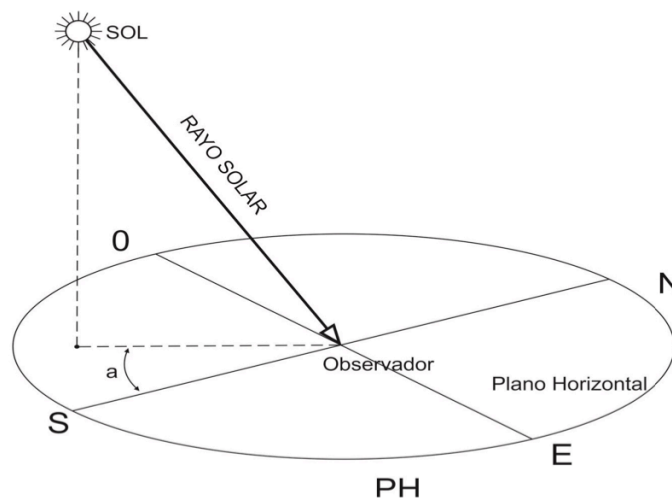


Fig 5.5. Componentes del ángulo azimuth REF

Dada que es una proyección el azimuth y asignándole la variable (a), se obtiene de la siguiente ecuación:

$$sena = \frac{\cos\delta \cdot \text{sen}\omega}{\cosh} \quad 5.9$$

Los valores de altitud solar (h) y azimuth solar (a) obtenidos del programa de geometría solar anterior se expresan en hora solar o astronómica y no corresponden necesariamente a la hora civil a la que se ajustan nuestros relojes. Para corregir estos valores, es necesario tener en cuenta las diferencias en la velocidad del movimiento de traslación de la Tierra, lo que hace que algunos días sean más cortos que otros. Por lo tanto, la ecuación del tiempo (ET) representa el número de minutos (y fracciones) que se deben sumar o restar del tiempo solar verdadero para obtener la hora del tiempo medio. En astronomía se conoce como intervalo de tiempo, que separa el paso por el meridiano local del sol real (que pasa por la eclíptica a velocidades variables en su movimiento aparente) del sol medio (el sol imaginario que pasa por la eclíptica). uniforme de la eclíptica (Llasat y Snyder, 1998).

La segunda Ley de Kepler explica como la Tierra en su movimiento de traslación tiene un recorrido áreas iguales en tiempos iguales que con un radio vector se enlaza al Sol como se observa en la figura 5.6. De esta manera, cuando la tierra está más alejada del sol, el radio es más largo y la distancia entre los dos puntos de la órbita es más corta, por lo que el movimiento de traslación es más lento. Por el contrario, cuanto más cerca está la tierra del sol, menor es el radio, mayor la distancia entre los dos puntos de la órbita y más rápido el movimiento de traslación.

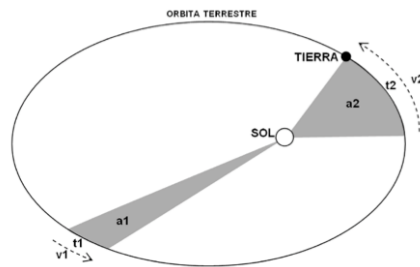


Fig.5.6 Diagrama que define la Ley de Kepler

Los valores de las ecuaciones del tiempo se obtienen de los anuarios astronómicos, pero también se pueden estimar analíticamente. El procedimiento de manera simplificada es el siguiente (Duffie y Beckman, 1991):

$$ET = 9.87\text{sen}2f - 7.53\text{cos}f - 1.5\text{sen}f \quad 5.10$$

donde:

$f=360(n_j-81)/364$ en grados.

n_j : día juliano

La manera gráfica de obtener el valor resultante de la ecuación del tiempo se conoce como analema. Ésta se muestra como una función caractreísica

4.2 Condiciones climáticas de México y su afectación en los paneles fotovoltaicos

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) señaló en su análisis exhaustivo de la principal base de datos de reanálisis del Centro Internacional de Investigación que la temperatura media mundial de 2020 para continentes y océanos fue una de las tres más cálidas registradas. Esto significa una anomalía positiva de 1,2°C en comparación con la

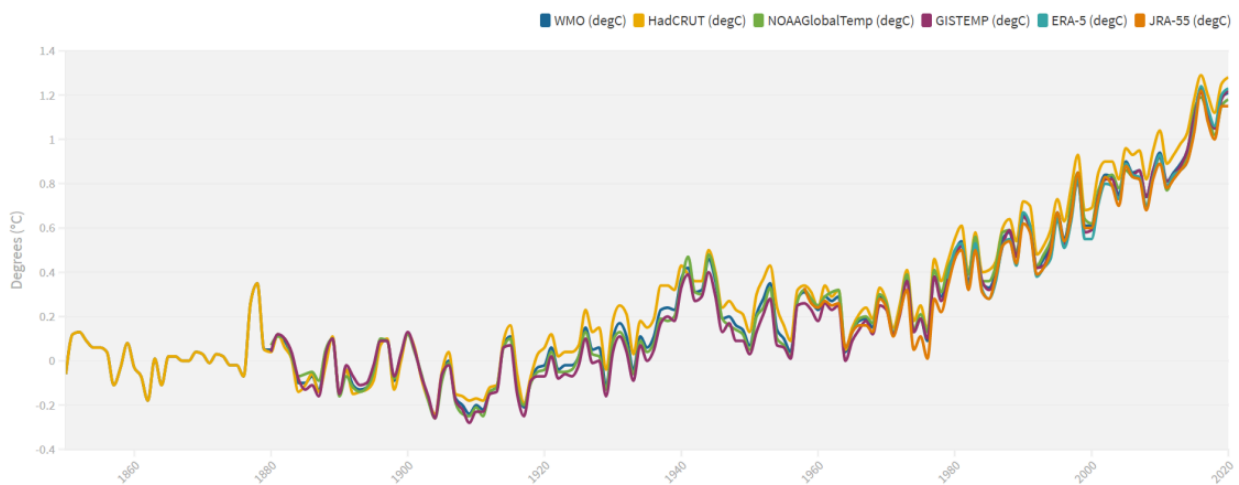


Fig 5.7. Se muestra las anomalías presentadas en la temperatura promedio del aire a dos metros a nivel global del año 2020, de diferentes centros de investigación como: ERA5 (Servicio de Cambio Climático Copernicus de ECMWF, C3S); GISTEMPv4 (NASA); HadCRUT4 (Met Office Hadley Center); NOAAGlobalTemp (NOAA), JRA-55 (JMA) y WMO.

temperatura promedio en la era preindustrial, incluido el período 1880-1900 (Pascual et al, 2020). La temperatura media de la superficie durante la última década fue la más alta, como lo muestra la figura. Como resultado, la década entre 2011 y 2020 fue la década más cálida registrada a nivel mundial como se muestra en la figura 5.7.

Este calentamiento no es distribuido en toda la superficie terrestre de manera homogénea, el registro más alto de temperatura se dio en las regiones polares con un 6.0°C mayor al promedio climatológico, lo cual tuvo afectación en el deshielo de los glaciares y derretimiento de las capas de hielo, además de tener un incremento de temperatura en el permafrost, por lo mismo existe una dinámica del clima global diferente que tiene como resultado evento hidrológico y meteorológicos extremos. La figura 5.8 muestra como la temperatura tiene incrementos de manera diferencial en los últimos años de manera global .

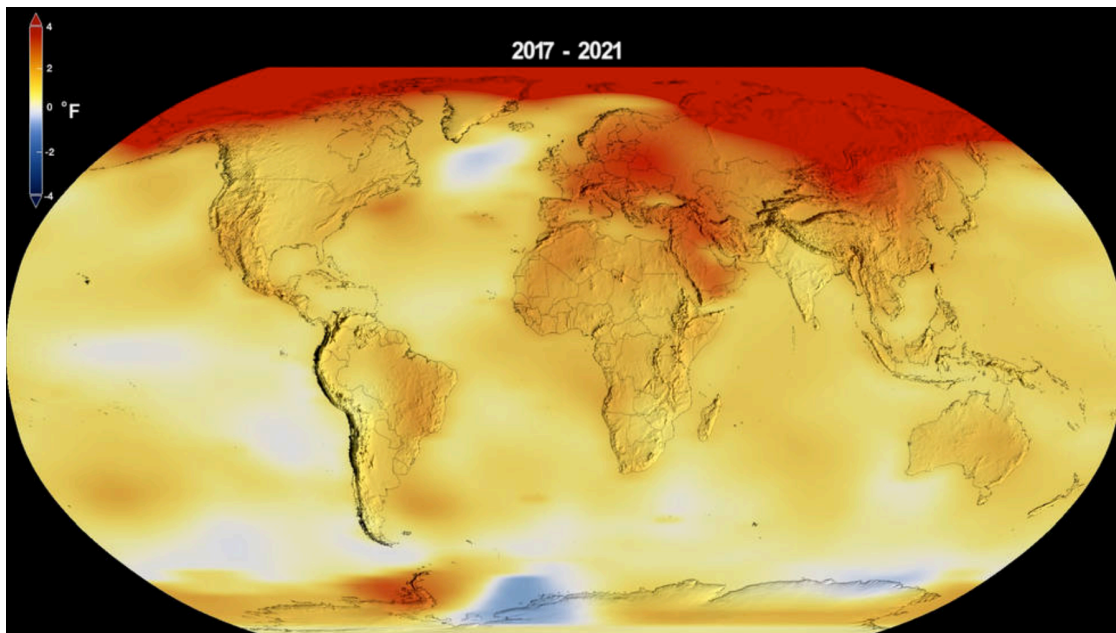


Fig. 5.8 Anomalías de temperatura global en la superficie del planeta en 2021. En regiones como el Ártico se pueden observar temperaturas más altas de lo normal, mostradas en rojo. Las temperaturas más bajas de lo normal se muestran en azul. (NASA, 2021)

México es un país que cuenta con una gran diversidad de climas y microclimas, por lo que es importante considerar las afectaciones en el panel que este puede generar. La temperatura de funcionamiento de los paneles fotovoltaicos juega un papel clave en el proceso de conversión de energía. El rendimiento eléctrico y la potencia de salida del módulo están relacionados linealmente con la temperatura de funcionamiento del panel. En promedio, los paneles solares absorben el 80% de la radiación solar recibida. Sin embargo, parte de esta radiación se convierte en energía eléctrica y el resto en energía térmica. La parte convertida en calor aumenta la temperatura del módulo, creando una concentración de portadores intrínsecos, lo que resulta en una mayor saturación de corriente, lo que conduce a una menor eficiencia y degradación del panel fotovoltaico (S. Dubey, et .2013)

El cambio climático en los sistemas fotovoltaicos está particularmente relacionado con las condiciones de radiación solar y temperatura ambiente (M. Nabipour, et. 2016). Cuando un panel solar es sometido a cambios climáticos severos o repentinos, el sistema experimentará un cambio en su punto de máxima potencia debido a la relación que existe entre la radiación solar, la temperatura y la resistencia eléctrica, resultando en un cambio “corriente-voltaje” mediante una curva. La tecnología de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) es la forma más sencilla de mejorar el rendimiento de los módulos fotovoltaicos.

4.3 Radiación incidente en el panel fotovoltaico inclinado.

La mayoría de las centrales fotovoltaicas se instalan sobre cubiertas inclinadas, por lo que el ángulo de ataque de los módulos respecto al plano horizontal es β . También en el caso de cubiertas planas o plantas de exterior, es habitual inclinar los módulos para conseguir mayores rendimientos anuales.

La Figura 3.9 muestra la relación de radiación en el caso de una superficie de módulo solar adecuada (o más comúnmente conocido como un panel solar). Además de la radiación directa y difusa, existe otro componente de radiación: la radiación reflejada desde el suelo. Estos se suman a la radiación total E_{Gen} en el generador de inclinación.

$$I_{Gen} = I_{directa-gen} + I_{difusa-gen} + I_{reflejada-gen} \quad 5.11$$

La energía de la radiación difusa también es conocida como radiación por albedo.

Para calcular la radiación directa se considera el caso donde la radiación incide sobre el panel solar de manera inclinada y en un segundo caso de manera vertical y se observa en la figura 5.9 que se puede hacer una generalidad de dos casos en el que se observa cómo la radiación solar incide sobre una superficie horizontal A_H

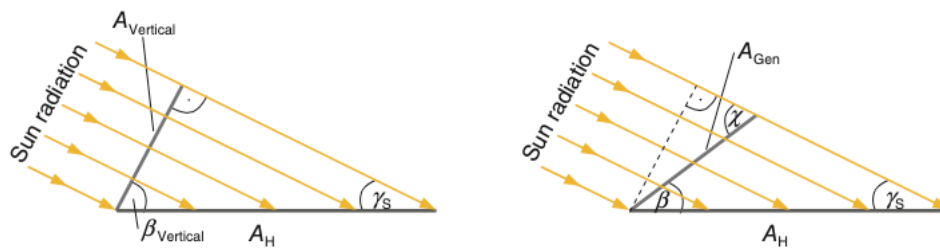


Fig 5.9 Influencia de la inclinación del panel solar sobre la radiación directa

En el esquema se muestra el caso general: un panel solar inclinado por el ángulo β .

Donde:

A_H : Superficie horizontal.

$A_{vertical}$: superficie vertical a la dirección incidente.

A_{Gen} : Superficie a nivel del panel

γ_s : Ángulo de latitud solar

β : Ángulo de elevación del panel solar.

X : Ángulo complementario

La potencia óptica P_{Opt} de la radiación incidente es:

$$P_{Opt} = I_{directa-H} \cdot A_H \quad 5.12$$

Si el generador solar está perfectamente perpendicular a la radiación solar, entonces será posible que se logre obtener la misma potencia en una superficie más pequeña $A_{vertical}$.

$$P_{Opt} = I_{directa-h} \cdot A_H = I_{directa-H} \cdot A_{vertical} \quad 5.13$$

El esquema de la derecha en la Figura 5.9 se realizó el uso de ecuaciones trigonométricas para determinar la fuerza de la radiación en el nivel del panel:

$$A_{vertical} = A_H \cdot \text{sen} \gamma_s \quad 5.14$$

$$A_{vertical} = A_{Gen} \cdot \text{sen} X \quad 5.15$$

El ángulo complementario X se puede calcular por la suma de los ángulos del triángulo y como ángulo suplementario:

$$X = \gamma_s + \beta \quad 5.16$$

Derivada de las ecuaciones 5.13 a 5.16 obtenemos la siguiente expresión y es importante resaltar que esta ecuación solo aplica para radiación directa:

$$I_{directa-gen} = I_{directa-h} \cdot \frac{\text{sen}(\gamma_s + \beta)}{\text{sen} \gamma_s} \quad 5.17$$

Para el cálculo de la radiación difusa en una superficie inclinada se logra una simplificación bastante útil, éste conlleva una suposición en la que se contempla que la radiación de todo el cielo. Por lo tanto, la fuerza de radiación de un panel solar en un ángulo β se calcula como:

$$I_{difusa-Gen} = I_{difusa-H} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos\beta) \quad 5.18$$

Y se parte de la concepción del panel solar totalmente horizontal con un ángulo $\beta = 0^\circ$ y la radiación se reduce hasta un ángulo $\beta = 90^\circ$

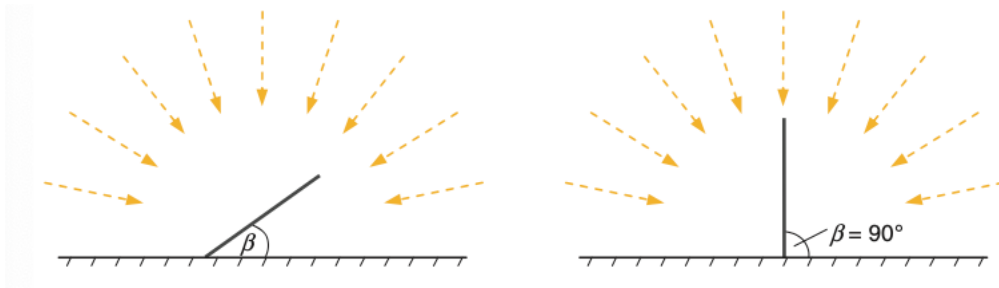


Figura 5.10 Suposición isotrópica para radiación difusa sobre una superficie inclinada. Sólo la mitad de la radiación puede ser utilizado en el caso de un panel solar vertical

$$I_{difusa-Gen} = \frac{I_{difusa-H}}{2} \quad 5.19$$

En este caso, el panel solar es vertical, por lo que solo se puede usar el lado izquierdo del cielo (Figura 5.10, derecha). La suposición de isotropía solo puede entenderse como una aproximación aproximada. Por lo tanto, el cielo alrededor del Sol es mayormente más brillante que el área del horizonte. Los modelos más refinados se utilizan en los programas de simulación modernos para lograr una mayor precisión.

La radiación solar promedio mensual en una superficie inclinada se puede estimar de acuerdo con el procedimiento similar siguiente para calcular la radiación solar total por hora en una superficie inclinada.

Con las contribuciones de la radiación del haz, difusa y reflejada, entonces la radiación solar media diaria mensual en una superficie inclinada sin sombra se puede expresar asumiendo que todas las radiaciones son isotrópicas. Las plantas fotovoltaicas se instalan mayoritariamente en cubiertas inclinadas de modo que el módulo se encuentre en un ángulo de ataque β respecto a la horizontal. También en el caso de cubiertas planas o plantas al aire libre es habitual inclinar los módulos para conseguir un mayor rendimiento anual.

4.4 Influencia de la inversión magnética solar en los paneles solares

Dada la fórmula para el diodo ideal de la ecuación número 3.3, se crea la curva característica de los paneles fotovoltaicos formando la representación de la función I-V . En la figura 5.11, se ha realizado la gráfica I-V para observar cual es el comportamiento de un panel solar ante incrementos de irradiancia y se ha tomado la temperatura constante de 25°C .

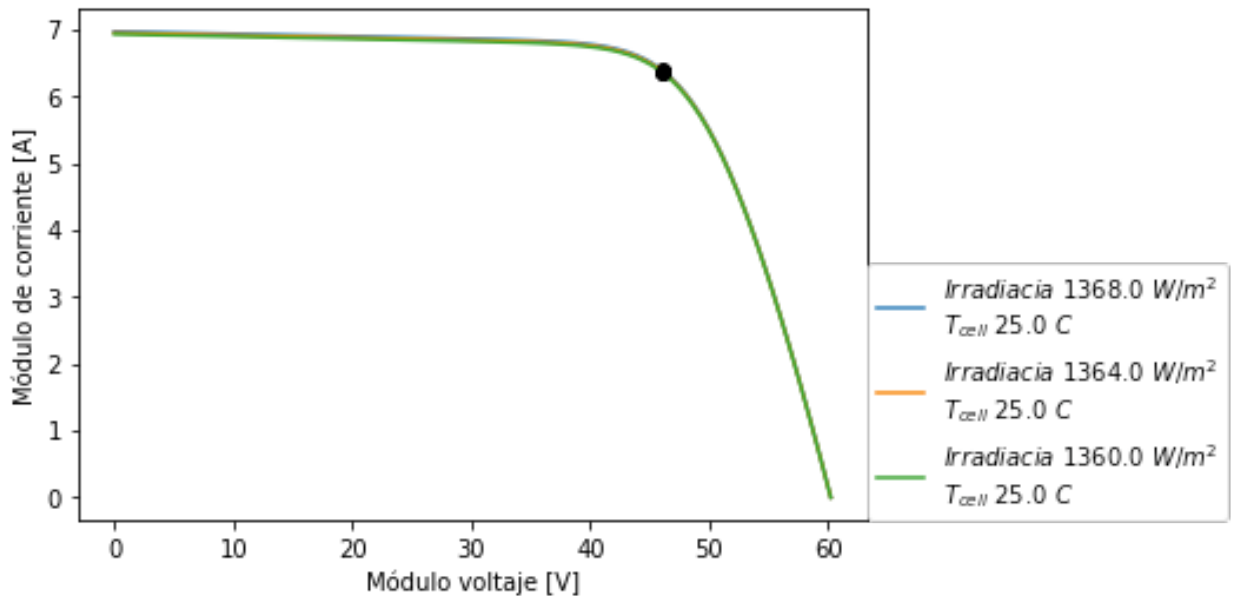


Figura5.11 Curva Característica con irradiancias distintas y temperaturas constante.

Para la observación en el cambio de la irradiancia y de la temperatura que se asocia a la recepción de mayor radiación solar, se ha tomado el cambio histórico como lo ha reportado la NASA y se muestra en la figura 5.12.

Se ha medido instrumentalmente en distintas partes del mundo y analizando el comportamiento senoidal que se produce cada 22 años asociado a la inversión magnética solar. La figura 5.13 contiene la diferencia de irradiancia y temperatura con la función de la curva característica I-V se observa un comportamiento constante hasta aproximadamente 40 V y posteriormente tiene el punto de inflexión en el punto negro de la figura para cada curva, la línea azul representa una irradiancia decae el módulo de corriente y presenta diferencia de valores.

El análisis de la diferencia entre valores de dos curvas características asociadas a valores distintos denota una distancia entre los datos de voltaje y corriente en el comportamiento de la función donde se observa que al diferencia tiene un valor casi constante de 0.6 y la

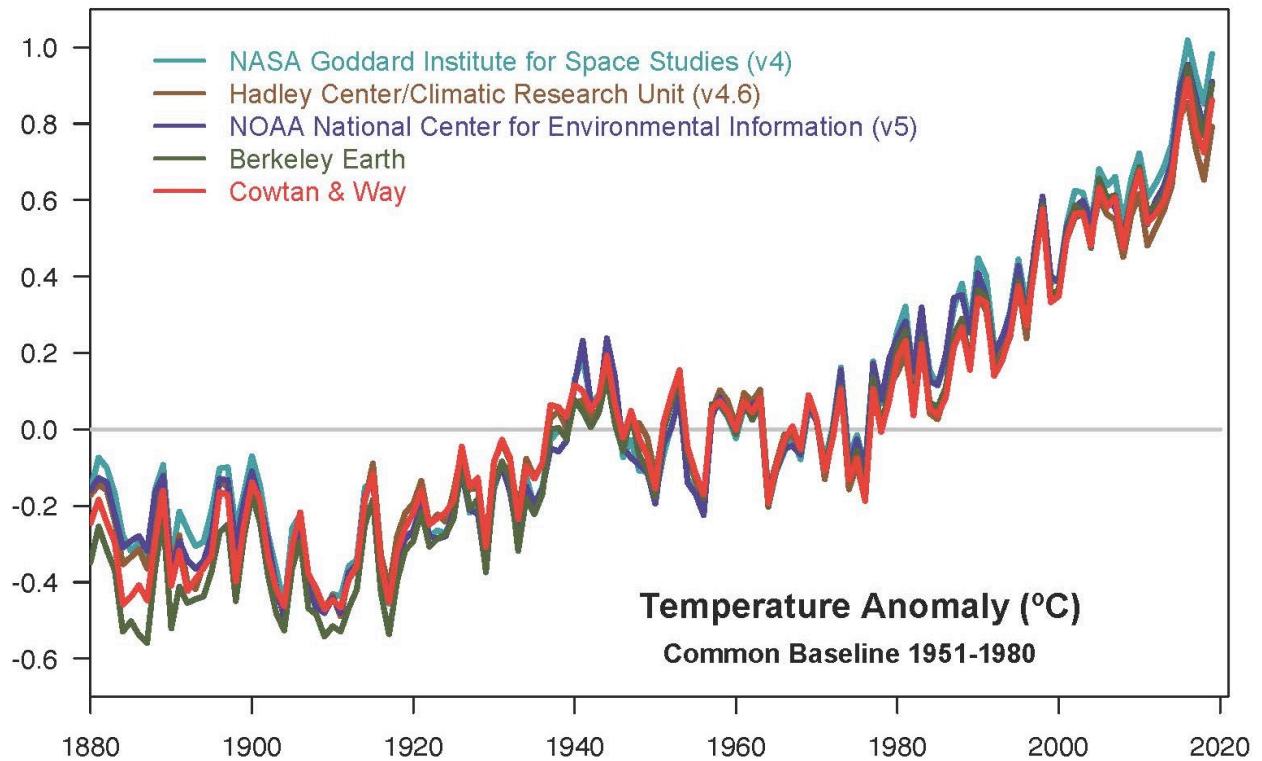


Fig 5.12. Anomalías de temperatura en °C (NASA)

diferencia disminuye desde aproximadamente 40[V]. Por consiguiente, se realizó la diferencia absoluta y porcentual de los dos casos. La figura 5.14 muestra la diferencia absoluta con variación en la irradiancia pero una temperatura constante a 25°C. Se calculo la diferencia absoluta de la corriente eléctrica entre los valores mínimo y máxima donde se observa que la diferencia es de 0,040[A] desde 0,1[V] hasta 45[V] y luego la diferencia empieza a disminuir y lo mismo ocurre con la diferencia entre el mínimo y la

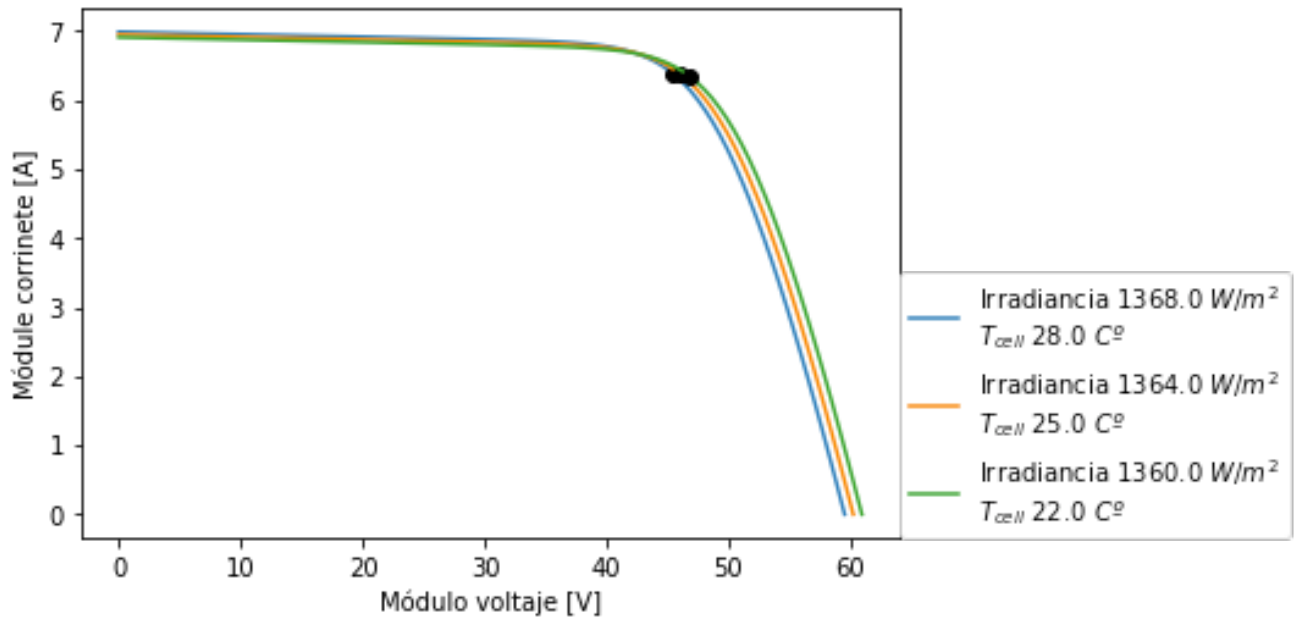


Fig. 5.13 Curva característica con cambio de irradiancias y temperaturas

irradiancia media, pero con una diferencia de 0,020[A] desde 0,1[V] hasta 45[V].

Para el análisis, en la figura 5.15 se muestra la representación grafica de 2 diferencias porcentuales en las que se observa una diferencia de 0.3% entre los datos de las curvas características en diferentes puntos, con temperatura constante a 25°C pero irradiancia distinta.

En el caso real, donde la radiación solar genera un aumento en la temperatura de la Tierra, el comportamiento de la diferencia absoluta se observa distinta, pues llega un punto en el que no existe diferencia entre los valores y esta llega a cero como se muestra en la figura 5.16. Éste tiene la representación grafica del cálculo para la diferencia

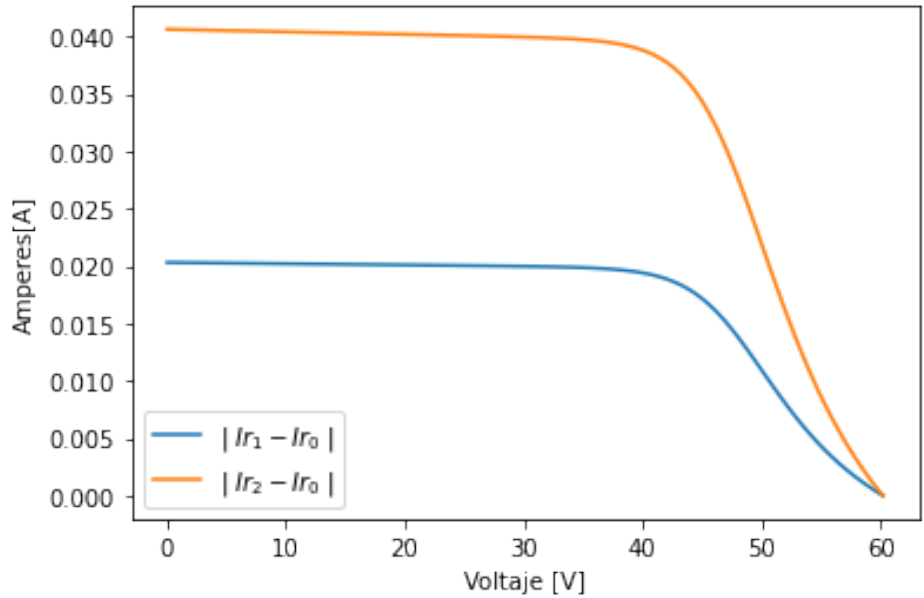


Fig 5.14. Diferencia Absoluta entre 2 curvas características con diferentes irradiancias y temperatura constante.

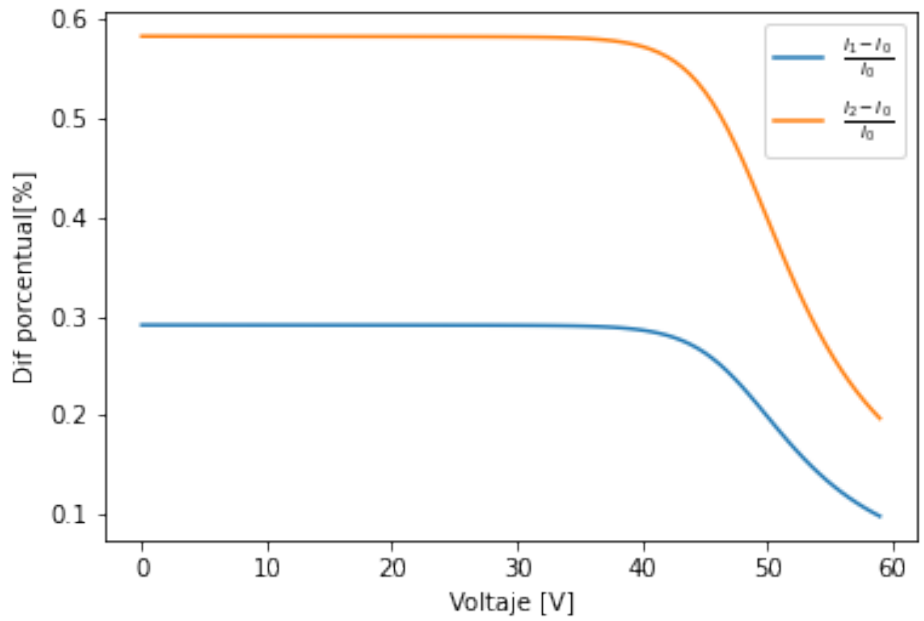


Fig.5.15. Diferencia porcentual de las curvas características. con misma irradiancia y temperatura constante.

absoluta de la corriente eléctrica con el mínimo de temperatura 22°C y con el máximo que es de 28°C y se observa la diferencia máxima de 0.08 [A] y la diferencia se encuentra

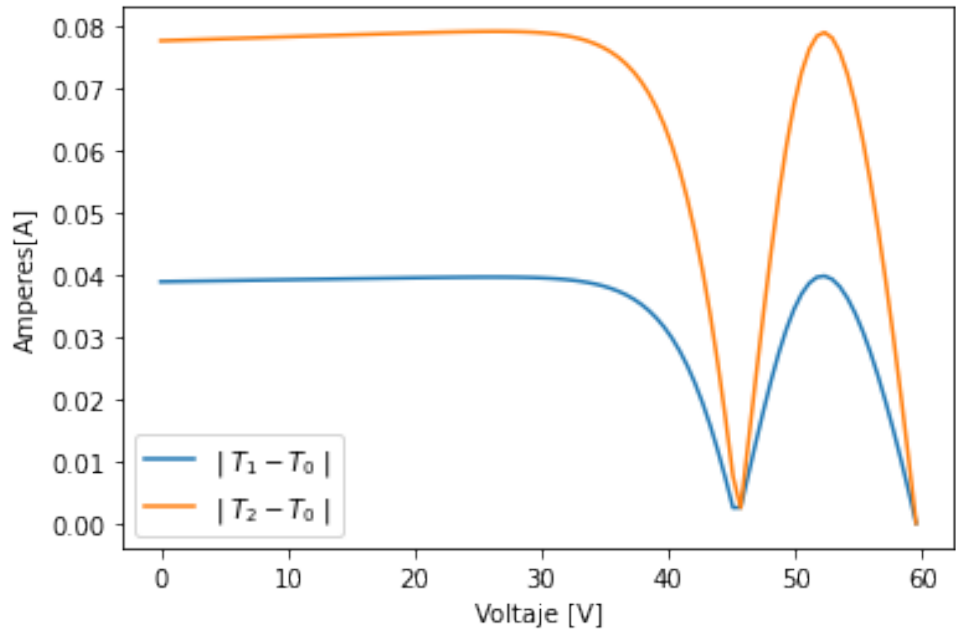


Fig. 5.16 Diferencia absoluta de las curvas características con cambios en la irradiancia y la temperatura.

a los 52[V].

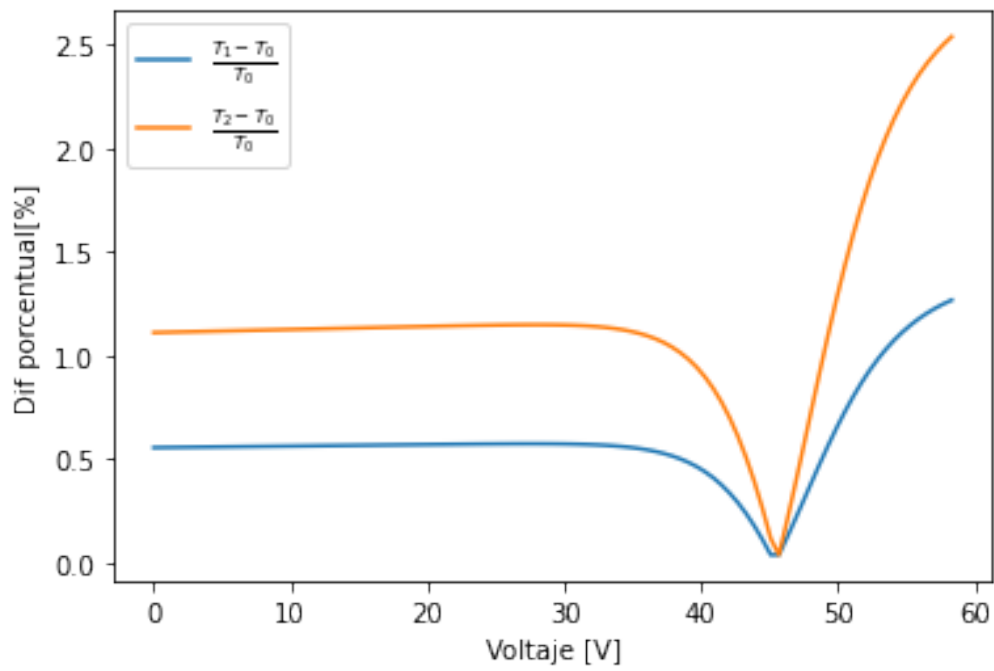


Fig. 5.17 Diferencia porcentual de dos curvas características con temperaturas e irradiancias distintas.

De la misma forma, con la diferencia porcentual logramos observar de el punto de coincidencia entre curvas características, donde se tiene intensidad de corriente y voltaje la diferencia porcentual es de cero, sin embargo se mantiene en un rango de 0.1[V] a 40[V] y luego el impacto de la diferencia de irradiación comienza a aumentar, y algo similar para la diferencia entre en la temperatura mínima y la media pero con un valor de 0,012% en un rango de 0,1[V] a 40[V] y se muestra la representación de esto en la figura 5.17

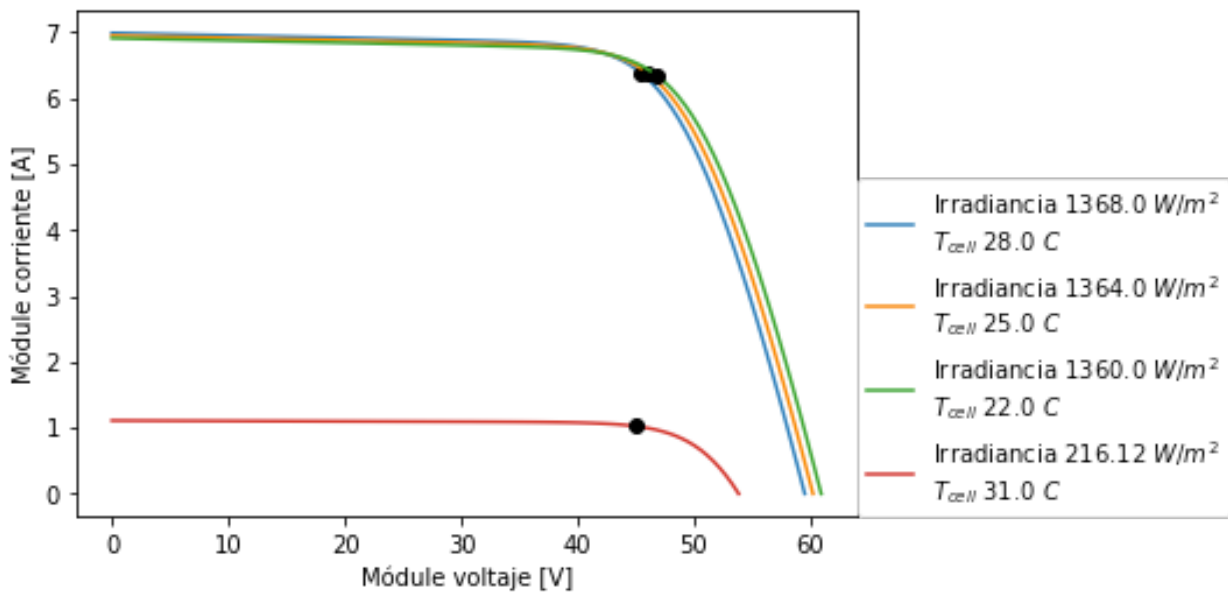


Fig. 5.18 Curva I-V en comparativa de irradiación y temperatura del Polo Norte.

Asimismo, dando seguimiento a las anomalías en temperaturas altas que se muestran en la figura 5.12, el polo norte ha tenido un valor máximo de 3 °C mayor a los 25°C donde se tienen detecciones en valores radiativos de 216.12 W/m^2 por lo que la figura 5.18 muestra una diferencia donde es considerable la eficiencia dentro de la curva característica, se tiene un menor modulo de corriente y el voltaje llega a menos de 60[V] y existe una diferencia de 0,1[V] a 40 [V] de 6 [A] que resulta ser considerable si se planea proponer el panel solar como generador de la zona geográfica.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

Durante un periodo de 11 años, el Sol cambia su campo magnético completamente generando un cambio en la posición de los polos, pasando su polo norte y sur de lugar, y con éste se genera fluctuaciones en la emisión de irradiación a la Tierra. El número de manchas solares varían dentro del mismo periodo, las primeras manchas del ciclo se encuentran en posición cercana a los polos y posteriormente se desplazan al ecuador hasta completar el máximo solar y al desaparecerse se genera el mínimo solar; el número de manchas solares tiene relación estrecha con la radiación que llega a Tierra.

El ciclo solar tiene influencia en el comportamiento de distintos fenómenos climáticos terrestres, por lo que distintos cambios dentro del último milenio se han relacionado de manera estrecha con la variabilidad en la emisión de radiación solar.

Los ciclos de actividad solar y la inversión magnética solar tienen una contribución en el balance de energía en la Tierra, cercano al 0.1%, mismo porcentaje que ha sido influyente en el cambio de temperatura percibida.

Los paneles fotovoltaicos muestran una afectación en su eficiencia y producción energética debido a la inversión magnética solar. La variación que existe entre la irradiancia mínima y máxima detectadas incluyendo la variación de temperatura que ésta presenta son de 0.25%. A la vez, los estudios sugieren el análisis de temperatura relacionada con la radiación del Sol y éste representa $\pm 4^{\circ}\text{C}$, por lo que al considerar variación de temperatura como factor en la producción energética de un panel solar teniendo como resultado un impacto de 0.31% como máximo por consiguiente la influencia de la radiación recibida es de mayor rango.

Es de importancia tomar en cuenta que las estimaciones de un máximo y un mínimo tanto de temperatura como de irradiancia en la Tierra, se basan en datos del mínimo de

Maunder de décadas pasadas y estas mediciones tendrán una mejor precisión con la aproximación de los datos actuales o posteriores.

La influencia de la inversión magnética solar tiene impacto y relevancia en los parques solares de generación grande donde las fluctuaciones pueden tener una consideración importante para el suministro de la energía.

El proyecto de tesis cuenta con posibles futuras ramificaciones para impactos particulares, como lo puede ser la mejora de eficiencia en diferentes materiales con pruebas de laboratorio que tengan en cuenta el aumento de temperatura debido al Sol. De la misma forma, la aplicación en satélites de comunicación o estaciones espaciales. Por efecto de la inversión magnética solar puede generar estudios para el factor de impacto por temperatura y radiación para lograr el máximo aprovechamiento de la radiación.

La planeación estratégica del Balance Nacional de Energía que se realiza año con año para nuestro país y los proyectos de investigación orientados al aprovechamiento eficiente de las energías limpias tienen un vinculo y relevancia alta con la ingeniería civil. El ingeniero siempre debe estar consciente de su papel dentro del progreso de una sociedad y en el cambio que está pueda tener dentro de un ecosistema; tener conocimiento de los factores diversos que pueden hacer un mejor funcionamiento de la tecnología o utilizar dichos factores para dar soluciones a problemáticas planteadas con anterioridad.

REFERENCIAS.

- *A. Gámez, A. Geiger, A. Ivanova, A. Trasviña, A. Muhlia, A. Breceda, D. Lluch Belda, D. De la Toba, E. Romero, H. Reyes-Bonilla, J. Wurl, M. Ángeles, M. Cariño, O. Arizpe, S. Lluch, S. Díaz, T. Žentonom (2012). La paz.*
- *A. Goetzberger, J. Knobloch y B. Voss(1998) «Crystalline Silicon Solar Cells,» Germany: Wiley & Sons Ltd, pp 6.*
- *A. S. Brun, M. K. Browning, M. Dikpati, H. Hotta, A. Strugarek (2013)»Recent Advances on Solar Global Magnetism and Variability» 10.1007/s11214-013-0028-0Space Science Reviews*
- *A. Tejada Martinez , G. Gómez Azpeitia (2015)»Prontuario solar de México» Universidad de Colima ISBN: 978-607-8356-45-4*
- *Alemán Nava, G., Casiano Flores, V., Cárdenas Chavez, D., Diaz Chavez, R., Scarlat, N., Mahlknecht, J., Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 32 ,140-153.*
- *Barry, R. y Chorley, R. (1992). Atmosphere, weather and climate. New York: Routledge.*

- *Bertotti and P. F. Arinella. (1990). Physics of the Earth and the Solar System . Dordrech Kluwe: Ac. Press.*
- *Butti, Ken y John Perlín.(1980) Un hilo dorado, 2500 años de arquitectura y tecnología solar; Ed. H. Blume, Madrid*
- *D. A. Neaman. (2012), Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, Fourth Edition, Fourth. New York, NY: Raghu Srinivasan,.*
- *D. Shiota, S. Tsuneta, M. Shimojo, N. Sako, D. Orozco Suárez, R. Ishikawa, (2012). Polar field reversal observations with hinode. Astrophys. J. doi:10.1088/0004-637X/753/2/157*
- *Delgado a., (2008). Fisicanova, Bucaramanga:FISICANOVA, 1era edición .*
- *Dermott J. Mullon,2009. Physics of the sun, a first course.Chapman and Hall/CRC; 1er edición*
- *Estrada Gasca, C. A. (2013). Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia. Revista Mexicana de Física, 59(2),75-84. [fecha de Consulta 17 de Mayo de 2022]. ISSN: 0035-001X.*

- *F. A. Lindholm, Fossum, J. G., y Burgess, E. L. (1979), «Application of the superposition principle to solar-cell analysis», IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 26, pp. 165–171.*
- *F. Kasten, (1989). A. T. Young, Appl. Optics 28, 4735*
- *F. Linke, Beitr. (1922) Phys. Fr. Atom 10, 91*
- *Federico Bernardelli . (2010). Energía Solar Termodinámica . Santiago de Chile : Naciones Unidas .*
- *Foukal, P. V. (2004) Solar Astrophysics. Wiley-VCH 2da Edición .*
- *G. Kopp, J.L. Lean, A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. Geophys. Res. Lett. 38, 1706 (2011).*
- *G. N Tiwari , A. Tiwari (2016) “Handbook of Solar Energy, Theory, Analysis and applications” Springer .*
- *Gul, M., Kotak, Y., & Muneer, T. (2016). Review on recent trend of solar photovoltaic technology. Energy Exploration & Exploitation, 485-526.*

- “IEC 60904-3, (2008). *Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data.*”
- *Imene Yahyaoui. (2018). Advances in Renewable Energies and Power Technologies. University Carlos III of Madrid, Spain: Elsevier.*
- *J. Fricke, W.L. Borst.(2013) Essentials of Energy Technology: Sources, Transport, Storage, Conservation, Wiley,*
- *J. Moreno, «Modelado del espectro solar y su influencia en el funcionamiento de módulos fotovoltaicos de lámina delgada,» de Tesis doctoral, Universidad de Málaga, 2014, pp. 33*
- *J. Santiago Rodríguez Suárez, Emanuel Espinoza Navarrete . (2017). La industria solar fotovoltaica y fotosolar en México. Ciudad de México : ProMéxico .*
- *K. Mertens (2014). “Photovoltaics, Fundamentals, Technology and practice” Münster University of Applied Sciences, Germany Wiley*
- *Ktichin Chris, (2002) Solar Observing Techniques. Springer.*
- *Lorenzo, E. (2007). Electricidad Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos. Sevilla. Editorial PROGNSA.*

- *M. Enriquez (2018) “Estudio de las variaciones temporales a gran escala de la intensidad de los rayos cósmicos galácticos” Tesis, UNAM, Posgrado de ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica.*
- *M. Nabipour, M. Razaz, S. G. Seifossadat, and S. S. Mortazavi, (2016) “A new MPPT scheme based on a novel fuzzy approach,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 74.*
- *M. Shahrestani, R. Yao, E. Essah, L. Shao, A. C. Oliveira, A. Hepbasli, E. Biyik, T. del Caño, E. Rico, and J. L. Lechón (2017), “Experimental and numerical studies to assess the energy performance of naturally ventilated PV systems,” Sol. Energy, vol. 147.*
- *Medina, M. (2010). Generación de Energía Eléctrica con sistemas fotovoltaicos conectados a la red.. Madrid. Editorial Abecedario.*
- *Méndez, J. (2008). Energía Solar fotovoltaica. Madrid. Editorial Fundación Confemetal*
- *Michael E. Mackay. (2005). Solar Energy: An Introduction. Oxford Scholarship Online: Oxford University.*
- *Olgyay, A. Olgyay, V(1957). Solar control Shading devices. Princeton University Press*

- *Olindo Isabella, Klaus Jäger, Arno Smets, et. (2016). Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. Cambridge, England : UIT Cambridge Ltd.*
- *Pascual Reynaldo, López Minerva , Chable Luis A ., Loranca Y., Ledesma J. Idalia ., Zavala Aurora G., Martínez Ana Elena. (2020). Reporte del Clima en México . México : Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Aguas*
- *Peixoto, J. y Oort, A. (1992). Physics of climate. New York: AIP Press.*
- *Podewils, Ch. (2009) Diamantdraht zum Sägen, Photon, 4/2009, p. 77.*
- *Rehman, S. Halawani, T. (1997). Global Solar Radiation Estimation. Renewable energy, Ed. 12*
- *Reindl, D.T.; Beckman, W.A. y Duffie, J.A. (1990). Evaluation of hourly tilded surface radiation models. Solar energy.*
- *Repmann, T. (2003) Stapelsolarzellen aus amorphem und mikrokristallinem Silizium, Dissertation, Berichte des Forschungszentrums Jülich.*

- *S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri, (2013) “Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review,” Energy Procedia, vol. 33,*
- *S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri.(2013) “Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review,” Energy Procedia, vol. 33*
- *Sánchez Juárez, A., Martínez Escobar, D., Santos Magdaleno, R., Ortega Cruz, J. and Sánchez Pérez, P. (2017). Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial. 1st ed. Ciudad de México: IER*
- *Schmalensee, R. (2015). The future of solar energy: an interdisciplinary MIT study. Boston, Massachusetts: Energy Initiative, Massachusetts Institute of Technology*
- *Sollmann, D. (2009) Sechs Neuner sind das Ziel, Photon, 4/2009, p. 42–45*
- *Stix, M. (1990). The Sun. Springer. Segunda Ed.*

- *Sturrock, P. A., Mihalas, D. M., Ulrich, R. K (1986). Physics of the sun. Vol. 10. D. Reidel Publishing Company, primera Ed.*
- *Tonda, Juan (1993), El oro solar y otras fuentes de energía, México, Fondo de Cultura Económica, (colección “La ciencia para todos”).*
- *V. Domingo, I. Ermolli, P. Fox, C. Fröhlich, M. Haberreiter, N. Krivova, G. Kopp, W. Schmutz, S.K. Solanki, H.C. Spruit, Y. Unruh, A. Vögler, Solar surface magnetism and irradiance on time scales from days to the 11-year cycle. Space Sci. Rev. 145, 337–380 (2009).*
- *WEC. (2013). World Energy Resources: a summary. England, de World Energy Council*
- *Wells, N. (1999). The atmosphere and ocean: a physical introduction. New York: John Willey and Sons.*
- *White H. T.(1982). “Física Moderna”, V-I, Editorial UTEHA*

