

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA POR MEDIO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO  
INSTALADO EN UN ESTACIONAMIENTO DE UNA CADENA MAYORISTA**

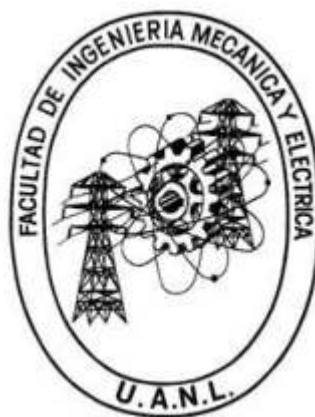
**Tesis presentada por:  
PATRICK WILLIAM MORRIS GARCIA**

**Como requisito parcial para obtener el grado de:  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA CON  
ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

**AGOSTO DE 2021**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y  
ELÉCTRICA



DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA  
POR MEDIO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO EN UN  
ESTACIONAMIENTO DE UNA CADENA MAYORISTA

POR

PATRICK WILLIAM MORRIS GARCIA

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS  
TÉRMICA Y RENOVABLE

AGOSTO DE 2021

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Determinación del potencial de generación eléctrica por medio de un sistema fotovoltaico instalado en un estacionamiento de una cadena mayorista", realizada por el estudiante Patrick William Morris García, con número de matrícula 1122671, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

**El Comité de Evaluación de Tesis**

Dr. Simón Martínez Martínez  
Director

Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León  
Revisor

M.C. Miguel García Yera  
Revisor

Dr. Héctor Daniel García Lara  
Revisor

Vo.Bo.

  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 3909

Ciudad Universitaria, a 5 de agosto de 2021.

# AGRADECIMIENTOS

A Adriana, mi familia y amigos. Su entusiasmo y apoyo han sido esenciales para mi formación profesional y personal.

A los doctores Simón Martínez y Fausto Sánchez, ya que gracias a su visión y liderazgo fue posible para un pequeño grupo de estudiantes, obtener una experiencia internacional.

También extendo este agradecimiento al Dr. Oscar A. de la Garza, responsable del programa de maestría. Su apoyo para la conclusión de este trabajo de investigación fue esencial.

Finalmente, a Mary, Stan y Brent, quienes hicieron todo lo posible para crear el ambiente adecuado para nuestra capacitación en el área de la administración del medio ambiente y, además, nos acercaron con organizaciones e individuos que están haciendo su parte para el mejoramiento de las prácticas y normas para un mejor desarrollo sustentable en diferentes industrias.

# DEDICATORIA

A todas las personas y organizaciones dedicadas a la protección del medio ambiente y en el desarrollo de tecnologías que lleven a una sociedad más sustentable.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>12</b>
<b>ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE</b>	<b>12</b>
2.1 Introducción	12
2.2 Estado energético de México	15
2.2.1 Sistema Eléctrico Nacional	19
2.3 Relación entre energía, clima y medio ambiente	21
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>27</b>
<b>ENERGÍA SOLAR</b>	<b>27</b>
3.1 Relación Sol-Tierra	27
3.2 Captación solar	35
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>39</b>
<b>SISTEMAS FOTOVOLTAICOS</b>	<b>39</b>
4.1 Introducción	39
4.2 Efecto fotoeléctrico	40
4.3 Sistemas fotovoltaicos	43
4.3.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos	45
4.3.1.1 Sistemas aislados	46
4.3.1.2 Sistemas interconectados a la red de suministro eléctrico	47

<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>48</b>
<b>ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO EN UN ESTACIONAMIENTO</b>	<b>48</b>
5.1 Características del sitio	48
5.2 Características del sistema	50
5.3 Metodología para la determinación de la capacidad de producción eléctrica	53
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>59</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 7</b>	<b>69</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>69</b>
7.1 Conclusiones	69
7.2 Recomendaciones	71
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>74</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>77</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>78</b>
<b>APÉNDICE A</b>	<b>84</b>
<b>APÉNDICE B</b>	<b>86</b>

# RESUMEN

El aprovechamiento de estacionamientos como áreas para la instalación de sistemas fotovoltaicos es propuesto en este trabajo mediante la determinación del potencial de generación eléctrica en un estacionamiento en la ciudad de León, Guanajuato.

Para realizar la estimación de generación eléctrica, se consideraron 1,680 módulos fotovoltaicos del modelo Q.PEAK DUO-G5 315-330W de la marca Q Cells, cada uno con capacidad de 330 W nominal, los cuales ocuparían un área de 4,200 m<sup>2</sup>, lo que representa una capacidad instalada de 554 kW.

A través de una simulación con el programa HOMER, propiedad de HOMER Energy, LLC, se determinó la variación existente en la generación eléctrica con respecto a la inclinación de instalación de los paneles solares, obteniendo una generación anual de 995,000 kWh a 0° de inclinación y un máximo de generación de 1,056,873 kWh/año con 21° de inclinación.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

La energía representa un factor de gran importancia para el desarrollo social y económico de los países. Sin embargo, la fuente principal de energía proviene de fuentes no renovables, como los combustibles fósiles, los cuales serán consumidos en su totalidad en un futuro.

México ha sido tradicionalmente un país petrolero, pero esta situación está destinada a cambiar en un futuro próximo debido a la decadencia de los pozos petroleros en el Golfo de México y, en consecuencia, el país requiere redireccionar sus esfuerzos hacia fuentes alternativas de energía.

La energía más abundante a la que se tiene acceso es la proveniente del Sol, y por tal motivo, es importante ser capaces de aprovechar dicha energía. Una de las formas más estudiadas es la tecnología fotovoltaica, la cual transforma la energía solar en eléctrica, mediante el uso de sistemas de celdas o paneles solares.

Sin embargo, se requieren áreas amplias y libres de obstáculos que puedan proyectar sombras sobre dichos sistemas. Esto limita su aplicación a gran escala a zonas alejadas de áreas metropolitanas, y a su vez, genera pérdidas adicionales de energía por concepto de la transmisión eléctrica.

Es notable que dentro de las ciudades se encuentran espacios amplios y en su mayoría, libres de estructuras generadoras de sombras, que son los estacionamientos de centros comerciales.

Estas áreas no representan ningún beneficio para los dueños de estos negocios, ya que, en lugar de construir una mayor área para el consumo y movimiento económico, se utilizan para estacionar temporalmente los vehículos de los clientes. Algunos centros comerciales ahora cobran una cierta cantidad por utilizar estas áreas y alivian en un porcentaje las pérdidas ocasionadas.

No obstante, los estacionamientos rara vez se encuentran a su máxima capacidad. Además, este tipo de cargos por uso del área no ha sido aplicable a supermercados, por ejemplo, y son quienes requieren de opciones que puedan convertir estas áreas en productivas.

## **HIPÓTESIS**

De acuerdo al tamaño común de los espacios destinados a estacionamientos, es posible instalar sistemas que cuenten con una capacidad de generación eléctrica mínima cercana a 1 GWh anualmente por estacionamiento aprovechado, lo que permitirá reducir la emisión de aproximadamente 500 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes anuales hacia la atmósfera.

## **OBJETIVO GENERAL**

Proponer el uso de estacionamientos como zonas de generación eléctrica mediante la instalación de plantas fotoeléctricas para aprovechar el recurso solar incidente sobre dichas áreas.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Conocer los valores del recurso solar disponible en el área de estudio, así como también sus condiciones climatológicas y ubicación.

- Obtener mediciones de la zona de interés para determinar el área total disponible para la instalación del sistema de generación eléctrica, por lo menos 500 kW de potencia instalada.
- Determinar la posición y distribución óptimas del sistema fotovoltaico, con lo cual se logre la mayor cantidad de producción eléctrica posible durante un año promedio.
- Desarrollar simulaciones utilizando el software HOMER Energy para calcular la capacidad de producción eléctrica anual posible a través de un sistema fotovoltaico.

# CAPÍTULO 2

## ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

### 2.1 Introducción

La energía es considerada como un factor primordial para la generación de riqueza y también como un componente sustancial para el desarrollo económico y tecnológico de los países [1]. Las fuentes de energía son esenciales para todas las transacciones humanas y sin ellas, nuestras actividades no pueden ser progresistas. Sin embargo, existe considerable evidencia sobre los impactos adversos que tienen las actividades humanas sobre el medio ambiente, siendo la combinación de diversos factores que causen estos efectos perjudiciales [2]. El aumento en las afectaciones sobre el medio ambiente se da debido al aumento de la población mundial, la cual se estima actualmente en un poco más de 7 mil 600 millones de personas mundialmente [3], las actividades energéticas (i.e. generación y consumo) y la actividad industrial.

En 2019, el consumo diario de petróleo en el mundo fue de 100 millones de barriles, aumentando de 85 millones en 2006 [4], lo que representa un incremento de casi 18 %. Se pronostica que la población mundial alcance 9.7 mil millones de personas para el año 2050 [5], por lo tanto, un aumento en los requerimientos energéticos es de esperarse.

El suministro total de energía primaria (tpes) mundial tuvo un aumento de 10,025,380 kilotoneladas de petróleo equivalentes (ktoe) en el año 2000 a 13,972,243 ktoe en 2017. Los combustibles fósiles representaron el 81.1 y 81.9 % de las fuentes de energía primaria, respetivamente. Mientras que el consumo total de energía pasó de 7,029,939 a 9,717,294 ktoe en el mismo periodo [6].

Anteriormente, muchos de los sistemas de control y de análisis ambientales se enfocaban en sustancias contaminantes convencionales, como óxido nitroso (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) y óxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Sin embargo, actualmente se consideran también sustancias químicas para los sistemas de control y monitoreo del aire. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el cual es resultado de la combustión de combustibles fósiles, tiene un rol significativo en el cambio climático, siendo responsable de aproximadamente dos tercios del efecto de invernadero [2].

En 1972, los países miembros de las Naciones Unidas se reunieron en Estocolmo y aprobaron 26 principios como guía para el desarrollo sustentable de la humanidad [7]. A continuación, se mencionan algunos principios relevantes:

- Principio 1: El hombre tiene el derecho fundamental a la libertad, a la igualdad, a condiciones de vida adecuadas y a un medio ambiente de calidad que le permita una vida digna y de bienestar, y él tiene la responsabilidad solemne de proteger y mejorar el medio ambiente para las generaciones presentes y futuras.
- Principio 5: Los recursos naturales no renovables de la Tierra deben ser utilizados de tal forma que sean protegidos de un futuro agotamiento y asegurar que los beneficios de su uso sean compartidos por toda la humanidad.

Estos principios fueron reafirmados en la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo [8] y adicionalmente, se reconoció que el desarrollo sustentable no puede lograrse sin cambios importantes en el sistema energético mundial. Se adoptó el Programa 21, el cual busca la creación de nuevas políticas y programas para aumentar la inclusión de sistemas de energía seguros para el medio ambiente.

En el informe *Nuestro futuro común*, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo determinaron que “el desarrollo sostenible como la

satisfacción de «las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades» [9].

La ONU [10] ha expresado su preocupación acerca de la lentitud del cambio hacia la producción y consumo sustentable y que, debido a esto, los impactos derivados del cambio climático están siendo más agresivos. Esto ocasiona afectaciones serias al crecimiento de la economía mundial, creando importantes retos financieros, sociales y ambientales.

Ante este panorama, en el reporte World Economic Situation and Prospects [10], se mencionan 17 objetivos para alcanzar un desarrollo sustentable. Se enuncian entre estas metas la necesidad de garantizar el acceso universal a energías asequibles, fiables, modernas y, sustentables, así como también, promover el acceso a un trabajo bien remunerado.

En el presente, uno de los factores más importantes a considerar es la energía y el problema más importante con ésta es la necesidad de proveerla de manera sustentable. Para alcanzar el desarrollo sustentable en la sociedad es necesario contar con un flujo seguro y eficiente de energía y también una utilización eficiente de las fuentes de energía.

Diseñar soluciones para los problemas ambientales requiere una visión al futuro de largo plazo para realizar las acciones necesaria con el fin de alcanzar un desarrollo sustentable. Las energías renovables se presentan como una de las soluciones más eficientes y efectivas para lograr estos objetivos.

Acelerar la transición hacia sistemas de energía renovables representa una gran oportunidad para lograr los objetivos para reducir las afectaciones al clima y al mismo tiempo, impulsar el crecimiento económico, creando empleos en áreas relacionadas con la energía y mejorando la calidad de vida [11].

## 2.2 Estado energético de México

Como se mencionó anteriormente, la energía es un componente primordial para el desarrollo social, sin embargo, existe una creciente preocupación con respecto a la seguridad energética, ya que la falta de la misma pone en riesgo la estabilidad económica de un país.

Estas afectaciones pueden observarse en las constantes fluctuaciones en los precios de los combustibles, especialmente el petróleo. A mediados de 2008, se reflejó un valor por encima de \$160.00 dólares por barril y un rápido decremento en su valor de más de \$100.00 dólares por barril a inicios de 2009, bajando hasta un precio de aproximadamente \$50.00 dólares por barril. Para abril de 2020, el precio por barril llegó cerca de 85 % menor al máximo alcanzado en 2008, en otras palabras, cada barril tiene un costo de \$20.00 dólares [12].

Estas fluctuaciones en el precio del petróleo crean un efecto dominó con aumentos en el costo de productos de la canasta básica, así como también, de productos manufacturados, demostrando que la energía es parte integral de nuestro estilo de vida.

En México como en el resto del mundo, también se han visto estos cambios bruscos de los precios del petróleo. Entre los años 2011 y 2013, se tuvieron precios por barril promedio de entre \$98.00 y \$101.00 dólares. Sin embargo, estas cantidades no han sido alcanzadas en los años posteriores, sino que hasta han bajado hasta los \$35.30 dólares por barril en el año 2016 [13]. En abril de 2020, la mezcla mexicana alcanzó su punto más bajo en los últimos 10 años, alcanzando un valor por debajo de \$0.00 dólares por barril [14].

Además de lo anterior, se ha experimentado un constante decremento en la producción de energía (Figura 2.1). En 2010, se produjeron aproximadamente 10,000 PJ de energía, mientras que al término de 2008 únicamente se alcanzó a

generar 6,484.84 PJ, lo que representa un 35.16 % de reducción. Además, el consumo nacional de energía de 2008 a 2018 fue de 8,300 PJ y 9,236.86 PJ respectivamente, un incremento cercano a 11.28 %. Esto quiere decir que para el final de 2018 se produjo 29.8 % menos energía de la necesaria para el consumo interno [13].

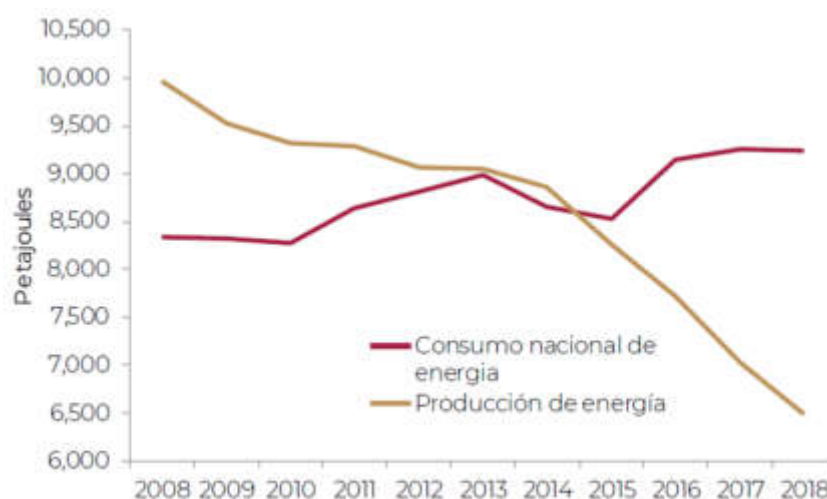


Figura 2.1 Evolución en la generación y consumo de energía en México [13].

En consecuencia, el país ha tenido que depender de la compra de energía proveniente del exterior (Figura 2.2), reduciendo así su índice de independencia energética de 1.2 en 2008 a 0.70 en 2018 [13]. Este valor demuestra que México se encuentra en un estado de riesgo para su desarrollo, ya que no tiene la capacidad de producir la energía necesaria para solventar la demanda actual de las actividades productivas del país y, por lo tanto, tampoco cuenta con la capacidad para su progreso.



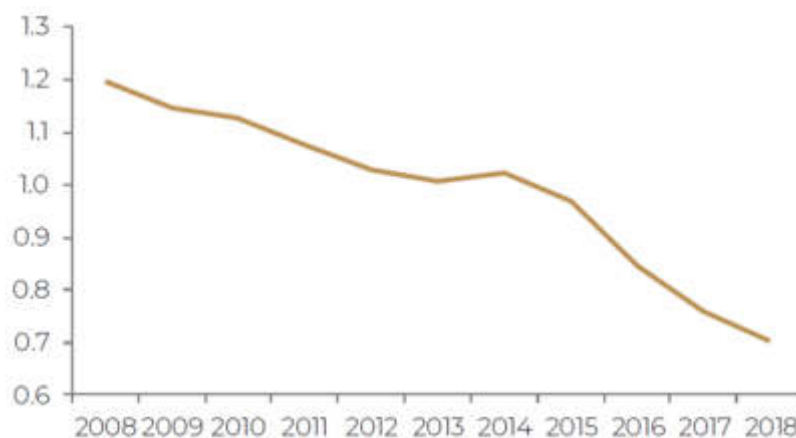


Figura 2.2 Cambio en el índice de independencia energética de México [13].

De acuerdo a la Secretaría de Energía (SENER) [13], el 82.9 % de la energía producida proviene de los hidrocarburos, sin embargo, éste se redujo en 28.4 % de 2012 a 2018, lo que afectó gravemente el acceso interno de energía y, en consecuencia, aumentaron las importaciones. La Figura 2.3 muestra la distribución de la producción de energía primaria en el país.

#### Distribución de energía primaria en México 2018

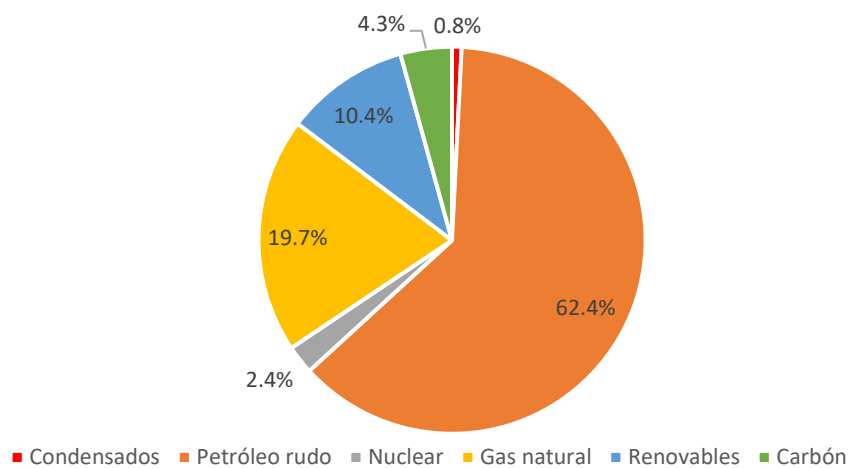


Figura 2.3 Distribución de energía primaria en México en 2018.

Como se mencionó anteriormente, el total de energía consumida por el país en 2018 fue 9,236.86 PJ. De esta cantidad, el 34.4 % fue utilizado para llevar a cabo actividades dentro del sector energético, mientras que 59.4 % representa el consumo final [13].

Porcentaje de consumo final por sector

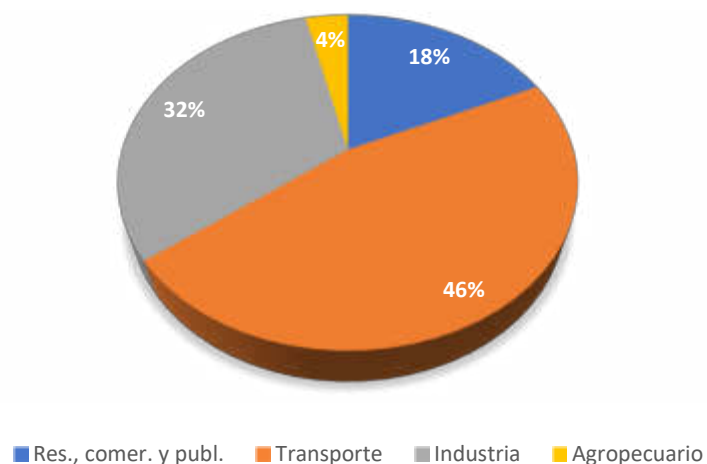


Figura 2.4 Porcentaje de consumo final de energía por sector.

Como se puede observar en la Figura 2.4, el transporte consumió la mayor cantidad de energía, seguida por la industria, el sector residencial, comercial y público, y el área con menor carga energética fue la agropecuaria.

En su encuesta poblacional, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportó una población total de 119,938,473 personas en 2015 [15] y se espera que esta cantidad aumente a 148,134,871 para el año 2050 [16]. El aumento de población hará que las necesidades energéticas del país aumenten a menos que mejore la forma en que se utiliza actualmente la energía, lo que representa uno de los retos principales dentro de la política pública.

### 2.2.1 Sistema Eléctrico Nacional

En el país, existen dos distinciones para las tecnologías de generación eléctrica: convencionales y limpias [17]. Las primeras son aquellas que operan a través de la quema de combustibles fósiles y que, además, no poseen sistemas de captura y confinamiento de CO<sub>2</sub>; las segundas se distinguen por no rebasar los límites establecidos de emisiones o residuos, en caso de existir. Para el caso de la generación eléctrica, las disposiciones regulatorias dicen que las emisiones de CO<sub>2</sub> deberán ser menores a 100 kg/MWh generado [18].

Debido a los cambios en las leyes energéticas del país, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha perdido la facultad para ser la única productora de energía eléctrica al permitir el ingreso a particulares al ramo, quienes de acuerdo a sus intereses pueden recibir alguno de los siguientes permisos de generación: autoabastecedores (AUT), cogeneradores (COG), pequeños productores (PP), importadores (IMP), exportadores (EXP) y productores independientes de energía (PIE) [17].

En 2018, se contó con una capacidad efectiva instalada de generación de 70,053 MW [19]. Esta capacidad estuvo distribuida entre la CFE y todos los permisionarios existentes en ese año. En la Figura 2.5 se muestra la distribución de generación entre las diferentes tecnologías [17].

### Distribución de generación por tecnología

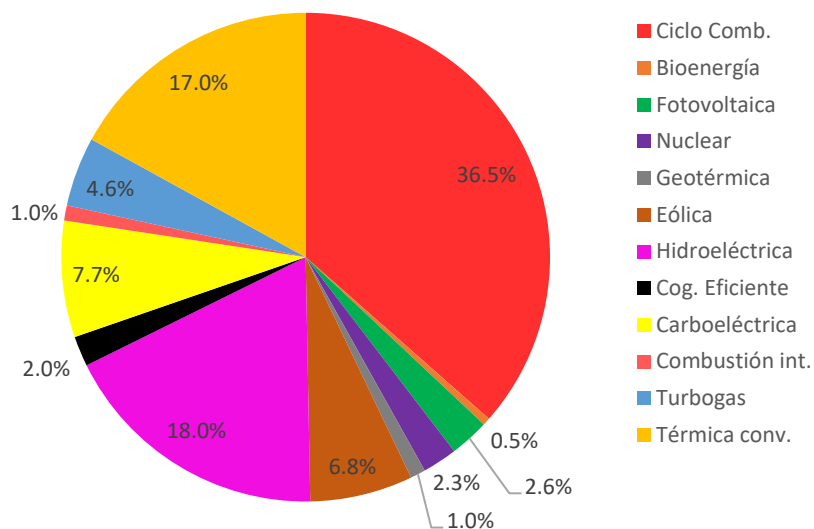


Figura 2.5 Distribución de generación eléctrica por tecnología.

De igual forma, la producción de electricidad ha ido en aumento año con año. En 2014 la generación de energía eléctrica fue 280,365 GWh mientras que al final de 2018 se logró una generación de 317,278 GWh, lo que representa un aumento de 13.1 %. Estas cantidades de producción eléctrica, conforme a los nuevos reglamentos de la industria eléctrica nacional, son una combinación de la generación bruta de la CFE y de la electricidad neta recibida por todos los permisionarios conectados a la red eléctrica nacional. Es importante tener en cuenta que la energía producida por los permisionarios no es enviada en su totalidad a la red eléctrica, ya que parte de esta energía es utilizada para su propio consumo y, por lo tanto, solo los excedentes son suministrados a la red. Son estos excedentes los considerados en la generación de energía eléctrica mencionados.

En la Tabla 2.1 se muestra el incremento de la generación eléctrica por tecnología en el país, la cual considera la generación total por parte de CFE y la energía neta suministrada por particulares [20].

Tabla 2.1 Progreso de la generación de energía eléctrica (GWh).

<b>Tecnología</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
Hidroeléctrica	38,875	30,858	30,847	31,903	32,436
Geotérmica	6,000	6,331	6,150	6,041	5,375
Eólica	7,189	8,991	10,295	10,451	12,434
Fotovoltaica	83	45	151	349	2,175
Bioenergía	341	362	408	587	599
Nuclear	9,677	11,577	10,567	10,883	13,555
Cogeneración ef.	2,634	3,519	4,310	5,892	6,964
Ciclo combinado	139,350	144,624	150,597	159,553	161,973
Térmica conv.	37,682	39,713	40,795	43,594	41,730
Turbogas	3,422	6,301	8,183	7,594	8,565
Combustión int.	1,499	1,740	1,915	1,967	2,127
Carboeléctrica	33,613	33,599	34,208	30,557	29,345

Se pronostica que para el año 2033 se instalen 70,313 MW de capacidad de generación eléctrica, de los cuales 56 % corresponde a tecnologías limpias y el 44 % restante se alcanzaría con generación mediante la quema de combustibles fósiles [20].

### **2.3 Relación entre energía, clima y medio ambiente**

En el pasado no se consideraba a los eventos y fenómenos climatológicos como interconectados con las fuentes de energía, pero durante las últimas cuatro décadas esta relación se ha vuelto aparente. La utilización de combustibles fósiles ha saturado la atmósfera con elementos adicionales, especialmente CO<sub>2</sub>.

A partir del siglo XIX y con la llegada de la revolución industrial, el aumento de emisiones de efecto invernadero hacia la atmósfera ha elevado sus concentraciones a un ritmo peligroso y que ha causado un aumento en la temperatura promedio de la Tierra. Este ritmo de calentamiento ha sido

investigado y ha sido comprobado que no se asemeja a ningún fenómeno natural ordinario [21].

La cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera se ha elevado en mayor medida gracias al uso de combustibles fósiles, pero también a otros factores como el incremento de la población, del consumo y del uso de la tierra. Este aumento presenta un riesgo mayúsculo para la humanidad y si se continúa con este ritmo, se pronostica que habrá eventos climatológicos muy extremos, como sucede ya en algunas partes del mundo.

Se estima que en 2017 se emitieron a la atmósfera 32,840 Mt CO<sub>2</sub> mundialmente por la quema de combustibles [6], siendo esto un aumento de 60 % en comparación con lo registrado en 1990 (Figura 2.6). Las fuentes que contribuyeron mayormente a las emisiones registradas fueron 1) carbón, 2) petróleo y, 3) gas natural.

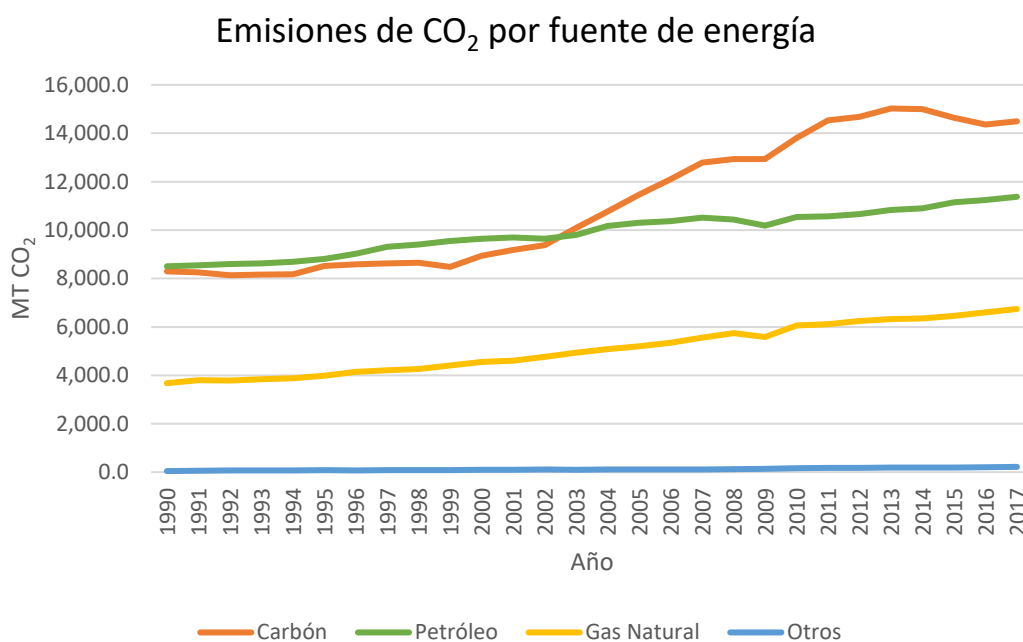


Figura 2.6 Emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> por fuente de energía.

Un punto de llamar la atención es el aumento acelerado de las emisiones provenientes del carbón, las cuales se incrementaron de 8,296 a 14,502 Mt CO<sub>2</sub> en este periodo, lo que representa un 74.8 % de diferencia. Este acrecentamiento se debe a la puesta en marcha de plantas de generación a base de carbón en China.

Sin embargo, existen dos puntos a observar. El primer punto está relacionado con las emisiones provenientes del carbón y el petróleo, las cuales eran prácticamente iguales en 1990, pero a diferencia del carbón, las emisiones por consecuencia del uso de petróleo aumentaron únicamente 33.7 % para el año 2017. El segundo punto que puede notar es el aumento en el uso de gas natural, ya que las emisiones provenientes de esta fuente aumentaron en un 83.3 %, subiendo de 3,677 a 6,743 Mt CO<sub>2</sub>.

Por su parte, México tuvo un aumento de 71.6 % en sus emisiones de CO<sub>2</sub> entre 1990 y 2017 (Figura 2.7). Al igual que en los datos mundiales, el petróleo fue la fuente de emisión que tuvo menor crecimiento, mientras que el gas natural y el carbón exhibieron los mayores incrementos, inclusive siendo muy superiores a lo registrado mundialmente, siendo estos aumentos de 312.5 y 340 %, respectivamente [6].

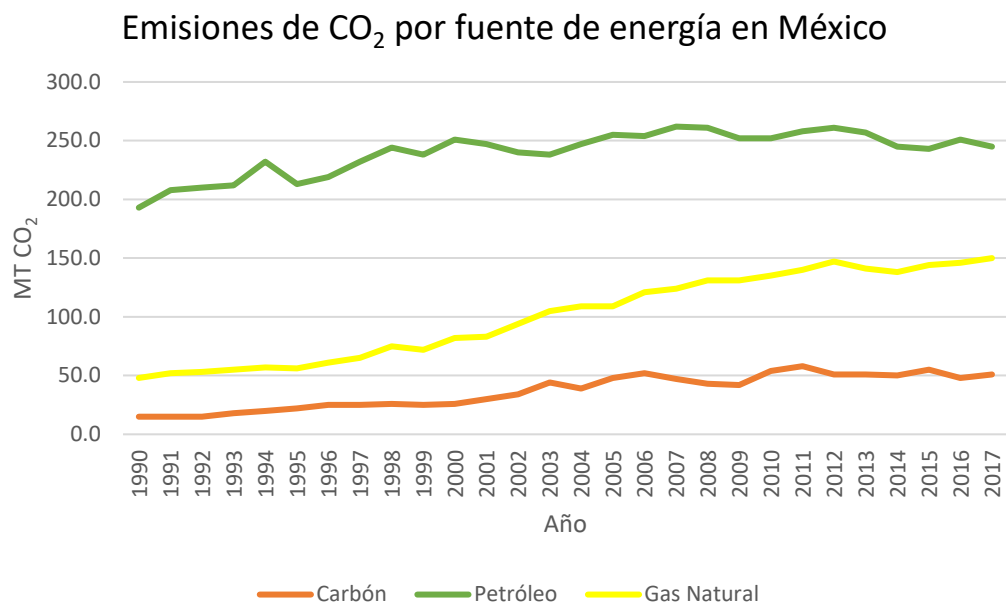


Figura 2.7 Emisiones de CO<sub>2</sub> por fuente de energía en México.

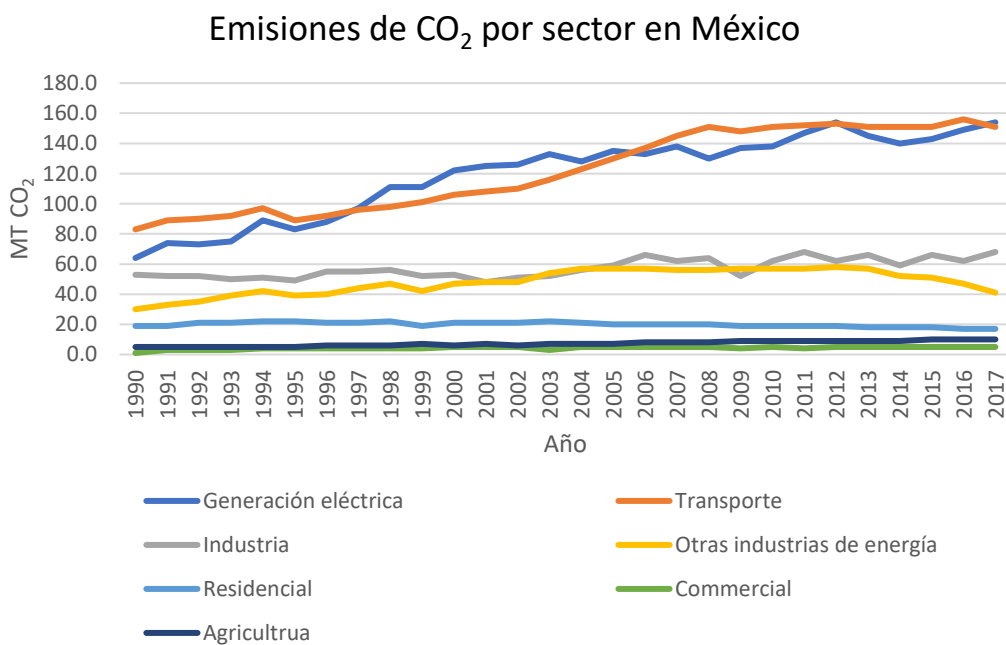


Figura 2.8 Emisiones de CO<sub>2</sub> por sector en México.



Como se logra apreciar en la Figura 2.8, los sectores de transporte y de generación eléctrica son las que han aumentado significativamente su aportación en la emisión de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera y como se mencionó anteriormente, se espera que para el año 2033, se incorporen al Sistema Interconectado Nacional (SIN) 70,313 MW de nueva capacidad generación de eléctrica [20], lo que conlleva un aumento en las emisiones contaminantes.

Una forma de atacar el problema es mediante la aplicación de fuentes de energía renovables, permitiendo controlar las emisiones de efecto invernadero hacia la atmósfera y alcanzar niveles de concentración manejables. Sin embargo, esto requiere de la cooperación internacional para el diseño de soluciones factibles.

Desafortunadamente, en los países en vías de desarrollo la demanda energética representa la fuente principal de contaminación. Los gases más peligrosos que son emitidos: CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CFCs y O<sub>3</sub>. Estos gases son responsables de problemas como lluvia ácida, destrucción de la capa de ozono, baja calidad del aire, degradación ambiental, etc.

En caso de seguir con el ritmo actual de emisiones de efecto invernadero, el límite de temperatura establecido de 1.5 a 2 °C por encima de los niveles anteriores a la industrialización será rebasado, ocasionando cambios extremos en el clima y en los efectos por el cambio climático [22].

Los incidentes climatológicos son en la actualidad riesgos serios para la sociedad, ya que impactan a la salud, al acceso a alimento y agua, así como a la economía, infraestructura y biodiversidad. Además, el cambio climático perjudica los servicios que proporcionan los ecosistemas y puede afectar los patrones de uso de recursos naturales, como también la distribución de dichos recursos [23].

En resumen, se puede enunciar que los retos energéticos globales son contrarrestar el cambio climático, lograr cumplir con las necesidades creciente de energía y, mantener la seguridad energética. La energía solar representa una tecnología efectiva que puede ser empleada de manera inmediata para ayudar en el control de emisiones nocivas. El uso de energías renovables reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, disminuye la contaminación del aire localmente, puede crear fuentes de trabajo de alta remuneración económica y, evita la dependencia en la importación de petróleo.

El desarrollo sustentable para una sociedad requiere un suministro sustentable de energía y también, un uso eficiente de los recursos naturales. Por esta razón, la energía solar es una alternativa importante para el futuro.

# CAPÍTULO 3

## ENERGÍA SOLAR

### 3.1 Relación Sol-Tierra

El Sol ha sido un importante componente en la historia del sistema solar y de la Tierra, ya que el Sol es en gran medida responsable por la creación de los combustibles fósiles y las energías renovables. Este seguirá siendo su rol hasta que el final de la vida del planeta, la cual se calcula será en alrededor de  $5 \times 10^9$  años [24].

Este cuerpo es una esfera de materia gaseosa extremadamente caliente formada por diferentes capas de gas, siendo su diámetro exterior de  $1.39 \times 10^9$  m. La temperatura de la capa exterior es aproximadamente 5760 K de cuerpo negro, sin embargo, el centro puede encontrarse a  $20 \times 10^6$  K. El ritmo de emisión de energía es de  $3.8 \times 10^{23}$  kW, pero de esta cantidad, únicamente  $1.7 \times 10^{14}$  kW es interceptada por la tierra, que se encuentra a una distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  m (Figura 3.1) [25].

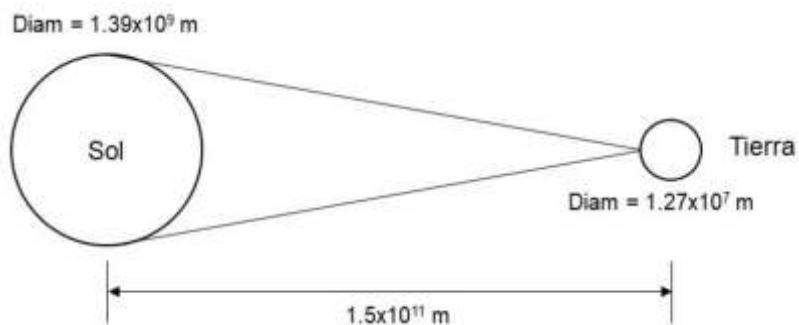


Figura 3.1 Distancia media entre la Tierra y el Sol.

Se acepta que el Sol es un reactor de fusión nuclear, en donde tres átomos de hidrógeno son convertidos en un átomo de helio. Debido a que la masa del

núcleo de helio es menor a la masa de cuatro protones, parte de la masa excedente se libera durante la reacción convirtiéndose en energía electromagnética y enviada a todas direcciones [26].

La forma en que el Sol emite radiación está cercanamente ligada a la radiación de cuerpo negro de Planck, en la cual la densidad de energía por unidad de área ( $w_\lambda$ ) como función de la longitud de onda ( $\lambda$ ) está dada por:

$$w_\lambda = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad 3.1$$

donde:

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ W s}^2 \text{ (constante de Planck)}$$

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s (velocidad de la luz en el vacío)}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K (constante de Boltzmann)}$$

$$T = \text{temperatura de cuerpo negro en K}$$

Esta ecuación entrega la densidad energética en la superficie del Sol en  $\text{W/m}^2$  por unidad de longitud de onda en metros. Sin embargo, debido a la relación geométrica entre la Tierra y el Sol, la densidad energética existente en su superficie decrece significativamente al viajar 150 millones de kilómetros y llegar a los límites exteriores de la atmósfera terrestre, llegando a un valor resultante de  $1,367 \text{ W/m}^2$ , a esto se le conoce como la radiación solar extraterrestre o la constante solar ( $I_0$ ).

La constante solar no es igual durante todo el año debido a que la Tierra gira alrededor del Sol sobre una trayectoria elíptica y, por lo tanto, la distancia que separa a ambos cuerpos cambia continuamente. La variación de la distancia entre ambos cuerpos puede calcularse de la siguiente forma [27]:

$$d = 1.5 \times 10^{11} \left\{ 1 + 0.017 \left[ \frac{360(n - 93)}{365} \right] \right\} \quad 3.2$$

donde:

$d$  = distancia entre la Tierra y el Sol en m.

$n$  = día del año, siendo enero 1 el primer día.

Esta relación se presenta gráficamente en la Figura 3.2:



Figura 3.2 Posición diaria de la Tierra con respecto del Sol.

Una aproximación para la variación diaria de la radiación que recibe un plano orientado normal a los rayos solares (ver Figura 3.3) puede calcularse utilizando la siguiente ecuación [1]:

$$G_{\text{día}} = G_o \left[ 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right] \quad 3.3$$

donde:

$G_o = 1,367 \text{ W/m}^2$  Constante solar

$n$  = día del año, siendo enero 1 el primer día.

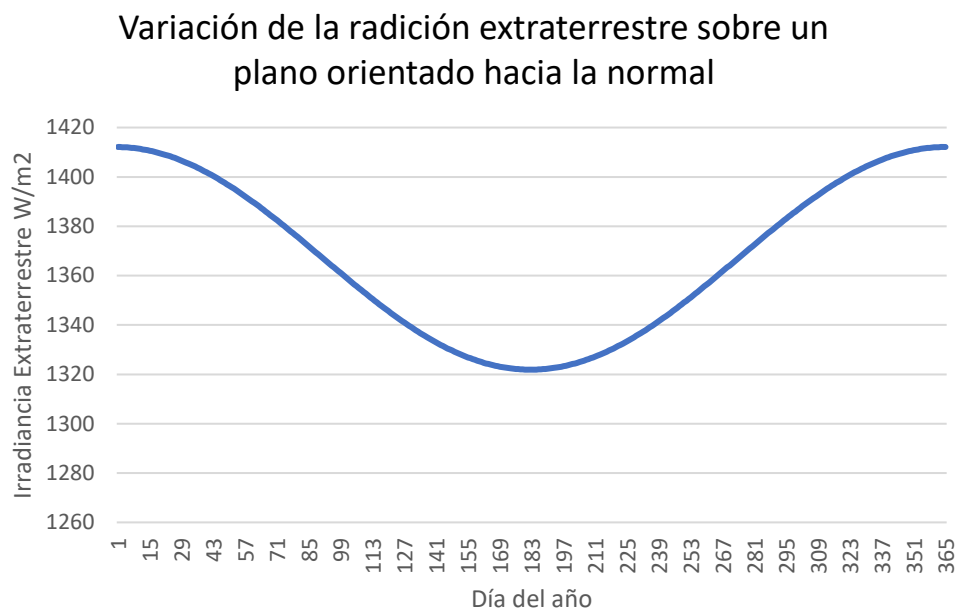


Figura 3.3 Variación de la radiación extraterrestre sobre un plano orientado hacia la normal.

La energía solar es la fuente de energía más abundante de la Tierra. Se estima que la cantidad de energía que recibe el planeta es de 5,000 veces más grande que la suma de todas las demás energías [28]. Sin embargo, no toda la energía proveniente del Sol es absorbida, de hecho, 30 % es reflejada nuevamente al espacio, 47 % es convertida en calor de temperatura baja e irradiada nuevamente al espacio, y 23 % mueve los ciclos de evaporación y precipitación en la Tierra (ver Figura 3.4) [25].

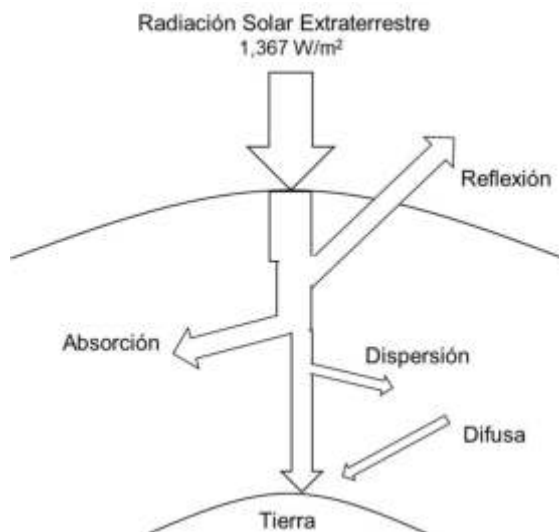


Figura 3.4 Diagrama de la atenuación de la radiación solar extraterrestre a su paso por la atmósfera.

Como se puede ver en la Figura 3.4, la irradiancia que toca la superficie terrestre es menor a la irradiancia extraterrestre y esto se debe a la interacción de las ondas electromagnéticas provenientes del Sol con la atmósfera, ocasionando una división de la irradiancia total que recibe la superficie del planeta. La radiación que llega al suelo terrestre sin prácticamente ser afectada se llama radiación directa, mientras que aquella que es dispersada debido a las moléculas en el aire se le conoce como radiación difusa; la suma de éstas resulta en la irradiancia total recibida por una superficie en la tierra y su valor depende de: 1) el espesor de la capa de ozono, 2) la distancia que viaja la luz solar a través de la atmósfera hasta llegar a la superficie, 3) la cantidad de partículas, agua, etc. en el aire y 4) en la cantidad y densidad de las nubes.

Se considera que la luz solar que llega de manera vertical a regiones localizadas a nivel del mar atraviesa una masa de aire designada como AM 1, momento en el cual el Sol se encuentra en el punto más alto en el cielo; este punto es llamado cenit. Cuando el Sol está posicionado en su cenit, la irradiancia que llega a la superficie de la tierra es de aproximadamente  $1,000 \text{ W/m}^2$ . Es claro

que para zonas que se encuentren arriba del nivel del mar, la masa de aire por la que debe pasar la luz del Sol de manera vertical será menor a 1.

Las Figuras 3.5 y 3.6 [29] muestran el recurso solar mundial a través de dos mediciones, la irradiación normal directa y la irradiación horizontal global.

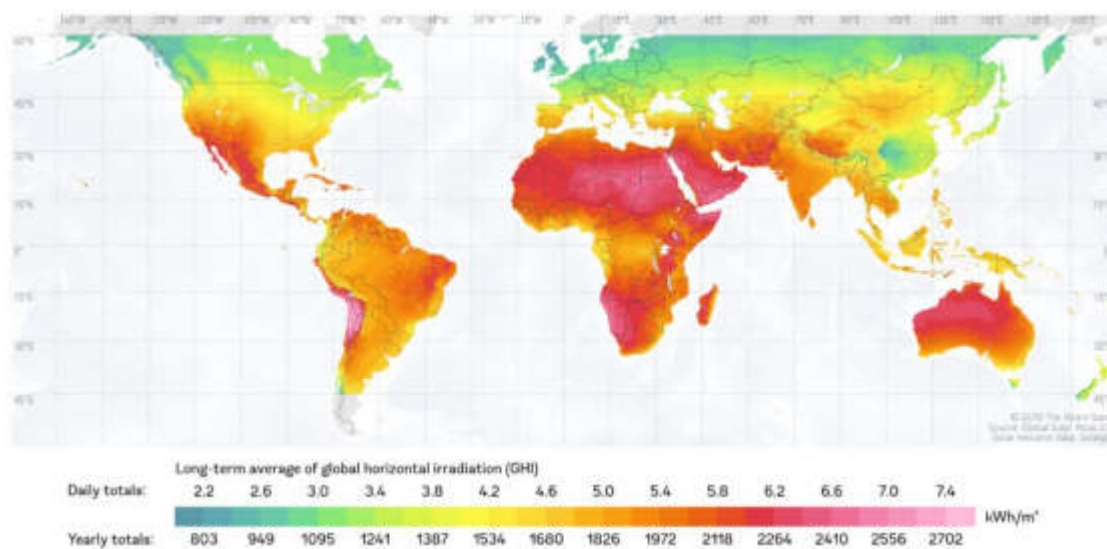


Figura 3.5 Irradiación solar horizontal global promedio a largo plazo [29].

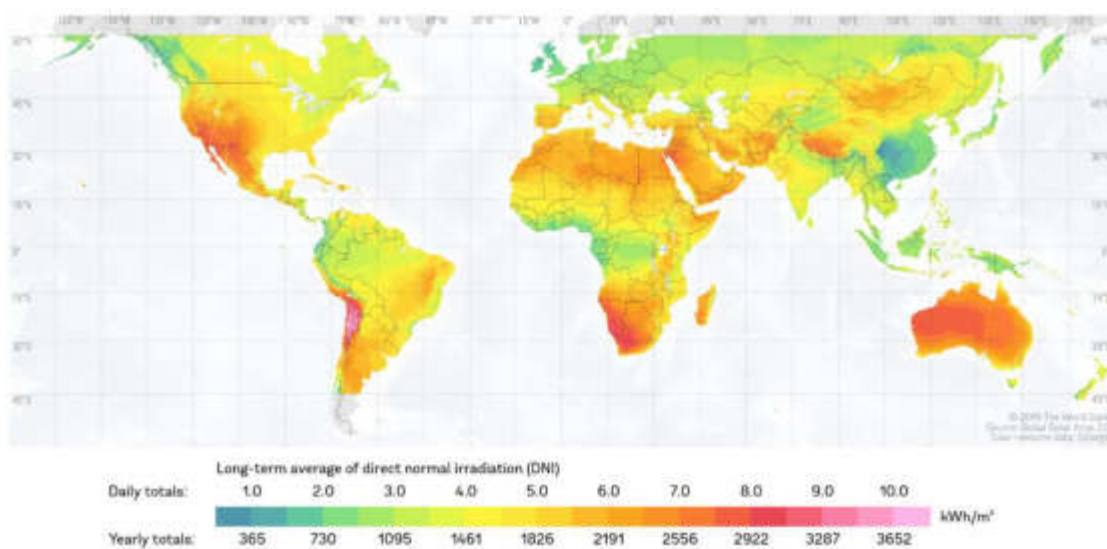


Figura 3.6 Irradiación solar directa global promedio a largo plazo [29].



Se puede observar que las regiones ubicadas en las latitudes entre 15 y 35°, ya sean norte o sur, cuentan con una mayor irradiación que el resto de las zonas geográficas. Esto es debido a que el eje de rotación de la Tierra tiene una inclinación de 23.45° y, durante su rotación alrededor del Sol, la posición en el cielo de este último con respecto de la línea ecuatorial se ve afectada. Este movimiento del Sol relativo al ecuador, llamado también declinación solar, puede determinarse de la siguiente forma [25]:

$$\delta_s = 23.45 \sin \left[ \frac{360(n + 284)}{365} \right] \quad 3.4$$

donde:

$\delta_s$  = declinación solar

$n$  = el día del año, siendo enero 1 el primer día

La declinación solar varía entre -23.45° y 23.45°, los cuales son observadas el 21 de diciembre (solsticio de invierno) y 21 de junio (solsticio de verano), respectivamente (Figura 3.7).

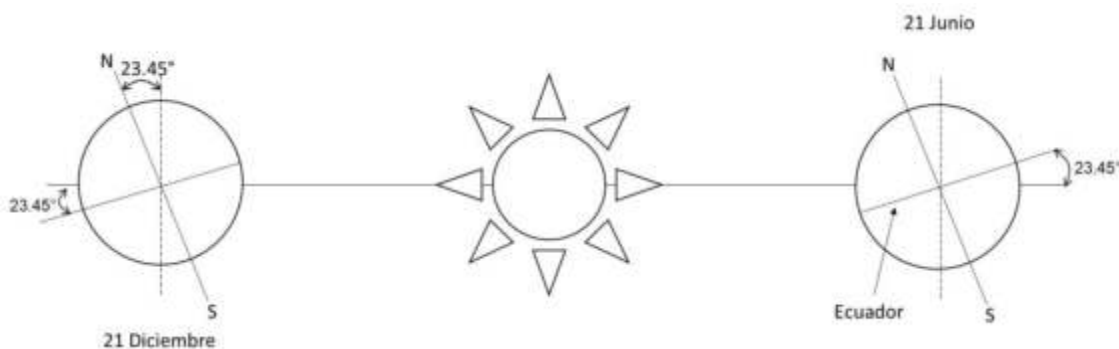


Figura 3.7 Declinación del Sol con respecto de la línea ecuatorial en los solsticios.

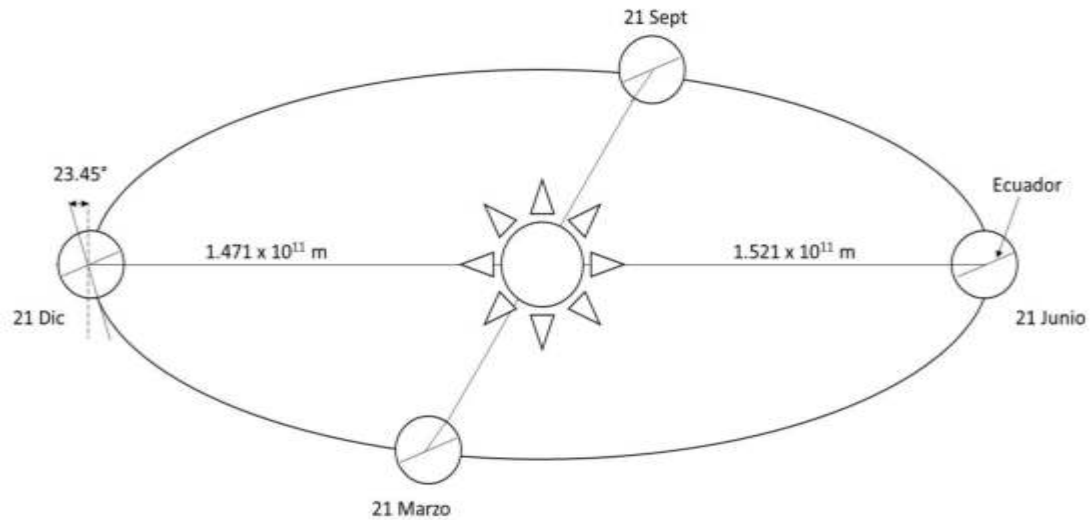


Figura 3.8 Declinación del Sol durante el año.

Como se puede observar en la Figura 3.8, al momento de los equinoccios, primavera y otoño, el Sol tiene una inclinación de  $0^\circ$  con respecto de la línea ecuatorial. Es posible determinar que, de primavera a otoño, el Sol se encontrará posicionado por arriba del ecuador, mientras que de otoño a primavera se encontrará por debajo del ecuador. Por esta razón, en el hemisferio norte, los días son más largos en verano y más cortos en invierno. Lo inverso sucede en el hemisferio sur. Esto es posible verificarlo en la Figura 3.9, en donde los ángulos positivos reflejan la posición del Sol arriba del ecuador y, por debajo con ángulos negativos.

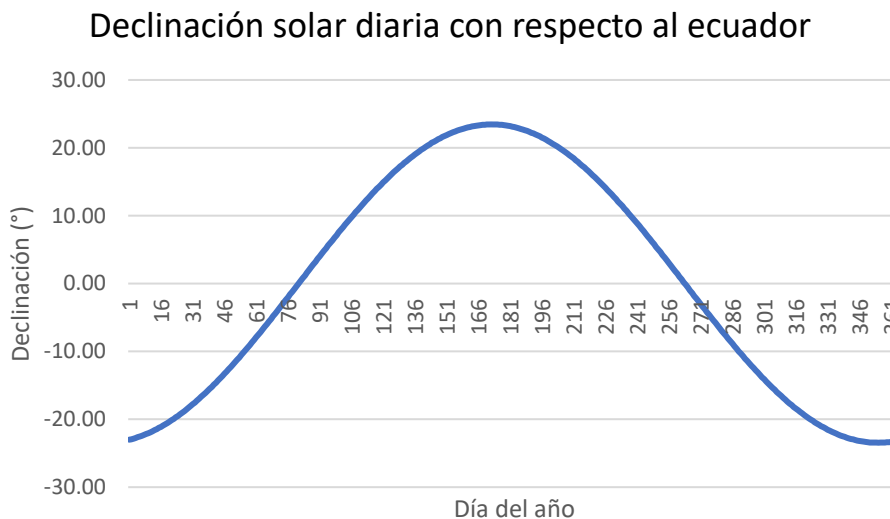


Figura 3.9 Declinación solar diaria con respecto al ecuador.

### 3.2 Captación solar

Existen diferentes métodos a elegir cuando se desea instalar un sistema que capture la radiación solar. Posiblemente, uno de las maneras más sencillas es simplemente posicionar el colector horizontalmente, sin embargo, esta orientación no absorbe la mayor de cantidad de radiación posible debido a que el componente de la radiación directa es proporcional al coseno del ángulo entre el haz de luz incidente y el vector normal al plano del colector (ver Figura 3.10), por lo que la totalidad de energía absorbida se encontrará entre  $\cos\Phi$  y 1.

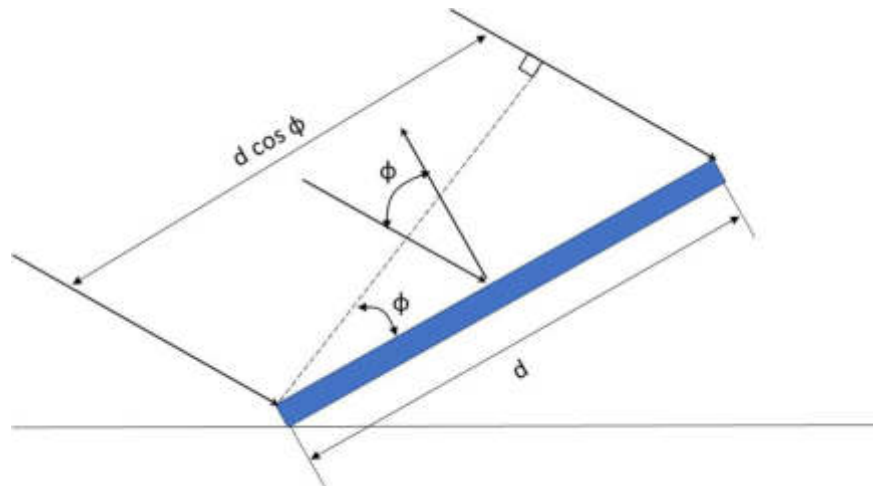


Figura 3.10 Relación entre la captación solar y  $\cos\Phi$ .

Ya que el ángulo cenit ( $\theta_c$ ), ángulo medido entre la vertical y la posición del Sol define la ubicación del Sol al mediodía solar, el colector se encontrará posicionado de forma perpendicular al Sol en el mediodía solar si fuera orientado perpendicularmente al ángulo cenit. Es este momento el Sol se encontrará en el punto más alto durante el día y, en consecuencia, la luz solar pasará por la menor cantidad de masa de aire para el día en cuestión.

Para calcular este ángulo se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\theta_c = L - \delta \quad 3.5$$

donde:

$L$  = Latitud del sitio

$\delta$  = declinación solar

Sin embargo, el colector se encontrará prácticamente en posición perpendicular a los rayos del Sol únicamente durante 2 horas; posteriormente, la intensidad del haz de luz disminuye debido al incremento de la masa de aire que debe cruzar y también porque el ángulo entre los rayos del Sol y la normal del colector aumenta.

El colector puede colocarse de tal manera que se obtenga el mejor desempeño de recolección de energía solar durante una estación del año o para una recolección óptima anual. Para lograr esto, únicamente se debe determinar el valor promedio de la declinación solar para una determinada estación del año. Como se observó anteriormente, el comportamiento de la declinación es senoidal, siendo su amplitud de  $23.45^\circ$ , equivalente a los grados de inclinación del eje de rotación de la Tierra. Por lo tanto, la amplitud media entre primavera y otoño es de  $14.93^\circ$ , mientras que entre otoño y primavera es de  $-14.93^\circ$ .

Entonces, si se desea el mejor desempeño de recolección solar sobre un plano inclinado en verano, dicho plano debe estar posicionado con un ángulo de  $L - 15^\circ$  con respecto de la horizontal, mientras que para invierno este ángulo deberá ser  $L + 15^\circ$ . En caso de requerir el mejor comportamiento en primavera, otoño o anual, entonces la orientación del colector debe ser igual a la latitud.

Derivado de lo anterior, es posible diseñar el sistema de montaje con diferentes ángulos de ajuste, para que de este modo el colector se encuentre en la mejor posición de acuerdo a la estación del año. Esta decisión debe ser tomada de acuerdo a las necesidades energéticas del sitio, así como también de las características geográficas.

Debido a que se acepta orientar los sistemas de recolección solar acorde a un desempeño estacional o anual [30], existen tablas de irradiación solar para colectores montados a ángulos de  $L$ ,  $L + 15^\circ$  y  $L - 15^\circ$ , como se puede observar en la Tabla 3.1 para la Ciudad de México.

Tabla 3.1 Irradiación solar mensual promedio en kWh/m<sup>2</sup> para la Ciudad de México (Sandia National Laboratories).

<b>Mes</b>	<b>Latitud – 15°</b>	<b>Latitud</b>	<b>Latitud + 15°</b>
Enero	4.32	4.90	5.23
Febrero	6.24	6.86	7.11
Marzo	7.71	7.99	7.86
Abril	6.22	6.07	5.64
Mayo	5.93	5.57	4.97
Junio	4.94	4.58	4.06
Julio	4.92	4.60	4.10
Agosto	5.43	5.22	4.78
Septiembre	5.00	5.04	4.84
Octubre	4.45	4.82	4.87
Noviembre	4.50	5.06	5.36
Diciembre	4.51	5.23	5.68
Prom. anual	5.36	5.50	5.38

Es posible también diseñar un sistema de montaje con la capacidad de seguir el movimiento del Sol, es decir, que dicho sistema pueda moverse en dos dimensiones. Utilizando este tipo de aplicación, el sistema siempre se encontrará perpendicular a la luz solar y, por lo tanto, es factible incrementar la absorción de energía solar hasta de un 25 a 50 % [31], pero el costo es mucho mayor a un sistema fijo.

Existe otro tipo de sistema que puede ser aplicado para la recolección de energía solar, uno que solo tenga un grado de libertad, en otras palabras, con la capacidad de variar su posición solamente en una dirección. En estos casos, el ángulo de inclinación del colector se mantiene fijo y el sistema únicamente podrá rotar sobre su propio eje. De esta manera, la superficie del colector estará siempre dirigido hacia el azimut del Sol. Con este método, un sistema instalado a un ángulo igual a la latitud del sitio absorbe hasta un 95 % de la irradiación anual que recogería un sistema de rastreo con 2 ejes de movimiento [31].

# CAPÍTULO 4

## SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

### 4.1 Introducción

La conversión fotovoltaica representa la conversión directa de la luz solar en electricidad sin la intervención de una máquina térmica. Los dispositivos fotovoltaicos son unidades de estado sólido, y por tal motivo, tienen un diseño robusto y simple, requiriendo mantenimiento mínimo.

Una de sus ventajas más importantes es su aplicación en sistemas que no pueden ser suministrados por una red de transmisión eléctrica convencional y que, por lo tanto, requieren de una solución que pueda proporcionar la energía requerida de manera independiente. Además, estos sistemas pueden ser diseñados con capacidades desde microwatts hasta gigawatts. Derivado de lo anterior, han sido empleados para suministrar energía en una gran variedad de aparatos y máquinas, como relojes, calculadoras, sistemas de bombeo, satélites, etc.

Debido a que una celda fotovoltaica requiere iluminación para producir energía, este tipo de sistemas comúnmente requieren algún tipo de almacenamiento de energía para los momentos en que la iluminación sea inexistente o insuficiente. Normalmente, este tipo de almacenamiento se obtiene mediante el uso de baterías recargables. Sin embargo, en aplicaciones situadas dentro de áreas conurbadas, el sistema de almacenamiento no es necesario, ya que este papel lo toma la red de energía eléctrica mediante un sistema de interconexión.

Este último ha sido responsable, en gran medida, del crecimiento de la generación eléctrica fotovoltaica, ya que la demanda energética y los costos de la misma han ido en aumento en todos los sectores, por lo que la producción de electricidad con sistemas fotovoltaicos ha apoyado en la reducción de los costos por el consumo eléctrico de los hogares, la industria y los municipios.

Además, debido a que la producción de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos se encuentra en la proximidad de donde será utilizada dicha energía, las pérdidas inherentes a la transmisión y distribución son reducidas y, por lo tanto, la fiabilidad del sistema aumenta.

## **4.2 Efecto fotoeléctrico**

Como se sabe, un átomo consiste de un núcleo alrededor del cual orbitan electrones. A estos electrones se les atribuyen niveles de energía específicos dependiendo de la órbita en la que se encuentre cada uno de ellos. Los electrones distribuidos en la órbita más cercana al núcleo tienen menor energía, mientras aquellos en la última órbita (banda de valencia) poseen una mayor energía; son éstos últimos que toman parte en la interacción con otros átomos.

Algunos de los electrones en la banda de valencia tienen mucha energía que en ocasiones suben a un nivel más arriba, colocándolos prácticamente fuera de la atracción del núcleo, por lo que una pequeña cantidad de energía externa hará que se separen del átomo. Son estos electrones los responsables de conducción de calor y electricidad, y esta banda exterior se le conoce como banda de conducción. La diferencia entre la energía de un electrón en la órbita más cercana al núcleo y la banda de valencia se llama banda prohibida.

Los materiales que poseen sus bandas de valencia llenas tienen bandas prohibidas superiores a 3 eV [32] y son categorizados como materiales aislantes. Por otro lado, los materiales con bandas de valencia prácticamente vacías se les



nombrados conductores. Finalmente, los materiales con bandas de valencias medianamente llenas son semiconductores y son éstos los utilizados en la producción de celdas solares.

Los semiconductores pueden modificarse o doparse con otros materiales para formar dos tipos distintos de semiconductores, los tipo  $n$  y tipo  $p$ . Los semiconductores tipo  $n$  son aquellos que son dopados con átomos pentavalentes, esto es, que poseen cinco electrones en su banda de valencia, en contra parte, los tipo  $p$  se forman al agregar al semiconductor átomos trivalentes.

Debido a esta interacción entre los átomos, en los semiconductores tipo  $n$  se obtienen electrones libres y en los tipo  $p$  se obtienen huecos (ver Figura 4.1).

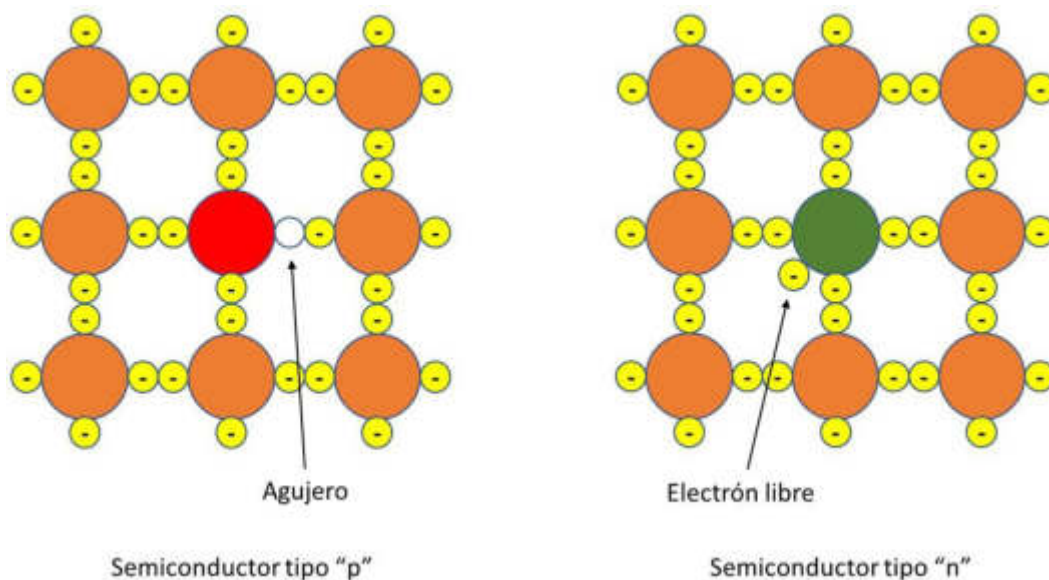


Figura 4.1 Obtención de huecos y electrones libres al dopar silicio.

Cuando un semiconductor tipo  $n$  y uno tipo  $p$  son unidos se forman la conocida unión PN. En esta situación, los electrones libres encontrados en el semiconductor tipo  $n$  se transportan hacia el semiconductor tipo  $p$  y llenan los huecos, ocasionando que el material se encuentre cargado positivamente en el

lado *n* y cargado negativamente en el lado *p* de la unión como se puede observar en la Figura 4.2.

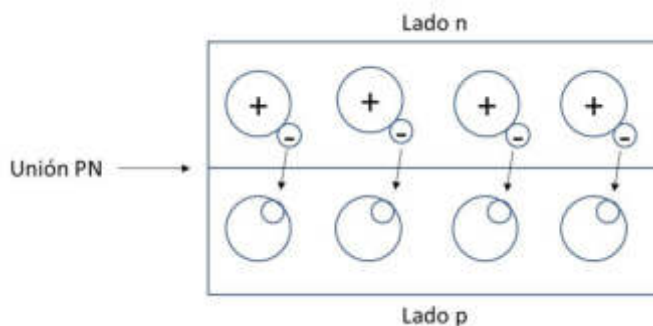


Figura 4.2 Movimiento de los electrones libres en el lado *n* hacia los huecos en el lado *p*.

La carga negativa en el lado *p* evita el movimiento de electrones hacia este material. Caso contrario en el lado *n*, en donde el traslado de electrones se facilita debido a la carga positiva que posee. Estas restricciones en los movimientos de los electrones ocasionan que la unión PN se comporte como un diodo.

Cuando un semiconductor PN es expuesto a luz, fotones son absorbidos por los electrones de los átomos y la energía de los electrones aumenta en proporción a la energía del fotón absorbido. Si la energía del fotón es igual y mayor a la energía de la banda prohibida, entonces el electrón podrá moverse hacia la banda de conducción y alcanzar el lado *n* del material, haciendo que los espacios creados migren al lado *p*.

Sin embargo, si la energía del fotón es menor que la banda prohibida, el electrón no tendrá la energía suficiente para llegar a la banda de conducción, obteniendo únicamente un aumento en la temperatura.

Un fotón, sin importar su alta energía, únicamente puede liberar un electrón, razón por la cual la eficiencia de conversión de luz a energía eléctrica

es muy baja en celdas fotovoltaicas y, por lo tanto, se requiere un área suficientemente amplia para alcanzar un alto potencial de producción de energía eléctrica.

### **4.3 Sistemas fotovoltaicos**

Una celda fotovoltaica es el componente clave para la generación de energía eléctrica mediante la absorción de luz, sin embargo, una celda típica tiene una capacidad de producción eléctrica menor a 5 W con un voltaje aproximado de 0.5 V de corriente directa ( $V_{CD}$ ). Esta característica impide que puedan ser utilizadas individualmente en aplicaciones en donde se requiere una alta potencia.

Para obtener un voltaje de salida más adecuado, estas celdas individuales son conectadas entre sí en serie. Al hacer esto, se produce un panel fotovoltaico de más de 300 W de potencia, pero aún con este aumento de 6,000 % con respecto a una celda solar, no es suficientemente alto para las necesidades de energía en los hogares o la industria. Al igual que con las celdas solares, los paneles se conectan unos con otros para formar arreglos o sistemas fotovoltaicos (Figura 4.3) que, dependiendo de la cantidad de paneles con los que cuente dicho arreglo, permite alcanzar potencias mayores a 1,000 MW, como en el caso del parque fotovoltaico Tengger Desert Solar Park, localizado en China (Figura 4.4), el cual cuenta con una capacidad de 1,547 MW [33].

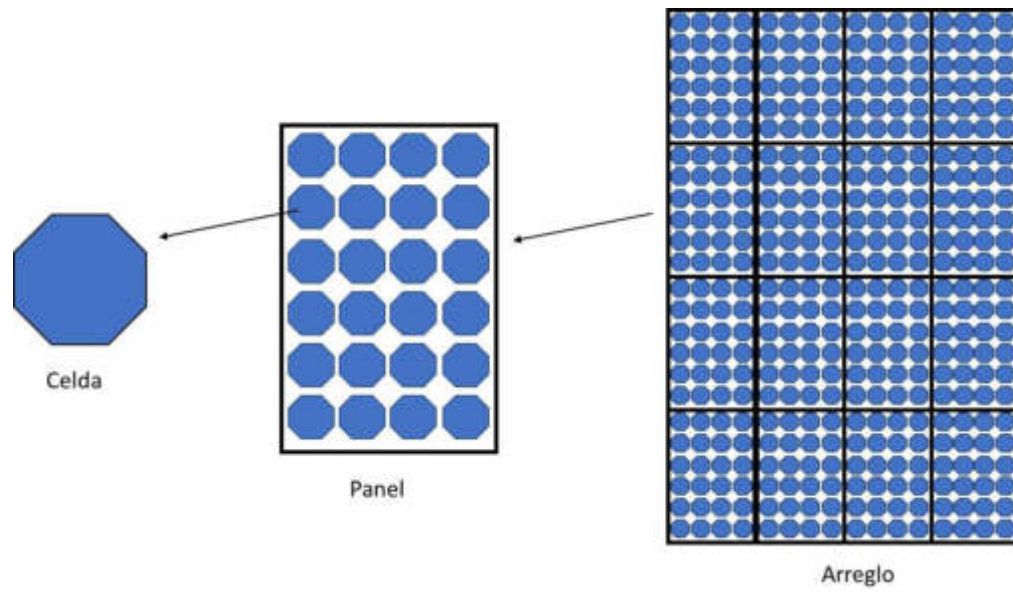


Figura 4.3 Conformación de módulos y sistemas fotovoltaicos.

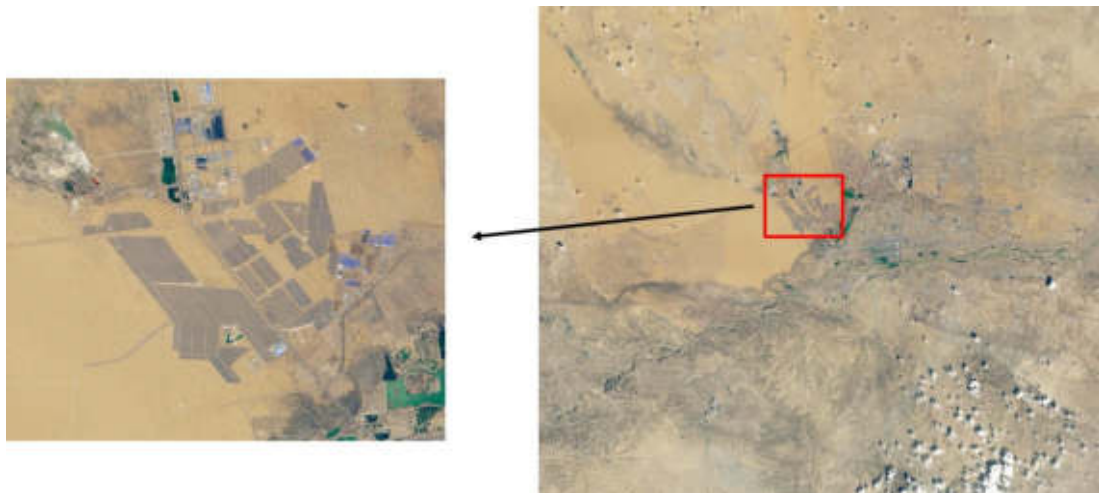


Figura 4.4 Parque fotovoltaico Tengger Desert Solar Park vista desde el espacio [34].

En México, por otro lado, la central de generación solar más grande se encuentra en Viesca, Coahuila y tiene una capacidad instalada de 754 MW [35], siendo a su vez, la central más grande en todo el continente.

No obstante, debido a la distancia entre el sitio de generación de electricidad y la localización, un porcentaje de la energía se pierde por su transmisión y distribución. En México, la longitud total de la Red Nacional de Transmisión es de 108,018 km, mientras que la Red General de Distribución cuenta con 838,831 km de líneas eléctricas; entre ambas, se acumulan pérdidas de energía por aproximadamente un 16 % [17].

Además de lo anterior, es importante recordar que las celdas solares generan electricidad de corriente directa, por lo tanto, las capacidades de generación de plantas fotovoltaicas son reportadas en esos mismos términos, lo que a su vez implica un porcentaje de pérdida adicional para su conversión en electricidad de corriente alterna.

Una manera de reducir las pérdidas derivadas por las grandes distancias de transmisión, es ubicar el centro de generación en la proximidad del área de consumo. Los sistemas fotovoltaicos permiten estas acciones sin la necesidad de construcciones complejas para su instalación, y pueden ser diseñados para cubrir necesidades distintas.

#### **4.3.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos**

De acuerdo a los requerimientos, los sistemas fotovoltaicos pueden ser categorizados en sistemas aislados e interconectados. La selección debe realizarse bajo las necesidades del consumidor y a las características climáticas y topográficas del sitio.

#### **4.3.1.1 Sistemas aislados**

La dificultad de llevar la red de energía eléctrica a lugares con difícil acceso y alejados de los centros de producción de la energía, da la oportunidad para utilizar sistemas fotovoltaicos a una fracción del costo.

El método aislado es una aplicación la cual, debido a cuestiones económicas, no es factible realizar los trabajos e instalación de torres de transmisión para el suministro de energía eléctrica a comunidades muy alejadas de la red eléctrica.

Ya que los sistemas fotovoltaicos únicamente pueden producir electricidad durante el día, es necesario contar con una forma de almacenar la energía generada durante el día. Regularmente, este almacenamiento se da por medio de un banco de baterías, pero es posible utilizar otras formas de almacenamiento, por ejemplo, mediante la producción de hidrógeno, bombeando agua y almacenándola como energía potencial.

La selección del tipo de almacenamiento de energía es inherente al uso final que se le dará a la misma. Si el objetivo final es la irrigación, entonces el almacenamiento de agua río arriba es la mejor opción, pero si se desea mantener una casa iluminada y con la capacidad de utilizar los electrodomésticos, posiblemente un banco de baterías sea lo idóneo.

La decisión de utilizar este método debe ser limitado a situaciones en donde la red eléctrica es inaccesible, ya que la necesidad de utilizar un banco de baterías incrementa el costo de este tipo de sistemas contra aquellos interconectados con la red eléctrica.

#### **4.3.1.2 Sistemas interconectados a la red de suministro eléctrico**

A diferencia de los sistemas aislados, los sistemas interconectados no requieren de un almacenamiento propio del sistema, ya que esta responsabilidad es tomada por la red eléctrica local y, por esta razón, este método es el más común en áreas conurbadas.

En estos sistemas, la energía generada durante el día es consumida por el usuario y, cualquier excedente de electricidad no utilizada es alimentada a la red eléctrica, dando un saldo positivo al usuario.

En las noches, el usuario consume electricidad directamente de la red. La cantidad de kWh que consume en ese periodo es descontada del saldo que generó durante el día.

Al final de cada periodo de facturación, se realiza un balance entre la energía alimentada a la red de distribución y la energía consumida de la red, dando como resultado una disminución considerable en cobro final del periodo para el usuario.

Un punto a considerar para los sistemas interconectados a la red eléctrica, es el momento en el cual se desea o necesita la mayor cantidad de generación fotovoltaica, ya que, de acuerdo a la tarifa contratada, el precio por kWh puede ser constante durante todo el día o incrementarse en las horas pico de consumo, como sucede con las tarifas industriales. Por lo tanto, es posible que la máxima generación fotovoltaica no sea requerida al mediodía solar, sino más bien, en las horas pico de consumo determinadas por la empresa de distribución eléctrica.

# **CAPÍTULO 5**

## **ESTIMACIÓN DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO EN UN ESTACIONAMIENTO**

### **5.1 Características del sitio**

El presente proyecto está localizado en la ciudad de León, Guanajuato, la cual se encuentra en la zona del bajo mexicano, específicamente, a  $21^{\circ}07'22''$  latitud norte y  $101^{\circ}41'00''$  de arco de longitud [36].

El clima en esta región es templada y presenta una temperatura promedio anual de  $19.2^{\circ}\text{C}$ , siendo  $35.3$  y  $0^{\circ}\text{C}$  la temperatura máxima y mínima, respectivamente. Las temperaturas media de cada mes del año se muestran en la Tabla 5.1 y fueron calculadas con datos obtenidos de [37].



Tabla 5.1 Temperatura media mensual en °C para León, Guanajuato.

<b>Mes</b>	<b>Temperatura media (°C)</b>
Enero	12.5
Febrero	16.7
Marzo	19.3
Abril	20.7
Mayo	22.4
Junio	20.7
Julio	20.0
Agosto	19.4
Septiembre	19.2
Octubre	18.4
Noviembre	15.4
Diciembre	13.1
Promedio anual	18.2

Además, la zona es beneficiada con un recurso solar anual promedio de 6.312 kWh/m<sup>2</sup>-d para un plano horizontal [38], lo que aunado a la temperatura máxima, otorga una certeza de la viabilidad de proyectos solares fotovoltaicos.

En la Tabla 5.2, se muestran los valores de irradiación global horizontal mensual promedio para la zona seleccionada [39].

Tabla 5.2 Irradiación global horizontal para León, Guanajuato.

<b>Mes</b>	<b>Irradiación global horizontal (kWh/m<sup>2</sup>-d)</b>
Enero	5.053
Febrero	5.988
Marzo	7.077
Abril	7.715
Mayo	7.634
Junio	7.019
Julio	6.700
Agosto	6.641
Septiembre	5.923
Octubre	5.841
Noviembre	5.333
Diciembre	4.821
Promedio anual	6.312

## 5.2 Características del sistema

Como se mencionó anteriormente, el sistema de generación eléctrica propuesto está ubicado en un estacionamiento perteneciente a un comercio mayorista, el cual tiene la ventaja de no ser afectado en demasía por sombras, ya que éstas provienen principalmente de las lámparas de iluminación del mismo estacionamiento, por lo cual, es posible reposicionarlas para lograr la eliminación de dichas afectaciones.

La Figura 5.1, muestra una toma aérea del sitio propuesto para la instalación del sistema fotovoltaico.



Figura 5.1 Vista del estacionamiento, en dirección norte-sur, mostrando (en rojo) las áreas de instalación para los módulos fotovoltaicos.

En la Figura 5.1, se observan siete diferentes áreas sombreadas de color rojo. Estas zonas corresponden a la ubicación de los cajones de estacionamiento y es donde se plantea la colocación de los paneles. La instalación de estos elementos será de tal forma que realicen una doble función; la primera, generar electricidad para alimentar al negocio y/o a la red de distribución eléctrica, y la segunda, proporcionar sombra a los vehículos de los clientes de dicho establecimiento. De esta manera, se consigue utilizar de manera productiva un área que de otro modo representaría un pasivo.

Cada una de las áreas está compuesta por dos filas de 24 cajones cada una, dando un total de 48 cajones por zona y 336 totales para el estacionamiento. Cada cajón tiene una dimensión de 2.5 m de ancho y 5 m de largo, por lo que cada fila tiene una dimensión de 60 x 5 m. Con esta distribución se tiene un área de instalación potencial de 4,200 m<sup>2</sup>.

Los módulos solares considerados en este estudio corresponden al modelo Q.PEAK DUO-G5 315-330 (ver Apéndice A), los cuales son producidos por Q Cells y pueden tener una potencia nominal de 315, 320, 325 o 330 W. Las dimensiones del panel solar en consideración son 1,000 x 1,685 mm (Figura 5.2). Para el caso de estudio, se tomó el modelo con capacidad nominal de 330W.

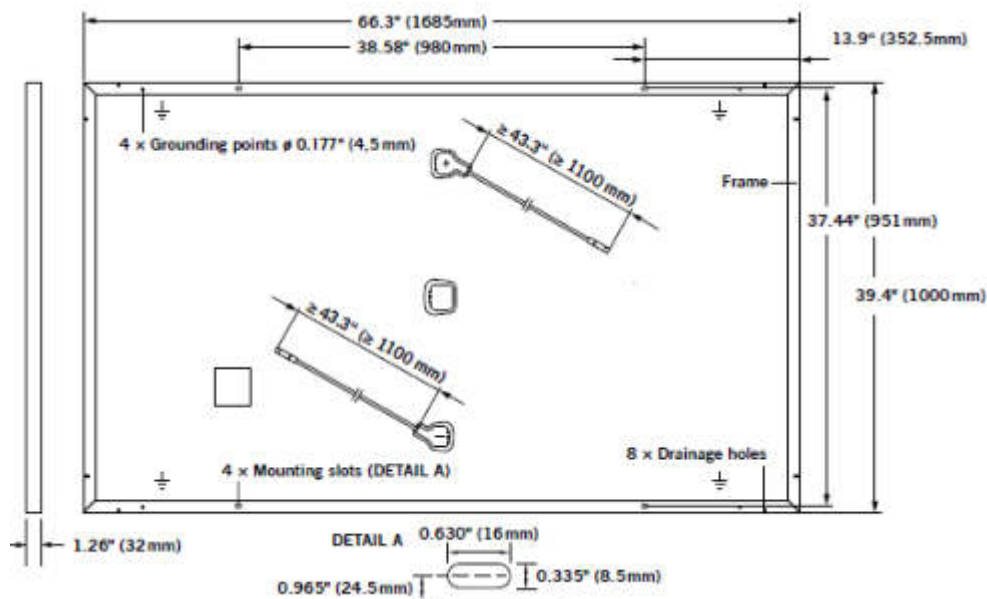


Figura 5.2 Dimensiones del módulo fotovoltaicos Q.PEAK DUO-G5 315-330.

Con el objetivo de obtener el mayor número de módulos por fila, se plantea un techo en forma de T con una sola inclinación de 15° con respecto de la horizontal. De esta forma, se alcanzaría una instalación de 120 paneles por fila, 240 por zona y 1,680 en total (Figura 5.3), obteniendo así una capacidad instalada de 554.4 kW en un área efectiva de 2,830 m<sup>2</sup>.

Adicionalmente, debido a la ubicación del estacionamiento, este tipo de techo resulta el más adecuado, ya que es posicionar todos los paneles fotovoltaicos de tal manera que estén dirigidos hacia el sur.

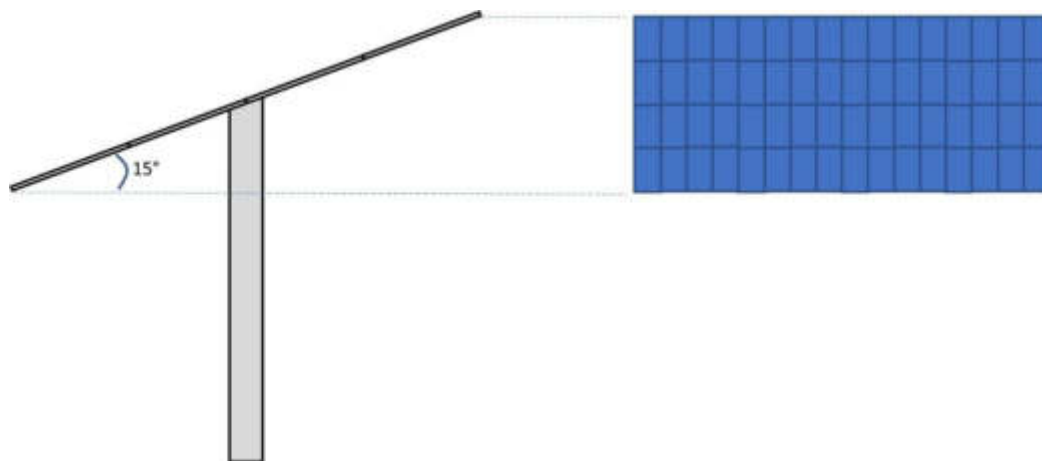


Figura 5.3 Diagrama de inclinación para los módulos fotovoltaicos.

### 5.3 Metodología para la determinación de la capacidad de producción eléctrica

Para calcular el potencial de generación eléctrica del sistema propuesto en este trabajo, se utilizó el simulador HOMER, el cual es un producto de HOMER Energy, LLC. La versión del programa en donde se llevaron a cabo los cálculos fue la 2.68 con número de serie 2fq608s7.

HOMER es un modelo de optimización que ayuda a simplificar el diseño y evaluación de sistemas de potencia independientes y también, aquellos conectados a una red de distribución eléctrica. Este programa cuenta con la capacidad de analizar una amplia variedad de configuraciones y aplicaciones, ya sea utilizando una sola fuente de potencia o un sistema híbrido.

El software simula la operación del sistema realizando un balance de energía para cada hora dentro un periodo de un año. En cada hora, HOMER compara las demandas eléctricas y térmicas contra la energía que el sistema puede suministrar en ese momento, y también, el flujo de energía de entrada y salida en cada uno de los componentes del sistema.

Este programa permite también la comparación de diferentes configuraciones y combinaciones de los sistemas de generación eléctrica. Por lo que es posible contrastar 2 o más tipos de sistemas y elegir aquella que otorgue los mayores beneficios dentro de los parámetros suministrados al programa.

Para el caso de esta investigación, los datos climáticos y de radiación solar requeridos para realizar las simulaciones y obtener los resultados de generación eléctrica fueron extraídos de diversas fuentes, las cuales se enuncian a continuación:

- Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL) [38];
- Atlas Nacional de Zonas con alto potencial de Energías Limpias (AZEL) [38], y;
- National Renewable Energy Laboratory (NREL) [37]

Como se mencionó en la sección 5.2, se seleccionó el módulo fotovoltaico Q.PEAK DUO-G5 315-330 con potencial nominal de 330 W de la marca Q Cells. Las características de operación pueden verse en el Apéndice A.

Los valores de temperatura promedio en la Tabla 5.1 fueron calculados con información contenida en la base de datos de la National Solar Radiation Database (NSRBD) [39], la cual registra la temperatura en ciclos de 30 minutos durante la totalidad de un año para la latitud y longitud de estudio.

AZEL e INEL por su parte cuentan con información de irradiación solar horizontal global, directa y difusa para todo el territorio nacional, lo que permitió la simplificación en la obtención de dichos datos.

Los datos recopilados de estas fuentes fueron introducidos en HOMER para realizar los cálculos y determinar la generación eléctrica potencial del área estudiado.

La manera en que HOMER logra calcular el potencial de generación eléctrica por medio de un sistema fotovoltaico es siguiendo la Ecuación 5.1 [26]:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left( \frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 - \alpha_P (T_c - T_{c,STC})] \quad 5.1$$

donde:

$Y_{PV}$  = capacidad nominal del arreglo fotovoltaico en kW

$f_{PV}$  = porcentaje de desempeño del sistema

$\bar{G}_T$  = radiación solar incidente en cada paso temporal

$\bar{G}_{T,STC}$  = radiación solar incidente en condiciones de prueba estándar

$\alpha_P$  = coeficiente de temperatura de potencia

$T_c$  = temperatura de la celda fotovoltaica en cada paso temporal

$T_{c,STC}$  = temperatura de la celda en condiciones de prueba estándar

Como puede notarse, existen dos variables que cambian con respecto del tiempo;  $T_c$  y  $\bar{G}_T$ , por lo que es necesario calcularlas y HOMER realiza estas operaciones de manera automática.

Para obtener la temperatura de la celda fotovoltaica en cada paso temporal la siguiente ecuación es utilizada:

$$T_c = T_a + G_T \left( \frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{T,NOCT}} \right) \left( 1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha} \right) \quad 5.2$$

donde:

$G_T$  = radiación solar incidente total sobre el arreglo fotovoltaico

$\eta_c$  = eficiencia en la conversión a energía eléctrica del sistema

$\alpha$  = coeficiente de absorción solar del sistema

$\tau$  = coeficiente de transmisión solar

$T_a$  = temperatura ambiente

$T_{c,NOCT}$  = temperatura nominal de la celda en operación (NOCT)

$T_{a,NOCT}$  = temperatura ambiente a la que se establece NOCT

$G_{T,NOCT}$  = radiación solar a la que se establece NOCT

En [26], se afirma que debido a que el término  $\eta_c/\tau\alpha$  es muy pequeño al compararlo con la unidad, es posible considerar el valor de  $\tau\alpha$  como 0.9 sin que esto genere un error significativo.

El programa supone que el sistema fotovoltaico se encuentra controlado por un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT). Este controlador electrónico, incorporado al inversor, permite a los sistemas fotovoltaicos operar de manera óptima al maximizar la eficiencia en la producción de energía eléctrica en todas las condiciones a las que pueda encontrarse expuesto.

La salida de potencia y eficiencia de una fotocelda, y por ende, del mismo panel solar, depende directamente de la intensidad de la radiación solar, la temperatura ambiente y la carga conectada a ella. El MPPT encuentra el punto de operación más adecuado para garantizar que la conversión fotoeléctrica se realice con la mayor eficiencia posible.

Por lo anterior, el programa de simulación HOMER, considera que este tipo de controlador se encuentra integrado al sistema fotovoltaico, lo que en consecuencia permite establecer que la eficiencia de la celda será siempre igual a la eficiencia en el punto de operación determinado por el MPPT ( $\eta_{mp}$ ).

Sin embargo,  $\eta_{mp}$  es dependiente también de la temperatura  $T_c$ , así que el programa introduce la siguiente expresión a la Ecuación 5.2 para el cálculo de la temperatura de la celda en cada paso temporal.

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,STC} [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad 5.3$$



donde:

$\eta_{mp,STC}$  = eficiencia del punto máximo de potencia bajo condiciones de prueba estándar

$\alpha_p$  = coeficiente de temperatura de potencia

$T_{c,STC}$  = temperatura de la celda bajo condiciones de prueba estándar

Al hacer la sustitución, la ecuación para el cálculo de la temperatura de la celda resulta en:

$$T_c = \frac{T_a + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left( \frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left[ 1 - \frac{\eta_{mp,STC} (1 - \alpha_p T_{c,STC})}{\tau \alpha} \right]}{1 + (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left( \frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left( \frac{\alpha_p \eta_{mp,STC}}{\tau \alpha} \right)} \quad 5.4$$

Con respecto a la radiación solar incidente en cada paso temporal  $\bar{G}_T$ , el programa calcula su valor aplicando la siguiente ecuación:

$$\bar{G}_T = (\bar{G}_b - \bar{G}_d A_i) R_b + \bar{G}_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + \bar{G}_d \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad 5.5$$

donde:

$\bar{G}_b$  = radiación directa

$\bar{G}_d$  = radiación difusa

$A_i$  = índice anisotrópico

$R_b$  = relación entre la radiación directa sobre un plano inclinado y sobre un plano horizontal

$f$  = coeficiente de luminosidad del horizonte

$\beta$  = inclinación de la superficie

El índice anisotrópico  $A_i$  representa una medida de la transmisión de la radiación directa a través de la atmósfera y es calculada como sigue:

$$A_i = \frac{\bar{G}_b}{\bar{G}_o} \quad 5.6$$

donde:

$\bar{G}_o$  = radiación horizontal global extraterrestre promediado en cada paso temporal.

El coeficiente de luminosidad del horizonte  $f$  refleja el hecho, que la mayor cantidad de radiación difusa que recibe una superficie proviene del horizonte que del resto del cielo, el cual es calculado de la siguiente forma:

$$f = \sqrt{\frac{\bar{G}_b}{\bar{G}}} \quad 5.7$$

donde:

$\bar{G}$  = es la radiación solar global incidente sobre la superficie terrestre

Ya que  $\bar{G}$  representa la radiación solar global terrestre, se puede definir que esta cantidad es la sumatoria de  $\bar{G}_b$  y  $\bar{G}_d$

$$\bar{G} = \bar{G}_b + \bar{G}_d \quad 5.8$$

Es de esta manera en que el programa de simulación logra realizar los cálculos requeridos para estimar la generación de energía eléctrica por medio de un sistema fotovoltaico y es como se obtuvieron los resultados expuestos en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO 6

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Potencial de generación

El sistema propuesto cuenta con una potencia nominal total de 554 kW y el arreglo se ha simulado con diferentes ángulos de inclinación, desde 0 hasta 25°. De acuerdo a la literatura [25-28], la inclinación óptima para obtener el mejor desempeño de un sistema fotovoltaico durante el año es igual a la latitud del sitio en donde se desea realizar la instalación. Sin embargo, al colocar los módulos solares con este ángulo y con la distribución mostrada en la Figura 5.3, la altura total de la estructura alcanzaría 5 m, además que estaría expuesta a mayores fuerzas debido al movimiento del aire.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para ambos ángulos de inclinación.

Primeramente, la Figura 6.1 se hace referencia a la radiación global horizontal que recibe la superficie de la Tierra promediado mensualmente en kW/m<sup>2</sup>. En esta gráfica de barras se observa la irradiancia máxima en un día, la cual puede sobrepasar ligeramente los 1000 W/m<sup>2</sup>, pero la media es considerablemente menor y está representada por una línea horizontal que cruza cada una de las barras.

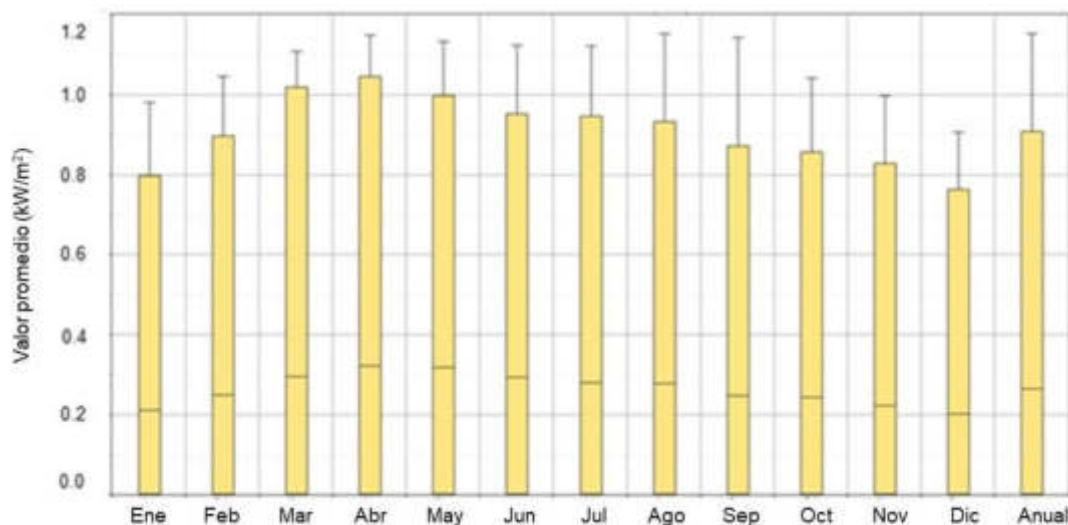


Figura 6.1 Radiación solar horizontal global promedio mensual.

Esta importante diferencia entre los valores máximos y los promedios tiene relación con la radiación que recibe un plano horizontal en la superficie de la Tierra, la cual será máxima cuando los rayos solares cruzan la menor distancia y son afectadas en menor medida por la atmósfera. La masa atmosférica que afecta el paso de los rayos del Sol es cambiante durante el día debido al movimiento rotativo de la tierra.

Una situación similar sucede con la radiación directa que incide sobre el arreglo fotovoltaico, sin embargo, en este caso, la inclinación del arreglo es también una variable importante, como puede verse en las Figuras 6.2 y 6.3.

Es posible observar que el comportamiento de la radiación promedio es similar, pero existen pequeñas diferencias entre ellas. La razón principal, como se mencionó, es la inclinación de los paneles solares. De acuerdo al ángulo, existirá un momento durante el día en que los rayos solares se encuentre perpendicularmente a la superficie del módulo solar, y es en este momento en el que la mayoría de la absorción de energía será proveniente de la radiación directa.

Esto quiere decir que, a mayor perpendicularidad entre el arreglo y la posición más alta del Sol en el cielo, la disponibilidad de energía solar es más significativa y su absorción se vuelve más efectiva.

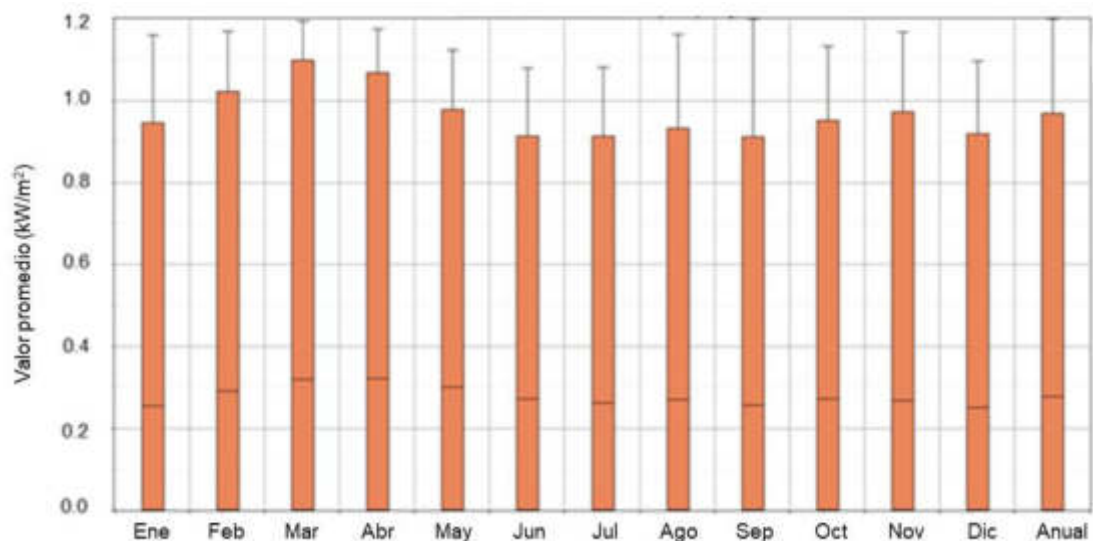


Figura 6.2 Promedio mensual de radiación global incidente sobre el arreglo fotovoltaico inclinado a 15°.

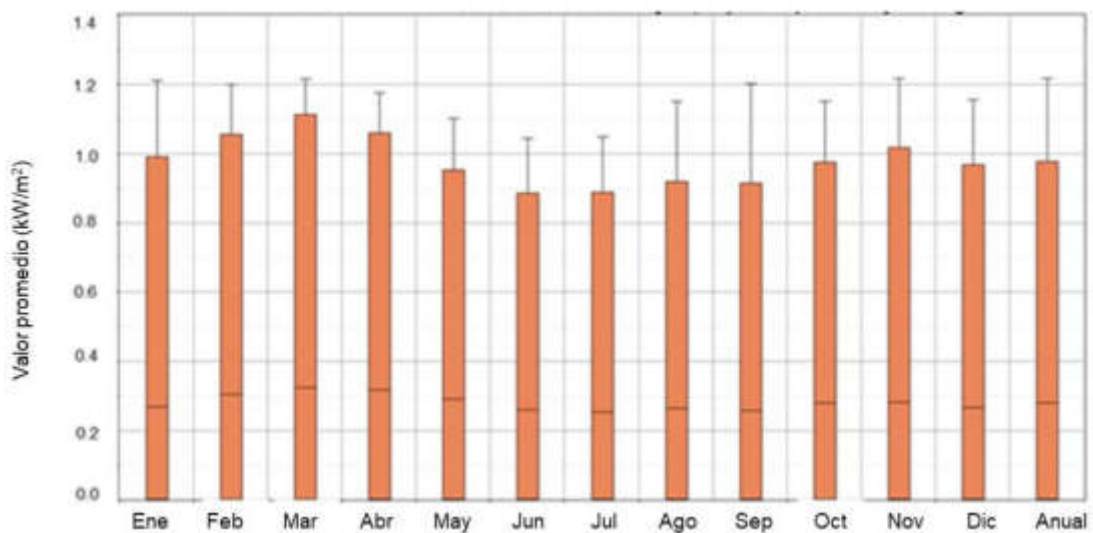


Figura 6.3 Promedio mensual de radiación global incidente sobre el arreglo fotovoltaico inclinado a 21°.

Lo anterior causa que, durante aproximadamente 1 hora antes y después del mediodía solar, una superficie recibirá la mayor cantidad de radiación solar y posterior a este tiempo, existe una disminución pronunciada de dicha captación.

Esta afirmación se observa en la Figura 6.4 (extracto del Apéndice B), en donde claramente se aprecia un máximo de potencia que sucede cerca del mediodía, mientras que antes y después de dicho máximo, se ve un incremento y decremento pronunciados en la curva, siendo esto un resultado directo de la posición del Sol en el cielo y, por ende, de la calidad de la luz solar disponible para su absorción.

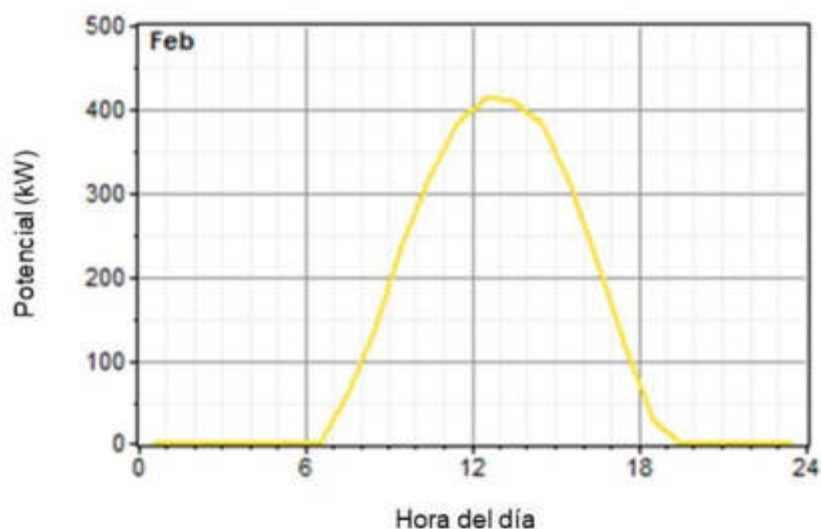


Figura 6.4 Perfil de la salida de potencia del sistema fotovoltaico inclinado a 15° en febrero.

En la Figura 6.5 a y b se muestra la salida de potencia del sistema fotovoltaico durante un año de operación mediante un mapa de datos, con el cual es posible visualizar los momentos en los que existe producción eléctrica, así como también, las horas en donde no existe generación.

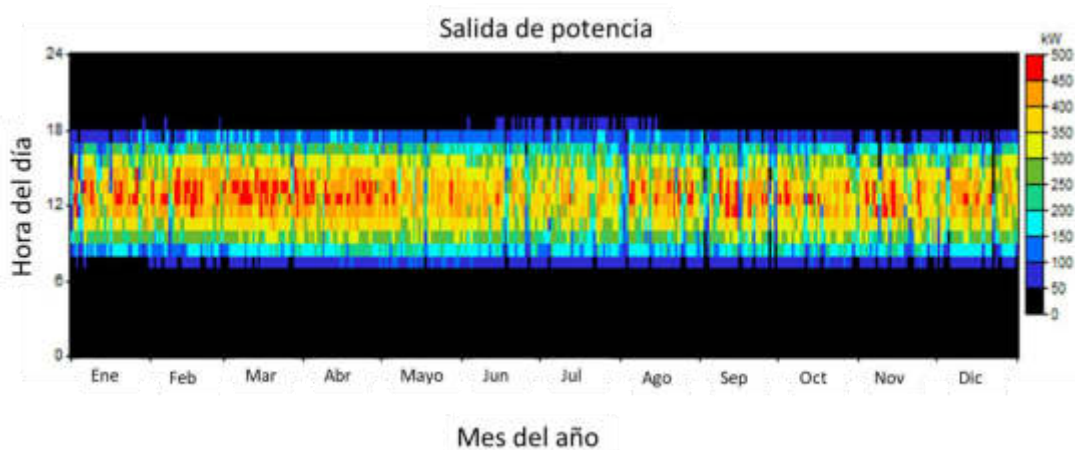
Se logra notar en ambas figuras que la generación de energía eléctrica sucede entre las 8 de la mañana y 6 de la tarde, sin embargo, en los extremos la

salida de potencia ronda los 50 kW, ya que es cuando el Sol se encuentra en el horizonte.

En el caso opuesto, alrededor de las 6 de la tarde y hasta las 6.30 de la mañana, no existe ningún tipo de generación eléctrica, ya que en este intervalo la Tierra ha rotado haciendo que el Sol se encuentre fuera de la zona horario.

Entre aproximadamente las 11 a.m. y las 3 p.m es donde se localiza la mayor potencia del sistema, llegando a valores cerca de 500 kW para una inclinación de  $15^\circ$  y 540 kW para  $21^\circ$ . Estos resultados demuestran que, en las horas cercanas al mediodía, la conversión de energía eléctrica es más efectiva como consecuencia de la posición del arreglo fotovoltaico con respecto del Sol.

a)  $15^\circ$



b) 21°

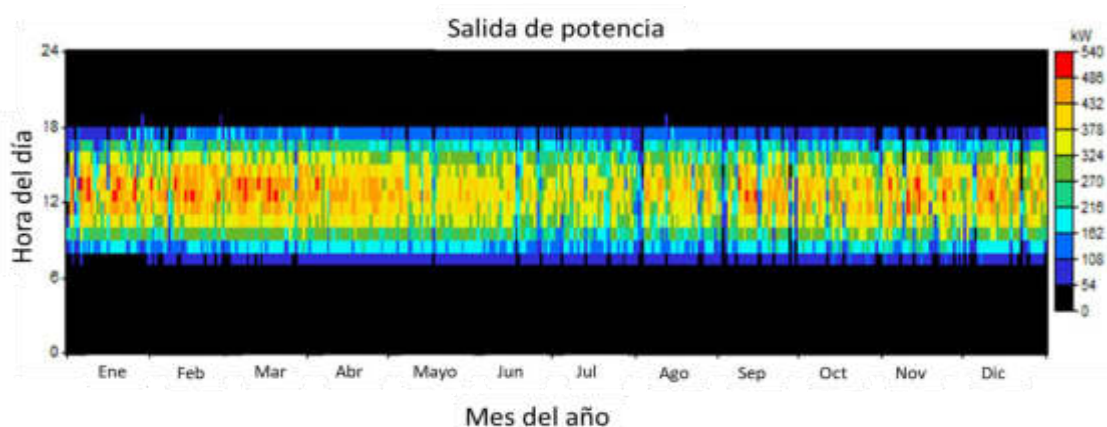


Figura 6.5 Mapa de datos de la salida de potencia del sistema fotovoltaico.

Como se ha mencionado, la posición e inclinación de un arreglo de este tipo son críticos para la mejor absorción de la energía solar. En la Figura 6.6 se muestra la relación existente entre la producción de electricidad y el ángulo de inclinación al cual se instala un sistema fotovoltaico, comparando el sistema propuesto de 540 kW de potencia con diferentes ángulos inclinación.

### Producción eléctrica de acuerdo a la inclinación

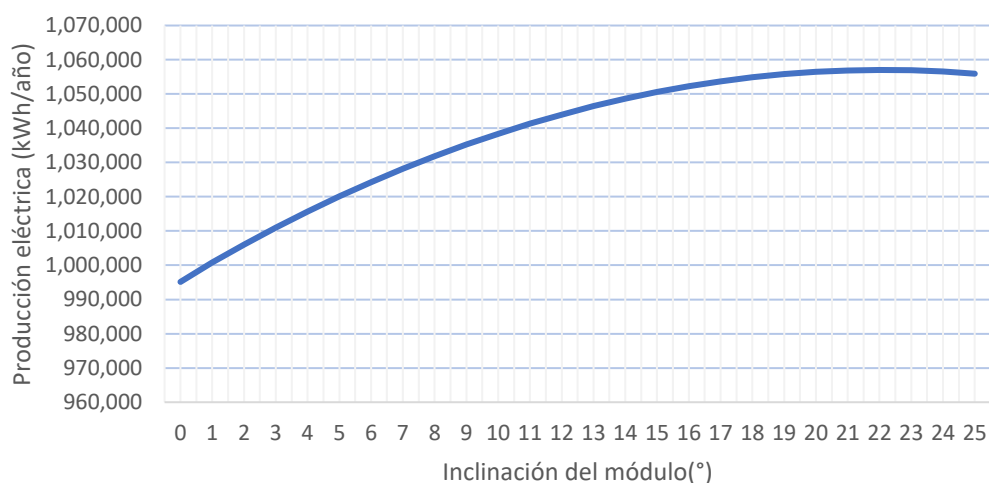


Figura 6.6 Relación entre la producción eléctrica y el ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico.



Se observa como para una inclinación de  $0^\circ$ , esto es, instalado horizontalmente, la cantidad de electricidad generada es prácticamente 995,000 kWh/año y a partir de este, se nota un aumento constante hasta llegar a una inclinación entre  $21^\circ$  y  $22^\circ$ ; posteriormente, existe un descenso continuo en la energía producida.

Para el presente caso, es evidente que haciendo la instalación del sistema fotovoltaico con una inclinación de  $21^\circ$  otorgará el mayor beneficio en cuanto a generación eléctrica en comparación con un ángulo de  $15^\circ$ , siendo los valores de energía producida 1,056,873 y 1,050,610 kWh/año, respectivamente. Esto concuerda con las afirmaciones que sugieren la inclinación óptima de un sistema de captación solar con consideraciones de producción anual debería ser igual a la latitud del sitio específico [25-28].

Además, en [41] también muestran que en la práctica, la inclinación con la que se instalan los módulos fotovoltaicos representa un factor muy importante, en donde ellos encontraron hasta un 17.3 % de diferencia entre ángulos de  $6^\circ$  y  $25^\circ$ . Sin embargo, en este trabajo se encontró que la diferencia entre un plano horizontal y posicionado con la inclinación más óptima, la diferencia es de únicamente 6 %.

Esta diferencia se debe a la diferencia de latitudes de cada área, ya que en [41] se encuentra en una latitud aproximada de  $35^\circ$  N, lo que genera mayores afectaciones en cuanto a la generación eléctrica en planos horizontales.

Adicionalmente, se encontró en [41] que los resultados prácticos de absorción solar y transformación a electricidad fueron hasta 7 % superiores a los obtenidos por medio de simulaciones. Esto representaría, para la aplicación presentada en este trabajo, un incremento en la producción eléctrica entre 73,543 y 73,981 kWh anuales.

Estos valores son comparables con lo obtenido en Brasil, en donde cuentan con un sistema aproximadamente del doble de capacidad y con el cual se generan alrededor de 2,463.80 MWh/año, siendo posible abastecer hasta el 80 % de la demanda del usuario [42].

Al comparar también los ángulos de inclinación seleccionados con [43], se comprende el impacto que tiene el sitio en donde se desea la instalación sobre el diseño del sistema, siendo que en el trabajo mencionado se encontró que, aun siendo superior al valor de la latitud, un ángulo de 30° obtendría la mayor captación solar para sus necesidades particulares y, por ende, una mayor generación eléctrica.

No obstante, en este trabajo el enfoque está dirigido hacia la generación anualizada máxima, lo que se obtiene con un ángulo de instalación de 21° y que puede observarse claramente en la Figura 6.6.

Adicionalmente, con ángulos muy pronunciados se crean impactos visuales, la estructura deberá soportar mayores esfuerzos por el movimiento de aire, lo que pudiera repercutir en los mecanismos de sujeción de los módulos, y se reduce la calidad de sombra que pudiera generarse, aunque se favorece la limpieza de la superficie del panel solar [44].

Debido a lo anterior, una de las razones por las cuales se ha elegido el ángulo de 15°, aun cuando se puede inferir de la Figura 6.6 la existencia un ángulo superior a los 21° que también otorgará la misma cantidad de generación.

Adicionalmente, los impactos visuales y el brillo reflejado de la superficie serán menores, así como también, los esfuerzos a los que se verá sometida la estructura serán disminuidos, manteniendo su funcionalidad secundaria como sombra para los automóviles estacionados.

Así mismo, se ha concluido que la opción con  $15^\circ$  de inclinación resulta ser la que conlleva mayores beneficios, ya que la altura máxima de la estructura sería de 4.30 m, como se puede ver en la Figura 6.7, mientras que teniendo los módulos inclinados a  $21^\circ$  la altura aumentaría a 5 m.

La importancia en la limpieza de la superficie de los paneles se vuelve un punto crítico para el óptimo funcionamiento del sistema. En [45] se encontraron pérdidas de eficiencia de producción de hasta 20 % debido a un deficiente programa de limpieza.

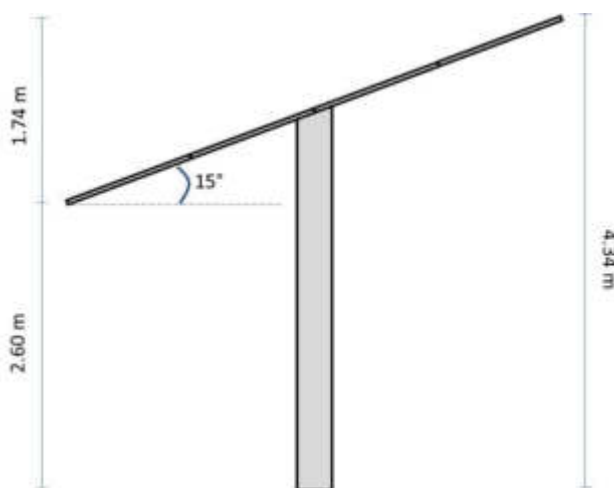


Figura 6.7 Dimensiones de la instalación propuesta.

Finalmente, seleccionando este ángulo de inclinación reduciría en únicamente 1 % la producción eléctrica anual, cuando se compara con el ángulo óptimo reportado en la literatura, la cual es igual a la latitud del sitio elegido [25, 26, 30, 46] y en este caso en particular, cercano a los  $21^\circ$ .

Diferentes estudios llevados a cabo con el software de optimización HOMER [47, 48] muestran que su utilización como una herramienta para la determinación del potencial fotovoltaico otorga resultados confiables, pero la calidad de los datos ingresados debe ser alto, lo que se logra gracias al acceso

de dicho programa de simulación a la base de datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA).

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

En este trabajo se buscó establecer a los estacionamientos de supermercados y centros comerciales como opciones viables para su utilización como plantas solares de mediana potencia a través de techos solares que otorguen una doble función, suministrar sombra para los vehículos de los clientes y al mismo tiempo, transformar la energía solar recibida en electricidad por medio de paneles solares, creando así un área que inicialmente era improductiva en una que genere un valor agregado a la empresa.

Se realizó una simulación con el programa HOMER, en donde se calcularon las producciones eléctricas anuales obtenidas por un sistema fotovoltaico instalado en un área de 2,830 m<sup>2</sup> y con orientaciones dentro de un rango de inclinación de 0 a 25°, dando como resultado un comportamiento incremental en la generación eléctrica conforme aumenta la inclinación de los paneles solares. Sin embargo, este aumento se detiene al llegar a los 21° de inclinación para posteriormente observar un decremento constante en la generación de electricidad anual.

Se tomaron en consideración dos inclinaciones, 15 y 21°. La generación eléctrica obtenida con una instalación con la menor inclinación resultó en 1,050,610 kWh/año, mientras que el ángulo más pronunciado consiguió una generación de 1,056,873 kWh anuales. Esta diferencia es de únicamente 1 % en

cuanto, por lo que se eligió la inclinación de 15° por su menor altura y efectos visuales reducidos.

Sin embargo, con el objetivo de obtener una estructura más sencilla, sería posible colocar el sistema de manera horizontal, ocasionando que la generación eléctrica disminuya un 6 % aproximadamente con respecto a la inclinación de 21°, es decir, 995,130 kWh/año, lo que pudiera considerarse como no significativo.

Se determinó también que la mayor cantidad de captación y conversión de energía solar sucede en un horario entre 11 de la mañana y 3 de la tarde, resultado de la radiación global horizontal máxima que sobrepasa 1000 W/m<sup>2</sup> anualmente.

La utilización de áreas como estacionamientos para la instalación de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica puede ser una solución viable para la incorporación de fuentes renovables de energía al SIN, siendo beneficioso para este como para el dueño del sistema. El primero, obtendría una reducción en el consumo en la red eléctrica, requiriendo menor generación durante el día, mientras que el segundo tomaría ventaja en la utilización de un área que no genera valor agregado y compensar su propio consumo eléctrico.

Sin embargo, el tiempo del retorno de inversión sigue siendo una limitante [49], especialmente en México, en donde no existen esquemas que permiten al usuario vender la energía excedente que produce al SIN.

Por otro lado, el constante incremento en el costo de la electricidad dentro de las tarifas comerciales aporta un punto de inflexión para la consideración de este tipo de proyectos, especialmente cuando se toma en consideración que la

capacidad de generación eléctrica obtenida en la simulación ronda a 1 GWh anual dentro de un estacionamiento común para supermercados.

Adicionalmente, estos sistemas darían la posibilidad a los centros comerciales o supermercados de contar con centros de carga para automóviles eléctricos, los cuales representan el futuro de los vehículos personales, dando la oportunidad de contar con ingresos adicionales por concepto de recarga, tal como lo hacen algunas empresas que cuentan con sus propias gasolineras.

Siguiendo este patrón de instalaciones en estacionamientos propiedad de supermercados, ya que son quienes cuentan con áreas de gran tamaño, es posible determinar una gran cantidad de zonas potenciales para este tipo de sistemas y, por lo tanto, una capacidad de generación importante. De acuerdo a información obtenida de sus respectivas páginas web, a nivel nacional: Walmart de México cuenta con 2,571 unidades de negocio [50], HEB es dueña de 51 tiendas [51], Soriana tiene 812 locales [52] y Grupo LaComer 59 unidades [53].

Con los números expuestos acerca de la cantidad de establecimientos pertenecientes a las cadenas más importantes y haciendo la suposición que en todas ellas existe un área con las condiciones físicas como los del sitio utilizado en este trabajo, es posible aventurar que existen, potencialmente, 3,493 GWh anuales de energía eléctrica disponibles para ser cosechadas en el país a través de este método.

## **7.2 Recomendaciones**

Con el objetivo de llevar este trabajo a la práctica, es necesario hacer un análisis en sitio y conocer el uso eléctrico del usuario para diseñar el sistema con la capacidad apropiada y en caso de no ser necesario, evitar usar el área completa del estacionamiento, ya que únicamente se generaría una inversión mayor que no redituaría en ninguna medida a la empresa.

Adicionalmente, un importante porcentaje de la inversión requerida para este tipo de proyectos recae sobre la estructura en donde se montan los paneles solares para formar el techo. Por lo tanto, para reducir los costos asociados a este concepto, la búsqueda de materiales y diseños más económicos se vuelve imprescindible.

Para obtener mayor información y datos reales en el sitio y compararlos con los obtenidos en este trabajo, pueden llevarse a cabo una serie de procesos de experimentación.

Primero, ya que la información que se obtiene de las bases de datos internacionales y nacionales provienen en mayor medida de sensores de medición que no se encuentran necesariamente en los puntos de interés, y por lo tanto representan valores aproximados, es necesario realizar un estudio del recurso solar real en el sitio. Para tener valores de buena calidad, este estudio debería ser llevado a cabo durante todo un año y verificar que el año en que se haya hecho dicho estudio no sea atípico.

Segundo, una experimentación enfocada en la captación y transformación a energía eléctrica es también necesaria. En este caso, el estudio deberá realizarse con módulos de desempeño similar y medir la cantidad de energía producida durante, por lo menos, un mes, de tal manera que permita comparar la cantidad de energía producida real contra los valores encontrados a partir de la simulación.

Al mismo tiempo, es posible utilizar este tipo de experimentación para desarrollar un plan de limpieza adecuado, ya que como se ha expresado en este trabajo, la acumulación de polvo sobre la superficie de captación ocasiona ineficiencia en la absorción solar.



Para este punto, se requieren diferentes sistemas de generación y medición, en los cuales existan frecuencias de limpieza distintos que permitan encontrar el rango de tiempo entre lavados que ayuden a mantener el desempeño de módulo en buenas condiciones, considerando los costos de mano de obra para llevar a cabo este trabajo.

Finalmente, debido a los cambios actuales en México, es importante esperar a la determinación de los tribunales con respecto a las modificaciones hechas por CENACE y la SENER para la puesta en marcha de plantas de generación eléctrica por medio de energía renovables, ya que las resoluciones de dichos organismos gubernamentales están en contra de los planes estipulados en la Ley para la Transición Energética y de los compromisos internacionales adquiridos por el país.

# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Evolución en la generación y consumo de energía en México [13].	16
Figura 2.2 Cambio en el índice de independencia energética de México [13].	17
Figura 2.3 Distribución de energía primaria en México en 2018.	17
Figura 2.4 Porcentaje de consumo final de energía por sector.	18
Figura 2.5 Distribución de generación eléctrica por tecnología.	20
Figura 2.6 Emisiones mundiales de CO <sub>2</sub> por fuente de energía.	22
Figura 2.7 Emisiones de CO <sub>2</sub> por fuente de energía en México.	24
Figura 2.8 Emisiones de CO <sub>2</sub> por sector en México.	24

## CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Distancia media entre la Tierra y el Sol.	27
Figura 3.2 Posición diaria de la Tierra con respecto del Sol.	29
Figura 3.3 Variación de la radiación extraterrestre sobre un plano orientado hacia la normal.	30
Figura 3.4 Diagrama de la atenuación de la radiación solar extraterrestre a su paso por la atmósfera.	31
Figura 3.5 Irradiación solar horizontal global promedio a largo plazo.	32
Figura 3.6 Irradiación solar directa global promedio a largo plazo.	32
Figura 3.7 Declinación del Sol con respecto de la línea ecuatorial en los solsticios.	33
Figura 3.8 Declinación del Sol durante el año.	34

Figura 3.9 Declinación solar diaria con respecto al ecuador.....	35
Figura 3.10 Relación entre la captación solar y $\cos\Phi$ .....	36

#### **CAPÍTULO 4**

Figura 4.1 Obtención de huecos y electrones libres al dopar silicio.....	41
Figura 4.2 Movimiento de los electrones libres en el lado n hacia los huecos en el lado p. ....	42
Figura 4.3 Conformación de módulos y sistemas fotovoltaicos. ....	44
Figura 4.4 Parque fotovoltaico Tengger Desert Solar Park vista desde el espacio. ....	44

#### **CAPÍTULO 5**

Figura 5.1 Vista del estacionamiento mostrando (en rojo) las áreas de instalación para los módulos fotovoltaicos. ....	51
Figura 5.2 Dimensiones del módulo fotovoltaicos Q.PEAK DUO-G5 315-330. ....	52
Figura 5.3 Diagrama de inclinación para los módulos fotovoltaicos.....	53

#### **CAPÍTULO 6**

Figura 6.1 Radiación solar horizontal global promedio mensual.....	60
Figura 6.2 Promedio mensual de radiación global incidente sobre el arreglo fotovoltaico inclinado a 15°.....	61
Figura 6.3 Promedio mensual de radiación global incidente sobre el arreglo fotovoltaico inclinado a 21°.....	61
Figura 6.4 Perfil de la salida de potencia del sistema fotovoltaico inclinado a 15° en febrero.....	62

Figura 6.5 Mapa de datos de la salida de potencia del sistema fotovoltaico. ....	64
Figura 6.6 Relación entre la producción eléctrica y el ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico. ....	64
Figura 6.7 Dimensiones de la instalación propuesta. ....	67

## **APÉNDICE A**

Figura A1 Hoja de especificaciones de módulo fotovoltaico Q.PEAK DUO-G5 315-330. ....	85
---	----

## **APÉNDICE B**

Figura B1 Perfil de la salida de potencia del sistema fotovoltaico inclinado a 15° en kW para cada mes del año (kW vs hora). ....	87
---	----

# LISTA DE TABLAS

## **CAPÍTULO 2**

Tabla 2.1 Progreso de la generación de energía eléctrica (GWh). .....	21
---	----

## **CAPÍTULO 3**

Tabla 3.1 Irradiación solar mensual promedio en kWh/m <sup>2</sup> para la Ciudad de México (Sandia National Laboratories). .....	38
--	----

## **CAPÍTULO 5**

Tabla 5.1 Temperatura media mensual en °C para León, Guanajuato.....	49
Tabla 5.2 Irradiación global horizontal para León, Guanajuato.....	50

# REFERENCIAS

1. S. Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems*. London, UK: Academic Press, 2009
2. US EPA, “United States Environmental Protection Agency”, [Online]: Available: <https://www.epa.gov/> [Accessed March 15, 2020]
3. “Population Clock”, *United States Census Bureau*, 2020, [Online]. Available: <https://www.census.gov/>. [Accessed, 25-mar-2020]
4. International Energy Agency. [Online]. Available: <https://www.iea.org>. [Accessed: 20-feb-2020]
5. United Nations (UN), “Department of Economic and Social Affairs – News”. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html>. [Consultado el: 27-feb-2020]
6. International Energy Agency, “World Energy Balances Report 2019”. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2017>. [Consultado el: 20-feb-2020]
7. United Nations, “Report of the United Nations Conference on the Human Environment”. [En línea]. Disponible en: <https://undocs.org/en/A/CONF.48/14/Rev.1>. [Consultado el: 21-feb-2020]
8. United Nations, “Report of the United Nations Conference on Environment and Development”. [En línea]. Disponible en: [https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_CONF.151\\_26\\_Vol.I\\_Declaration.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_CONF.151_26_Vol.I_Declaration.pdf). [Consultado el: 21-feb-2020]
9. U.N. World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. 1ed. U.S.A.: Oxford University Press, 1987
10. United Nations, “World Economic Situation and Prospects 2019”, 2019 [Online]. Available:

[https://www.un.org/development/desa/dpad/document\\_gem/global-economic-monitoring-unit/world-economic-situation-and-prospects-wesp-report/world-economic-situation-and-prospects-wesp-full-report/](https://www.un.org/development/desa/dpad/document_gem/global-economic-monitoring-unit/world-economic-situation-and-prospects-wesp-report/world-economic-situation-and-prospects-wesp-full-report/).  
[Accessed: March 28, 2020]

11. R. Ferroukhi, *et al.*, “Renewable Energy Benefits: Measuring de Economics” International Renewable Energy Agency (IRENA), 2016 [Online]. Available:  
[https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena\\_measuring-the-economics\\_2016.pdf](https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_measuring-the-economics_2016.pdf)
12. “Crude Oil Prices – 70 Year Historical Chart”, Macrotrends, 2020. [Online]. Available: <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>. [Accessed: 25-apr-2020]
13. A.Montoya *et al.*, “ Balance Nacional de Energía 2018”, Secretaría de Energía, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia-2018>.
14. Banco de México (Banxico), “Precio de la mezcla mexicana de petróleo”. [En línea]. Disponible en: <https://www.banxico.org.mx/apps/gc/precios-spot-del-petroleo-gra.html>. [Consultado el:20-abr-2020]
15. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “Datos Población”. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>. [Consultado el: 18-mar -2020]
16. Consejo Nacional de Población, “Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050”. [En línea]. Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050>. [Consultado el: 15-mar-2020]
17. “Informe Pormenorizado sobre el Desempeño y las Tendencias de la Industria Eléctrica Nacional”, Secretaría de Energía, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/documentos/informe->

pormenorizado-sobre-el-desempeno-y-las-tendencias-de-la-industria-electrica-nacional.

18. Ley de Transición Energética, de 24 de dic 2015
19. CENACE, “Centro Nacional de Control de Energía”. [En línea] Disponible en:<https://www.gob.mx/cenace/archivo/documentos?order=DESC&page=1>
20. Secretaría de Energía, “Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2019-2033”, SENER, [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/documentos/prodesen-2019-2033>
21. Rosenzweig C, *et al.*, (2007) Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 79–131
22. United Nations Environment Programme (UNEP), “Emissions Gap Report 2019”. [En línea]. Disponible en: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>. [Consultado el: 15-mar -2020]
23. World Meteorological Organization, “WMO Statement on the State of the Global Climate 2019”, in WMO-No.1248, 2020 [Online]. Available: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10211](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211). [Accessed: 18-march-2020]
24. Z. Sen, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*, London, England, UK: Springer, 2008
25. D. Yogi, F. Kreith and J. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, New York, NY, USA; Taylor & Francis, 2000.
26. J.A. Duffie and W.A. Beckaman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Hoboken, New Jearsey, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
27. Markvart, T., Ed., *Solar Electricity*, John Wiley & Sons, Chichester, U.K., 1994



28. R.A.Messenger and J.Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
29. Global Solar Atlas, “Solar resource data: Solargis” [En línea]. Disponible en: <https://globalsolaratlas.info/download/world>. [Consultado el: 01-mar-may-2020]
30. Solar Energy International, *Photovoltaics Desing and Installation Manual*, Gabriola Island, BC, Canada: New Society Publishers, 2004.
31. A. Luque and S.Hegedus, *handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Chichester, England, UK: John Wiley & Sons, 2003
32. A. Goerzberger and V.U. Hoffman, *Photovoltaic Solar Energy Generation*, Heidelberg, Germany: 2005
33. Power Technology, “The world’s biggest solar power plants”. [En línea]. Disponible en: <https://www.power-technology.com/features/the-worlds-biggest-solar-power-plants/>. [Consultado el: 28- abr -2020]
34. Earth observatory, “Solar Powered China”. [En línea] Disponible en: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/145159/solar-powered-china>. [Consultado el: 28-abr-2020]
35. Pv magazine, “Se inaugura la planta solar Villanueva, en Coahuila”. [En línea]. Disponible en: <https://www.pv-magazine-mexico.com/2018/03/23/se-inaugura-la-planta-solar-villanueva-en-coahuila/>. [Consultado el: 25-mar-2020]
36. “Municipio de León, Guanajuato”. [En línea]. Disponible en: <https://www.leon.gob.mx/leon/>. [Consultado el: 30-mar-2020]
37. National Renewable Energy Laboratory (NREL). [En línea]. Disponible en: [www.nrel.gov/](http://www.nrel.gov/). [Consultado el: 27-feb-2020]
38. Secretaría de Energía (SENER), “Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL)”. [En línea]. Disponible en: <https://dgel.energia.gob.mx/inel/mapa.html?lang=es>. [Consultado el: 27-feb-2020]
39. Secretaría de Energía (SENER), “Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL)”. [En línea]. Disponible en:

- <https://dgel.energia.gob.mx/azel/mapa.html?lang=es>. [Consultado el: 27-feb-2020]
40. National Renewable Energy Laboratory (NREL), “National Solar Radiation Database (NSRDB)”. [En línea]. Disponible en: <https://nsrdb.nrel.gov/>. [Consultado el: 27-feb-2020]
  41. A.A. Babatunde, S. Abbasoglu, M. Senol. Analysis of the impact of dust, tilt angle and orientation on performance of PV Plants, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 90, 2018, Pages 1017-1026, ISSN 1364-0321
  42. P. Sánchez Molina, (2019). “Se inaugura el mayor estacionamiento solar en Brasil”. [En línea]. Disponible en: <https://www.pv-magazine-latam.com/2019/10/09/se-inaugura-el-mayor-estacionamiento-solar-de-brasil/>. [Consultado el: 7-sept-2020]
  43. I. A. López Zumarán, *Estudio de viabilidad y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para el área del estacionamiento del CIERMAD*, Chihuahua, 2013.
  44. F. Umer, M.S. Aslam, M.S. Rabbani, M.J. Hanif, N. Naeem y M.T. Abbas (2019), Desing and Optimization Of Solar Carpot Canopies for Maximum Power Generation and Efficiency at Bahawalpur. International Journal of Photoenergy, vol. 2019
  45. S. Semaoui, K. Abdeladim, B. Taghezouit, A. Hadj Arab, A. Razagui, S. Bacha, S. Boulahchiche, S. Bouacha, A. Gherbi, Experimental investigation of soiling impact on grid connected PV power, Energy Reports, Volume 6, Supplement 1, 2020, Pages 302-308, ISSN 2352-4847.
  46. S. Sreenath, K. Sudhakar, Yusop A.F., E. Solomin, I.M. Kirpichnikova, Solar PV energy system in Malaysian airport: Glare analysis, general design and performance assessment, Energy Reports, Volume 6, 2020, Pages 698-712, ISSN 2352-4847.
  47. A. Hassan, A. Awasthi and M. Anwari. 2018. Optimal Design and Analysis of Grid-connected Photovoltaic Under Different Tracking Systems Using

- HOMER,” In Energy Conversion and Management, vol. 155, 2018, Pages 42-57, ISSN 0196-8904.
48. Mondal, M.A.H. 2010. “Assessment of Renewable Energy Resources Potential for Electricity Generation in Bangladesh. Renewable and Sustainable Energy Reviews, October 2010, vol. 14, no. 8, pp. 2401-13.
  49. Alghamdi, A. S., A. Bahaj and Y. Wu. “Assessment of Large Scale Photovoltaic Power Generation from Carport Canopies.” *Energies* 10 (2017): 686.
  50. Walmart de México. [En línea]. Disponible en: <https://corporate.walmart.com/our-story/locations/mexico?multi=false>. [Consultado el: 01-abr-2020]
  51. HEB México. [En línea]. Disponible en: [www.heb.com.mx/tiendas](http://www.heb.com.mx/tiendas). [Consultado el: 01-abr-2020]
  52. Soriana. [En línea]. Disponible en: [www.organizacionsoriana.com/acerca de nosotros.html](http://www.organizacionsoriana.com/acerca-de-nosotros.html). [Consultado el: 01-abr-2020]
  53. Grupo LaComer. [En línea]. Disponible en: <https://grupolacomer.com.mx/corporativo/nuestra-historia>. [Consultado el: 01-abr-2020]

# APÉNDICE A

En este apéndice se presenta la hoja de datos con la información física y de desempeño en laboratorio del módulo solar Q.PEAK DUO-G5 315-330 desarrollado y comercializado por la empresa de origen alemán QCells, una de las productoras de módulo fotovoltaicos más grandes del mundo.



The new Q.PEAK DUO-G5 solar module from Q CELLS impresses thanks to innovative Q.ANTUM DUO Technology, which enables particularly high performance on a small surface. Q.ANTUM's world-record-holding cell concept has now been combined with state-of-the-art circuitry half cells and a six-busbar design, thus achieving outstanding performance under real conditions - both with low-intensity solar radiation as well as on hot, clear summer days.



**Q.ANTUM TECHNOLOGY: LOW LEVELIZED COST OF ELECTRICITY**  
Higher yield per surface area, lower BOS costs, higher power classes, and an efficiency rate of up to 19.9%.



**INNOVATIVE ALL-WEATHER TECHNOLOGY**  
Optimal yields, whatever the weather with excellent low-light and temperature behavior.



**ENDURING HIGH PERFORMANCE**  
Long-term yield security with Anti LID and Anti PID Technology<sup>1</sup>, Hot-Spot Protect and Traceable Quality Tra.Q™.



**EXTREME WEATHER RATING**  
High-tech aluminum alloy frame, certified for high snow (5400Pa) and wind loads (4000Pa) regarding IEC.



**A RELIABLE INVESTMENT**  
Inclusive 12-year product warranty and 25-year linear performance guarantee<sup>2</sup>.



**STATE OF THE ART MODULE TECHNOLOGY**  
Q.ANTUM DUO combines cutting edge cell separation and innovative wiring with Q.ANTUM Technology.



<sup>1</sup> APF test conditions according to IEC/TS 62804-1:2015, method B (-1500V, 168h)

<sup>2</sup> See data sheet on rear for further information.

#### THE IDEAL SOLUTION FOR:



Engineered in Germany

**Q CELLS**

MECHANICAL SPECIFICATION	
<b>Format</b>	66.3 in x 39.4 in x 1.26 in (including frame) (1685 mm x 1000 mm x 32 mm)
<b>Weight</b>	41.2 lbs (18.7 kg)
<b>Front Cover</b>	0.13 in (3.2 mm) thermally pre-stressed glass with anti-reflection technology
<b>Back Cover</b>	Composite film
<b>Frame</b>	Black anodized aluminum
<b>Cell</b>	6 x 20 monocrystalline Q.ANTUM solar half-cells
<b>Junction box</b>	2.76-3.35 in x 1.97-2.76 in x 0.51-0.83 in (70-85 mm x 50-70 mm x 13-21 mm), decentralized, IP67
<b>Cable</b>	4 mm <sup>2</sup> Solar cable, (+) ≥43.3 in (1100 mm), (-) ≥43.3 in (1100 mm)
<b>Connector</b>	Multi-Contact MC4, IP68

ELECTRICAL CHARACTERISTICS		315	320	325	330	
<b>POWER CLASS</b>						
MINIMUM PERFORMANCE AT STANDARD TEST CONDITIONS, STC <sup>1</sup> (POWER TOLERANCE +5W / -0W)						
<b>Minimum</b>	<b>Power at MPP<sup>1</sup></b>	<b>P<sub>MPP</sub> [W]</b>	315	320	325	330
	<b>Short Circuit Current<sup>1</sup></b>	<b>I<sub>sc</sub> [A]</b>	10.04	10.09	10.14	10.20
	<b>Open Circuit Voltage<sup>1</sup></b>	<b>V<sub>oc</sub> [V]</b>	39.87	40.13	40.40	40.66
	<b>Current at MPP<sup>1</sup></b>	<b>I<sub>MPP</sub> [A]</b>	9.55	9.60	9.66	9.71
	<b>Voltage at MPP<sup>1</sup></b>	<b>V<sub>MPP</sub> [V]</b>	32.98	33.32	33.65	33.98
	<b>Efficiency<sup>1</sup></b>	<b>η [%]</b>	≥ 18.7	≥ 19.0	≥ 19.3	≥ 19.6
MINIMUM PERFORMANCE AT NORMAL OPERATING CONDITIONS, NMOT <sup>2</sup>						
<b>Minimum</b>	<b>Power at MPP</b>	<b>P<sub>MPP</sub> [W]</b>	235.3	239.0	242.8	246.5
	<b>Short Circuit Current</b>	<b>I<sub>sc</sub> [A]</b>	8.09	8.13	8.17	8.22
	<b>Open Circuit Voltage</b>	<b>V<sub>oc</sub> [V]</b>	37.52	37.77	38.02	38.27
	<b>Current at MPP</b>	<b>I<sub>MPP</sub> [A]</b>	7.52	7.56	7.60	7.64
	<b>Voltage at MPP</b>	<b>V<sub>MPP</sub> [V]</b>	31.30	31.62	31.94	32.25

<sup>1</sup>Measurement tolerances P<sub>MPP</sub> ±3%; I<sub>sc</sub>, V<sub>oc</sub> ±5% at STC: 1000W/m<sup>2</sup>, 25±2°C, AM 1.5G according to IEC 60904-3 - 1800 W/m<sup>2</sup>. NMOT, spectrum AM 1.5G

Q CELLS PERFORMANCE WARRANTY	
	At least 98% of nominal power during first year. Thereafter max. 0.54% degradation per year. At least 93.1% of nominal power up to 10 years. At least 85% of nominal power up to 25 years.
	All data within measurement tolerances. Full warranties in accordance with the warranty terms of the Q CELLS sales organization of your respective country.

TEMPERATURE COEFFICIENTS					
<b>Temperature Coefficient of I<sub>sc</sub></b>	<b>α [%/K]</b>	+0.04	<b>Temperature Coefficient of V<sub>oc</sub></b>	<b>β [%/K]</b>	-0.28
<b>Temperature Coefficient of P<sub>MPP</sub></b>	<b>γ [%/K]</b>	-0.37	<b>Normal Module Operating Temperature NMOT</b>	<b>[°F]</b>	109 ± 5.4 (43 ± 3°C)

PROPERTIES FOR SYSTEM DESIGN				
<b>Maximum System Voltage V<sub>MV</sub></b>	<b>[V]</b>	1000 (IEC) / 1000 (UL)	<b>Safety Class</b>	II
<b>Maximum Series Fuse Rating</b>	<b>[A DC]</b>	20	<b>Fire Rating</b>	C (IEC) / TYPE 1 (UL)
<b>Max. Design Load, push<sup>†</sup></b>	<b>[lbs/ft<sup>2</sup>]</b>	75 (3600 Pa) / 55 (2667 Pa)	<b>Permitted module temperature on continuous duty</b>	-40°F up to +185°F (-40°C up to +85°C)
<b>Max. Test Load, Push / Pull<sup>†</sup></b>	<b>[lbs/ft<sup>2</sup>]</b>	113 (5400 Pa) / 84 (4000 Pa)	<sup>†</sup> see installation manual	

QUALIFICATIONS AND CERTIFICATES	
UL 1703, VDE Quality Tested, CE compliant; IEC 61215-2016, IEC 61730-201, application class A	

PACKAGING INFORMATION	
<b>Number of Modules per Pallet</b>	32
<b>Number of Pallets per 53' Trailer</b>	30
<b>Number of Pallets per 40' High Cube Container</b>	26
<b>Pallet Dimensions (L x W x H)</b>	69.3 in x 45.3 in x 46.9 in (1760 mm x 1150 mm x 1190 mm)
<b>Pallet Weight</b>	1415 lbs (642 kg)

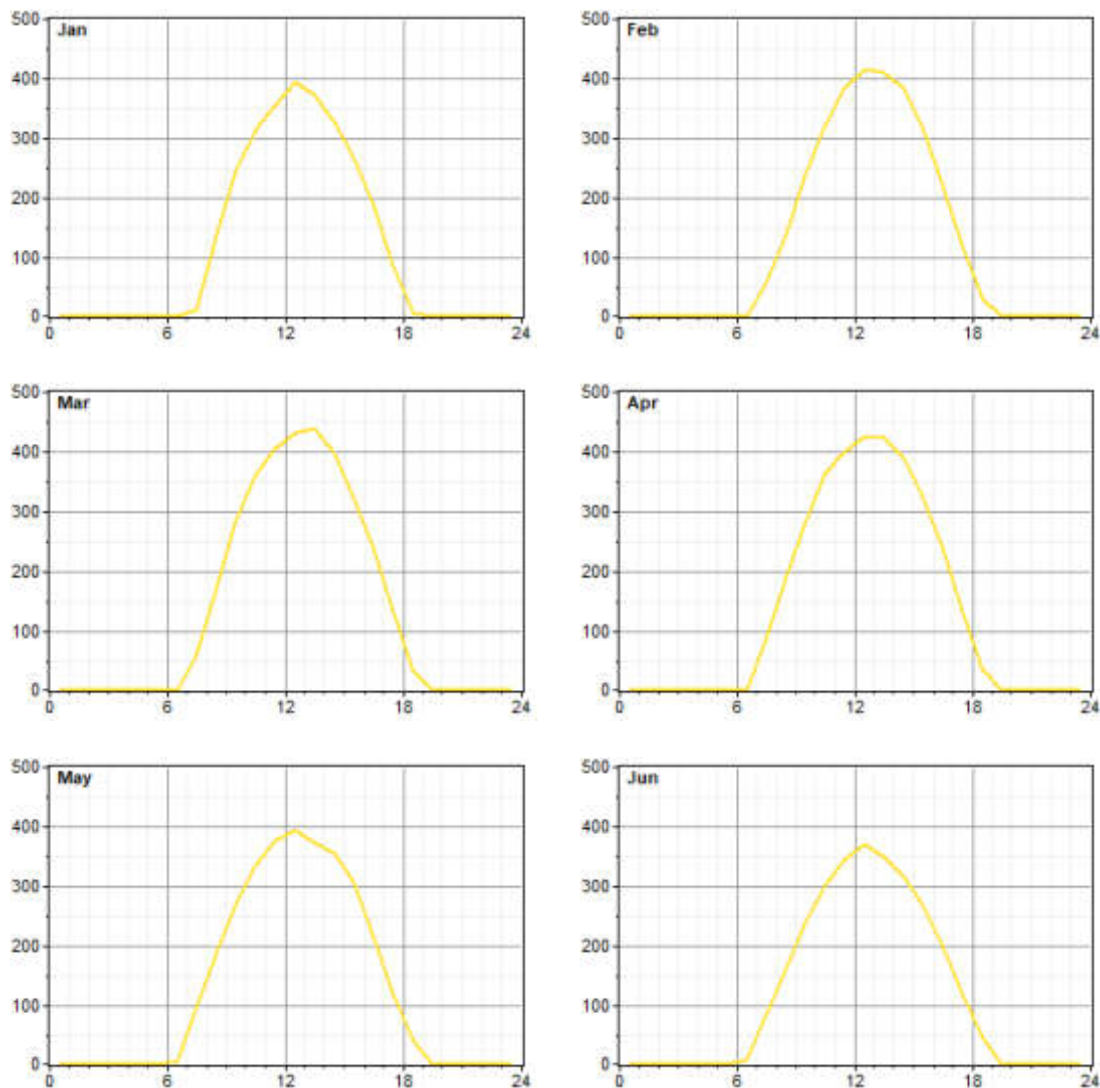
**NOTE:** Installation instructions must be followed. See the installation and operating manual or contact our technical service department for further information on approved installation and use of this product.

**Hanwha Q CELLS America Inc.**  
300 Spectrum Center Drive, Suite 1250, Irvine, CA 92618, USA | TEL +1 949 748 59 96 | EMAIL inquiry@us.q-cells.com | WEB www.q-cells.us

Figura A1 Hoja de especificaciones de módulo fotovoltaico Q.PEAK DUO-G5 315-330.

## APÉNDICE B

El apéndice B muestra el perfil de la salida de potencia en kW del sistema fotovoltaico propuesto en este trabajo con una inclinación de  $15^\circ$  para cada mes del año (kW vs hora), en donde puede notarse que el inicio de la generación eléctrica inicia en una hora entre las 6:30 y las 7 de la mañana, llegando a la máxima producción al mediodía para posteriormente caer pronunciadamente.



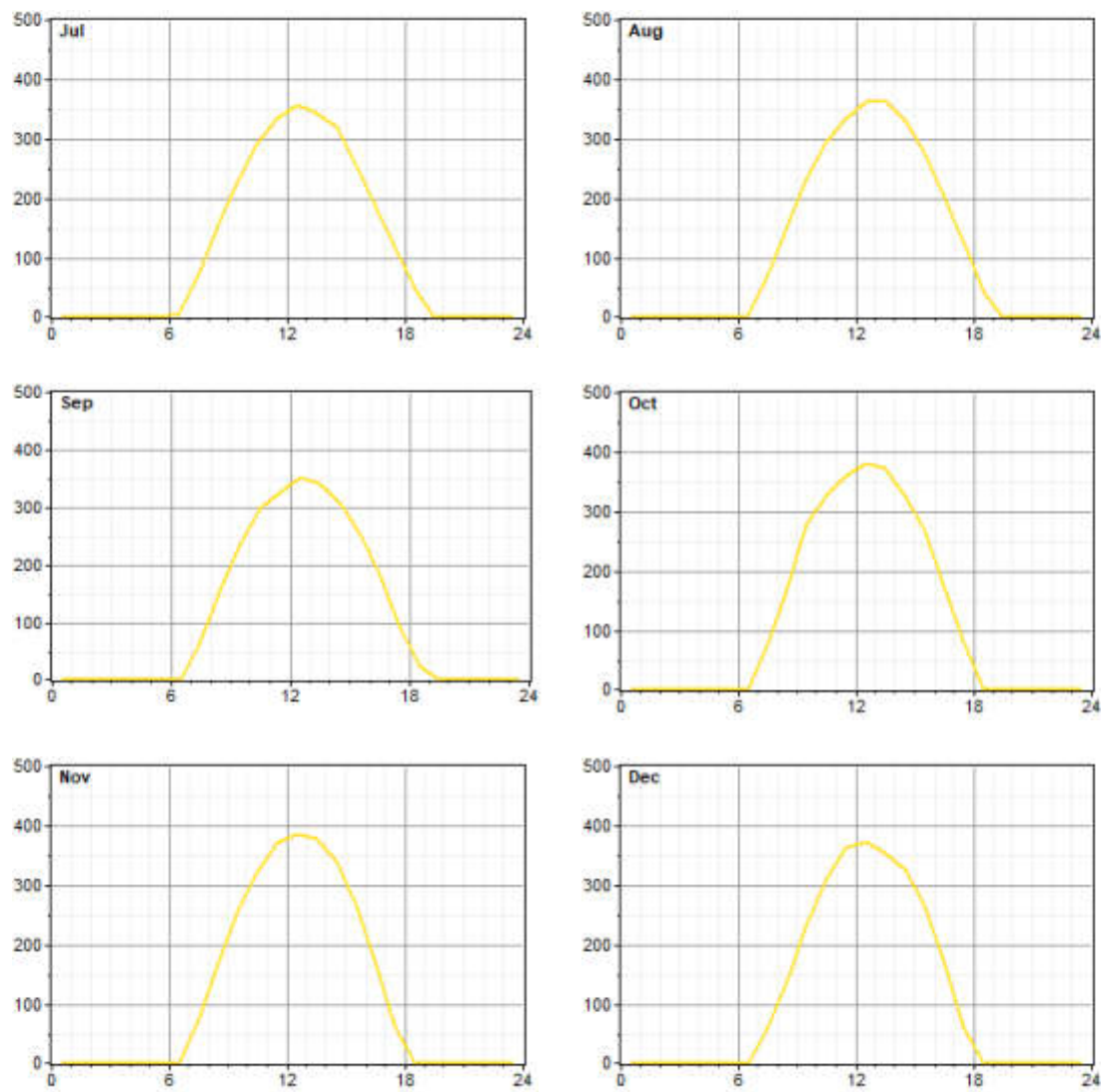


Figura B1 Perfil de la salida de potencia del sistema fotovoltaico inclinado a 15° en kW para cada mes del año (kW vs hora).