



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
COMO ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN
DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS
IMPACTOS EN EL AMBIENTE

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Civil

PRESENTA

Ana Karen Navarrete García

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/087/17

Señorita
ANA KAREN NAVARRETE GARCÍA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

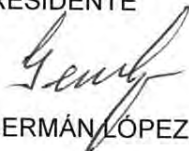
"LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS IMPACTOS EN EL AMBIENTE"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. ENERGÍA SOLAR
- III. IMPACTOS DE ENERGÍA SOLAR
- IV. CASO DE ESTUDIO: CENTRAL ELÉCTRICA SOLAR FOTOVOLTAICA EN AHUMADA, CHIHUAHUA
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 13 de octubre del 2017.
EL PRESIDENTE


M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, Luis y Carmen, por su gran apoyo, amor y paciencia en todo momento y por el esfuerzo que han realizado en todos estos años para brindarme la mejor educación.

A mis hermanas por su compañía, por alentarme a lograr mis objetivos así como por ser una guía importante en mi vida. A Santy, Camila, Andrea y Novo por ser una luz de alegría y sinceridad.

A mi asesor, M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, por su paciencia y acompañamiento durante la elaboración del presente trabajo.

Al equipo de Ithaca Environmental, en especial a José Luis Castro, por su paciencia, apoyo e impulso para realizar esta tesis así como por facilitarme el material bibliográfico necesario.

A todas las personas que he tenido la oportunidad de conocer en estos últimos años y que me han ayudado a crecer personal y profesionalmente.

Finalmente, y no por ello menos importante, a mis profesores y amigos: piezas clave en toda mi vida universitaria.

Resumen

Este trabajo aborda el tema de cambio climático en el mundo: su origen, sus impactos y evidencias y los escenarios que se plantean en los próximos años. De la misma forma, se analiza la política climática de México, a través de la cual se busca contribuir con los esfuerzos internacionales para mitigar los efectos del cambio climático.

Se analiza el desarrollo de las energías renovables como una medida para la reducción de emisiones contaminantes y para promover el desarrollo sustentable en el país. Dentro de las energías renovables, se hace especial énfasis en los proyectos de energía solar dado el alto potencial de aprovechamientos existente en el territorio nacional y el auge que está experimentando a nivel local e internacional.

Se presentan las características de la energía solar y de las principales tecnologías utilizadas para su aprovechamiento, específicamente de la energía solar fotovoltaica. Asimismo, se describen los impactos derivados del desarrollo y operación de las centrales solares fotovoltaicas.

Finalmente, se expone el desarrollo de una central solar fotovoltaica en el norte del país como caso de estudio. Como parte de este caso de estudio, se describen las características técnicas de la central solar, las actividades que habrán de realizarse durante cada una de las etapas del proyecto así como los impactos identificados y las medidas de mitigación correspondientes.

Abstract

This work addresses the issue of climate change in the world: its origin, its impacts and evidence and the scenarios that arise in the coming years. In the same way, Mexico's climate policy is analyzed, through which it seeks to contribute to international efforts to mitigate the effects of climate change.

The development of renewable energies is analyzed as a measure to reduce polluting emissions and to promote sustainable development in the country. Within renewable energies, special emphasis is placed on solar energy projects, given the high potential for exploitation in the national territory and the boom it is experiencing locally and internationally.

The characteristics of solar energy and the main technologies used for its use, specifically photovoltaic solar energy, are presented. Likewise, the impacts derived from the development and operation of photovoltaic solar power plants are described.

Finally, the development of a solar photovoltaic power plant in the north of the country is exposed as a case study. As part of this case study, the technical characteristics of the solar power plant are described, the activities to be carried out during each of the project stages, as well as the identified impacts and the corresponding mitigation measures.

Contenido

| | |
|---|-----------|
| Lista de Figuras..... | 8 |
| Lista de Tablas..... | 9 |
| Introducción..... | 10 |
| Objetivo..... | 12 |
| Capítulo I. Antecedentes..... | 13 |
| I.1 Cambio climático | 13 |
| I.1.1 Origen del cambio climático | 13 |
| I.1.2 Impactos y evidencias del cambio climático..... | 22 |
| I.1.3 Escenarios frente al cambio climático | 25 |
| I.2 México frente al cambio climático: Política en materia climática | 31 |
| I.3 Sector Energético y Desarrollo Sustentable en México | 34 |
| I.3.1 Reforma energética | 35 |
| I.3.2 Reforma energética en el sector eléctrico..... | 38 |
| I.3.3 Riesgos y oportunidades en el sector eléctrico de México en el contexto de cambio climático | 42 |
| Capítulo II. Energía Solar..... | 53 |
| II.1 Contexto de las energías renovables | 53 |
| II.2 Energía Solar..... | 57 |
| II.2.1 Radiación solar..... | 59 |
| II.3 Aprovechamiento de la energía solar para la generación de electricidad | 67 |
| II.3.1 Energía solar termoeléctrica | 67 |
| II.3.2 Energía Solar Fotovoltaica | 74 |
| II.3.3 Sistemas fotovoltaicos aislados | 81 |
| II.3.4 Sistemas fotovoltaicos conectados a red | 84 |
| Capítulo III. Impactos de la energía solar..... | 90 |
| III.1 Impactos socioeconómicos | 91 |
| III.2 Impactos de la energía solar termoeléctrica..... | 92 |
| III.2.1 Suelo, flora y fauna | 93 |

| | | |
|---------------------|---|------------|
| III.2.2 | Impactos visuales y ruido..... | 93 |
| III.2.3 | Impactos en los recursos hídricos | 93 |
| III.3 | Impactos de la energía solar fotovoltaica | 94 |
| III.3.1 | Impactos en el uso de suelo | 94 |
| III.3.2 | Impactos visuales..... | 94 |
| III.3.3 | Impactos sobre la flora y la fauna..... | 95 |
| Capítulo IV. | Caso de estudio: Central Eléctrica Solar Fotovoltaica en Ahumada, Chihuahua..... | 97 |
| IV.1 | Caracterización del sitio | 97 |
| IV.1.1 | Clima..... | 98 |
| IV.1.2 | Geología | 99 |
| IV.1.3 | Hidrología..... | 102 |
| IV.1.4 | Aspectos bióticos | 104 |
| IV.1.5 | Medio socioeconómico | 109 |
| IV.2 | Descripción general del proyecto | 114 |
| IV.2.1 | Ubicación | 114 |
| IV.2.2 | Justificación del proyecto..... | 114 |
| IV.2.3 | Características técnicas del proyecto..... | 116 |
| IV.2.4 | Etapa de preparación del sitio y construcción | 116 |
| IV.2.5 | Operación y Mantenimiento..... | 121 |
| IV.2.6 | Abandono de las instalaciones | 123 |
| IV.2.7 | Disposición de los residuos sólidos y líquidos generados durante el proyecto | 123 |
| IV.2.8 | Identificación de impactos potenciales del proyecto..... | 123 |
| IV.3 | Mitigación de los impactos del proyecto | 130 |
| | Conclusiones y recomendaciones..... | 133 |
| | Bibliografía..... | 136 |

Lista de Figuras

| | | |
|---------------|---|----|
| Figura I.1. | Proceso del fenómeno de efecto invernadero..... | 15 |
| Figura I.2. | Gases emitidos por actividades antropógenas de 1970-2010..... | 17 |
| Figura I.3. | Emisiones de gases de efecto invernadero por sector económico..... | 18 |
| Figura I.4. | Diagrama de emisiones GEI para México (2010)..... | 19 |
| Figura I.5. | Tendencia de las emisiones de GEI en México (1990-2010) | 20 |
| Figura I.6. | Países con mayor contribución de emisiones de CO2 por quema de combustibles fósiles (2009) | 21 |
| Figura I.7. | Cambios en la temperatura de la superficie del planeta..... | 23 |
| Figura I.8. | Cambios en la precipitación anual del planeta..... | 23 |
| Figura I.9. | Cambio en la temperatura media anual | 26 |
| Figura I.10. | Cambio de la precipitación media anual (2081-2100) | 27 |
| Figura I.11 | Escenarios de cambio en la temperatura, durante el mes de junio para México, en los años 2020,2050 y 2080. (Considerando un alto nivel de emisiones GEI)..... | 29 |
| Figura I.12. | Cambios en la precipitación proyectados para 2020, 2050, 2080, considerando un alto nivel de emisiones..... | 30 |
| Figura I.13. | Plan de Implementación de la Reforma Energética en el Sector Eléctrico..... | 39 |
| Figura I.14. | Participantes del Mercado Eléctrico..... | 42 |
| Figura I.15. | Participación de energías renovables en la generación de energía eléctrica para los años 2018, 2024 y 2027 | 48 |
| Figura I.16. | Generación bruta hidroeléctrica (GWh) | 49 |
| Figura I.17. | Participación de tecnologías en la capacidad de generación eléctrica, 2029..... | 51 |
| Figura II.1. | Participación estimada de energía renovable en la producción de electricidad a nivel mundial, finales de 2015 | 55 |
| Figura II.2. | Generación de Energía Eléctrica Renovable..... | 56 |
| Figura II.3. | Estructura del Sol..... | 58 |
| Figura II.4. | Irradiancia espectral del Sol | 61 |
| Figura II.5. | Tipos de radiación solar | 62 |
| Figura II.6. | Irradiación global por estación del año..... | 65 |
| Figura II.7. | Irradiación global anual (kWh/m ² día) | 66 |
| Figura II.8. | Funcionamiento de una central CCP | 69 |
| Figura II.9. | Concentrador Cilindro-Parabólico | 70 |
| Figura II.10. | Concentrador lineal Fresnel | 71 |
| Figura II.11. | Central de torre central..... | 72 |
| Figura II.12. | Discos parabólicos con motor Stirling | 73 |
| Figura II.13. | Estructura de un panel fotovoltaico | 77 |
| Figura II.14. | Generador fotovoltaico | 78 |
| Figura II.15. | Funcionamiento de un sistema aislado..... | 84 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Figura II.16. | Estructura de soporte de generadores solares | 88 |
| Figura II.17. | Funcionamiento general de un sistema fotovoltaico interconectado a red | 89 |
| Figura IV.1. | Ubicación del proyecto | 98 |
| Figura IV.2. | Provincias fisiográficas de México | 100 |
| Figura IV.3. | Hydrografía del Estado de Chihuahua..... | 103 |
| Figura IV.4. | Uso de suelo y vegetación en el predio de proyecto | 105 |
| Figura IV.5. | Especies de aves observadas en la zona de proyecto | 108 |
| Figura IV.6. | Mamíferos observados en el área..... | 109 |
| Figura IV.7. | Regionalización del Estado de Chihuahua..... | 112 |
| Figura IV.8. | Elementos constructivos del proyecto | 117 |
| Figura IV.9. | Generadores fotovoltaicos con sistema de seguimiento solar | 119 |
| Figura IV.10. | Esquema básico del funcionamiento de la central eléctrica solar fotovoltaica | 122 |
| Figura IV.11. | Tipo de vegetación (a) y zonas ya fragmentadas (b) en el predio | 129 |

Lista de Tablas

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tabla I.1. | Leyes secundarias derivadas de la Reforma Energética..... | 37 |
| Tabla I.2. | Cambios institucionales en el sector eléctrico derivados de la Reforma..... | 39 |
| Tabla II.1. | Albedo de algunas superficies para valores diarios de radiación | 64 |
| Tabla II.2. | Comparación entre los distintos tipos de celdas solares | 75 |
| Tabla II.3. | Principales módulos fotovoltaicos..... | 77 |
| Tabla III.1. | Impactos negativos y recomendación de medidas de mitigación en los proyectos solares 96 | |
| Tabla IV.1. | Familias y especies de flora más representativos en la zona de proyecto | 106 |
| Tabla IV.2. | Impactos asociados a las etapas y actividades del proyecto | 124 |
| Tabla IV.3. | Impactos identificados en del proyecto | 126 |
| Tabla IV.4. | Medidas de mitigación del proyecto | 131 |

Introducción

El rápido crecimiento demográfico al que nos enfrentamos hoy en día es una situación preocupante, no sólo por el hecho en sí mismo, sino por todas las consecuencias que esto genera. En el intento por dar respuesta a las exigencias de la población presente, y también futura, el sistema de producción sea vuelto intensivo, agotando los recursos naturales, deteriorando el medio ambiente y aumentando la vulnerabilidad de las comunidades más pobres. Lo anterior, sumado a la alta dependencia a los combustibles fósiles y a los altos niveles de consumismo han sido el origen de uno de los problemas más graves que aqueja a la sociedad en la actualidad: el cambio climático.

El cambio climático es la evidencia más clara de la necesidad de transformar el modo de vida de las sociedades y transitar hacia un sistema de producción más amable con el medio ambiente. Por ello es que las autoridades internacionales han desarrollado una serie de iniciativas y tratados para promover el desarrollo sostenible y proporcionar las bases para el diseño e implementación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en todos los sectores. A través del *Acuerdo de París* (2016) y los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (2015) se ha establecido la meta de no permitir que la temperatura del planeta aumente más de 2°C por lo que se define una serie de acciones a largo plazo para lograrlo, en las que se reconoce la importancia de la participación de todos los sectores de la sociedad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este contexto, México ha asumido la responsabilidad de reducir sus emisiones contaminantes a la atmósfera y ha tomado un papel activo en los esfuerzos internacionales para mitigar los efectos del cambio climático en todos sus instrumentos de política ambiental. Uno de los ejemplos más claros de lo mencionado con anterioridad es el sector energético, uno de los sectores con mayores emisiones registradas en el país. Este sector experimentó uno de los cambios más grandes en su historia con la *Reforma Energética* pues en ella se han sentado las bases para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, que son la

base en la producción de energía, y optar por energías limpias y renovables que fomenten el crecimiento económico y el cuidado de los recursos naturales.

En el caso de las energías renovables, éstas han cobrado relevancia en el mundo debido a los beneficios sociales, ambientales y económicos que proporcionan. Dentro de las energías renovables, la energía solar ha llamado la atención debido a las facilidades técnicas en el desarrollo de proyectos de esta naturaleza y su escaso impacto ambiental en las regiones en las que se llevan a cabo. Específicamente, la energía solar fotovoltaica es la que presenta un alto crecimiento en el mundo y la que atrae mayores recursos financieros.

México se ha ido posicionando como uno de los países con mayor importancia para el sector de la energía solar fotovoltaica debido a su alto recurso solar ya que los niveles de radiación, principalmente en los estados del norte, son altos. El empleo de la energía solar fotovoltaica para la generación de electricidad es importante porque ha permitido satisfacer las demandas de comunidades rurales del país que no tienen acceso a este servicio y ha sido impulsado a través de la *Reforma Energética*.

Considerando lo anterior, el presente documento busca brindar un panorama general acerca de la situación actual del sector energético a nivel nacional e internacional y del crecimiento de las energías renovables, específicamente de la energía solar fotovoltaica, en la generación de electricidad. Asimismo, pretende mostrar las oportunidades y retos que tiene la ingeniería civil en el diseño y ejecución de proyectos de energías renovables. Para responder a los objetivos de la tesis, el contenido ha sido estructurado en 5 capítulos:

- En el **capítulo 1**, se explican los aspectos generales del cambio climático y el contexto actual de sector energético actual, incluyendo el desarrollo de energías renovables, enfocándose en la energía solar fotovoltaica.
- El **capítulo 2** tiene como tema principal el funcionamiento de las centrales solares para la generación de energía eléctrica. Se describen los aspectos técnicos que intervienen en el funcionamiento de las centrales termoeléctricas y fotovoltaicas.

- En el **capítulo 3** se describen los impactos potenciales de los proyectos solares para la generación de electricidad y las medidas de mitigación correspondientes.
- En el **capítulo 4**, se describe el caso de estudio correspondiente a la construcción de una planta solar fotovoltaica en el estado de Chihuahua. Se explican las características generales del proyecto, así como los impactos potenciales identificados y sus medidas de mitigación, retomando lo estudiado en los capítulos 2y3.
- Finalmente se formulan las conclusiones del proceso de investigación y algunas recomendaciones a tomar en cuenta durante la ejecución de centrales solares fotovoltaicas.

Objetivo

Analizar la situación del sector energético actual en México y su relación con el cambio climático para identificar los retos y oportunidades para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica. Asimismo, pretender mostrar el proceso a seguir y las consideraciones a tomar en cuenta para la ejecución de cualquier central eléctrica solar fotovoltaica y la intervención de la ingeniería civil en el proceso.

Capítulo I. Antecedentes

I.1 Cambio climático

La evolución de los grupos humanos y, por ende, de sus necesidades ha ocasionado que se produzcan cambios en los sistemas económicos y productivos. A medida que el ser humano ha encontrado la manera de satisfacer dichas necesidades ha transformado el medio en el que se desarrolla y su manera de interactuar con la naturaleza y con los recursos que ésta le brinda; la interacción entre el hombre y la naturaleza ha sufrido una metamorfosis desafortunada a través de los años hasta traducirse en riesgos e impactos deleznable para la sociedad.

La globalización y la tecnología, además de los beneficios indudables que han traído a los seres humanos, han acentuado el consumismo y las actividades industriales provocando así un cambio determinante en el modo de vida actual y llevándonos a tal estado de enajenación que hemos exigido demás al medio ambiente hasta originar uno de los grandes problemas del siglo XXI: el cambio climático.

La *Ley General de Cambio Climático* define el cambio climático como la *“variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”*; para dar más claridad a la definición anterior, es necesario realizar un análisis de las causas del cambio climático, tanto naturales como antropogénicas, profundizando en estas últimas, así como de los impactos y riesgos derivados de dicho fenómeno.

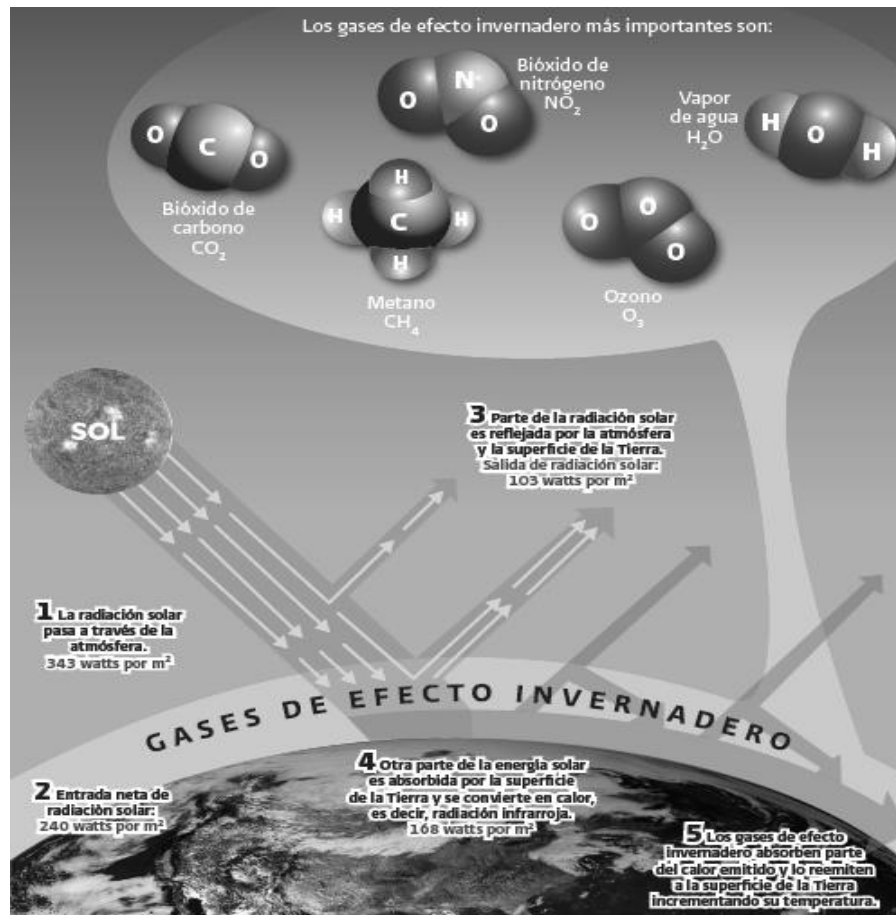
I.1.1 Origen del cambio climático

La génesis del cambio climático está asociada al funcionamiento de la atmósfera de la Tierra, la cual, en condiciones óptimas, permite que se lleven a cabo procesos que favorecen la vida en el planeta. La atmósfera terrestre es una capa gaseosa, formada por aire seco (el cual está compuesto por nitrógeno (N_2) en un 78%, oxígeno (O_2) 21%,

argón (Ar) y dióxido de carbono (CO_2) 1%, entre otros gases) y vapor de agua, tiene un espesor aproximado de 200 km y está formada por la troposfera, la estratosfera, la mesosfera y la ionosfera, las cuales poseen funciones específicas acordes a sus características físicas (Bureau Veritas , 2008).

La atmósfera cumple funciones que permiten el desarrollo de los grupos humanos y seres vivos, de ahí su importancia. Una de las funciones que tiene mayor relevancia para nuestro planeta es la regulación de la temperatura a través de la absorción de radiaciones infrarrojas que llegan a la superficie terrestre; esta absorción se da a través de moléculas de agua y de los denominados gases de efecto invernadero (GEI): dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y ozono (O_3) (SEMARNAT, 2009), principalmente, para después ser reflejados en forma de calor hacia la superficie terrestre , provocando así el calentamiento de ésta y de la sección inferior de la atmósfera. Al fenómeno descrito anteriormente, se le llama efecto invernadero (ver figura 1.1) y es el que impide que la Tierra presente temperaturas extremas. (Bureau Veritas , 2008)

Otra de las funciones de la atmósfera es la filtración de las radiaciones solares las que, según su tipo, son detenidas a través de las distintas capas atmosféricas y, con ello, se filtra la cantidad de energía adecuada para permitir la existencia de los seres vivos de la Tierra.



Fuente: (SEMARNAT, 2009)

Figura I.1. Proceso del fenómeno de efecto invernadero

Mencionado lo anterior, podemos afirmar que cualquier alteración en la composición química de la atmósfera podría ocasionar severos impactos en los diferentes ecosistemas terrestres así como en las diversas actividades que lleva a cabo el ser humano. El incremento en la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, resultado de procesos naturales y humanos, ha provocado variaciones considerables en el clima del planeta, siendo más graves en los últimos años, por lo que es necesario conocer cuáles son las causas de dicho incremento para contrarrestarlas de la mejor manera. Las causas pueden ser de distinta índole, no obstante, la mayoría de estas causas son antropogénicas, generalmente las más perniciosas. A continuación, se describen brevemente las causas debidas a procesos

naturales y, con mayor detalle, las atribuidas a los seres humanos, pues son estas últimas las que gozan de mayor importancia para los fines del presente documento.

Causas naturales

Como ya se ha mencionado, el cambio climático tiene su origen en actividades humanas y en procesos naturales. Los procesos naturales que repercuten en la variabilidad natural del clima pueden resumirse en dos procesos: forzamientos externos y naturales internos (Ramírez López, 2009).

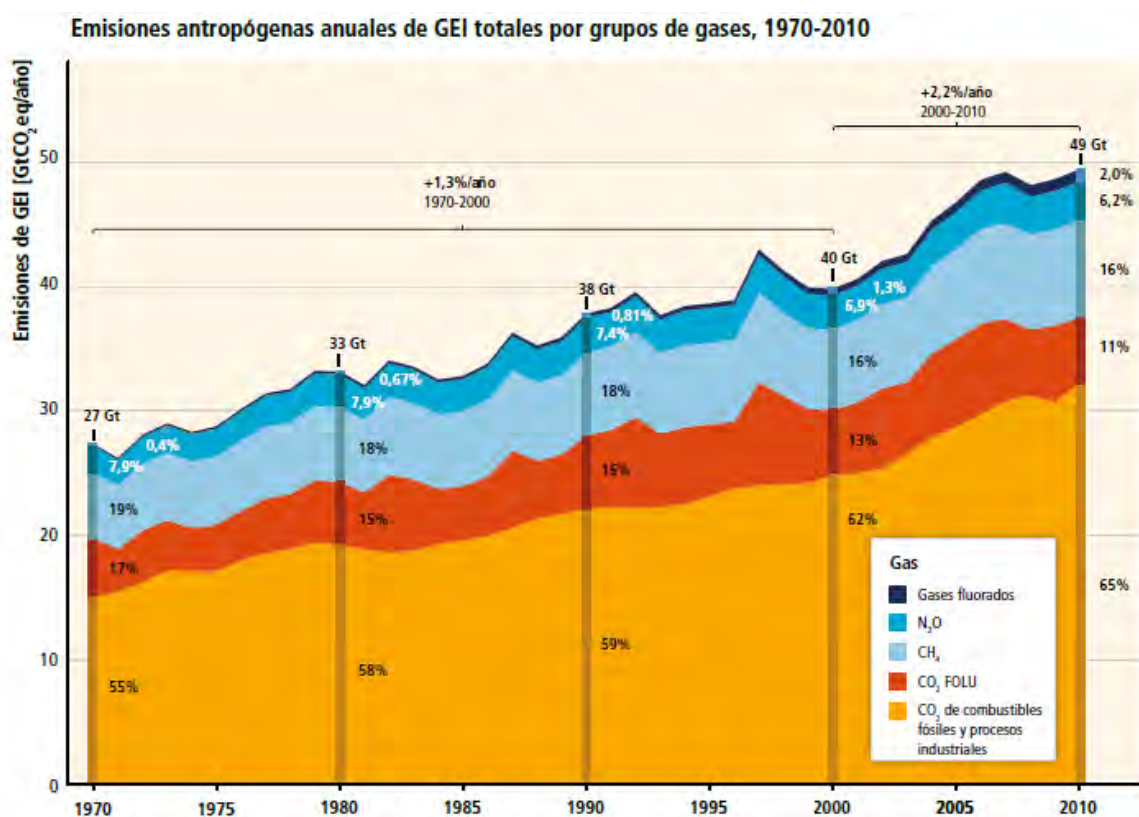
Los procesos de forzamiento externo, según la definición del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), son ajenos al sistema climático e inducen a un cambio en éste. Dentro de los procesos de forzamiento externos se encuentran las variaciones solares, variaciones orbitales y los impactos de meteoritos, los cuales se producen en grandes periodos de tiempo por lo que no tienen repercusiones significativas en nuestros días.

Por su parte, los procesos naturales internos, que nos son más familiares, incluyen las actividades volcánicas, las corrientes marinas y procesos en la atmósfera. Estos procesos tienen efectos de corta duración en el clima por lo que, al igual que los anteriores, no requieren mayor atención.

Causas antropogénicas

La alteración al proceso natural del efecto invernadero ha propiciado que el cambio climático se intensifique y que los estragos sufridos debido a este hecho se hagan más evidentes a nivel mundial. Dicha alteración se debe, principalmente, a la emisión de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3) a la atmósfera, aumentando así la concentración de estos compuestos. La concentración de dióxido de carbono se ha acentuado de manera alarmante en los últimos años según datos del IPCC, por lo que las acciones llevadas a cabo para mermar los impactos del cambio climático están enfocadas en la reducción de este gas.

En la figura I.2 puede observarse la evolución de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero en el periodo comprendido de 1970-2010. Como puede observarse, el CO_2 es el gas con mayor emisión siendo sus principales fuentes el cambio de uso de suelo y la quema de combustibles fósiles.



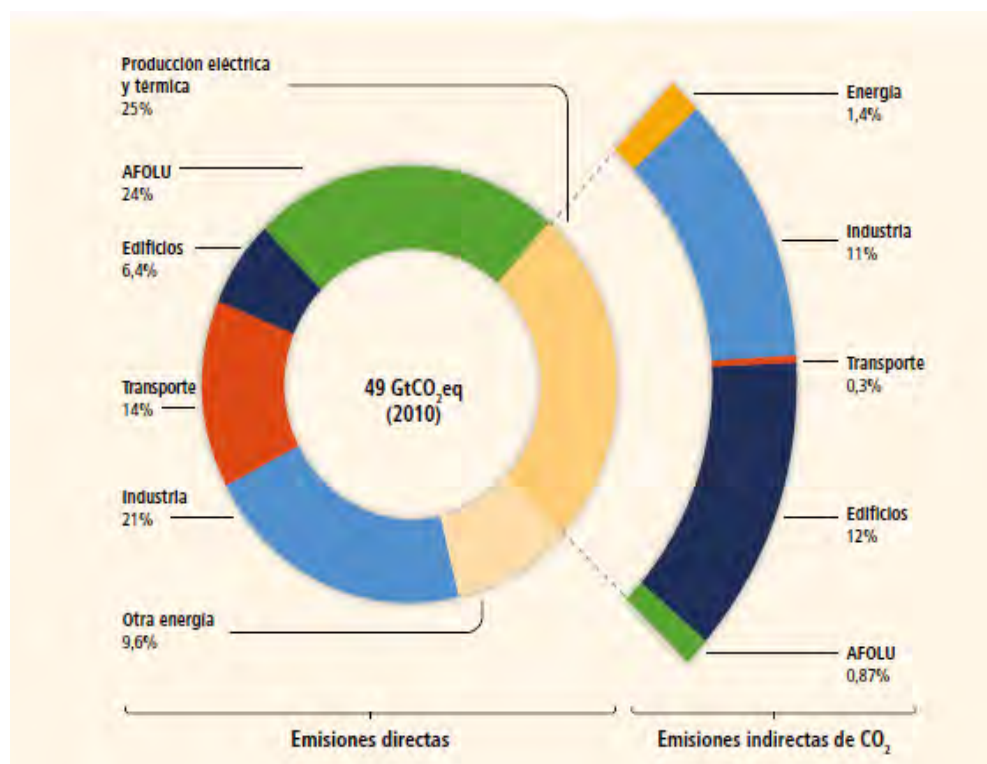
Fuente: Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2014.

Figura I.2. Gases emitidos por actividades antropogénicas de 1970-2010.

La quema de combustibles fósiles, derivada de la generación de energía eléctrica y de diversos procesos industriales y las actividades relativas al cambio de uso de suelo como la agricultura, la silvicultura y otros usos de suelo (AFOLU), se ha incrementado en manera proporcional al crecimiento demográfico y al desarrollo económico. Sectores como el energético, el de transportes y los relacionados a actividades AFOLU se ha convertido en las principales fuentes de emisión de GEI lo que reafirma la necesidad de promover el desarrollo sostenible en comunidades urbanas y rurales. En el periodo que va de 1751 a 2011, la quema de combustibles

fósiles y la producción de cemento emitieron a la atmósfera 375 Gt de dióxido de carbono, otras actividades como la deforestación y el cambio de uso de suelo liberaron 180 Gt, sumando un total de 555 GtC. Cabe mencionar que del total de estas emisiones, el 43% se acumula en la atmósfera, otro 28% es incorporado al océano y el 29% restante se almacena en ecosistemas terrestres naturales (IPCC, 2013).

En la figura I.3 se observa que el sector energético y el sector AFOLU son las principales fuentes de CO_2 a nivel mundial. Durante la producción de energía eléctrica y térmica se presentan emisiones directas, sin embargo, las emisiones indirectas que resultan de su disposición en sectores como el de transportes y el industrial también representan una cantidad significativa, por otra parte, los incendios forestales y la quema y descomposición de turba (mezcla de estiércol y carbón mineral) son los principales contribuyentes de emisiones en el sector AFOLU (IPCC, 2014).

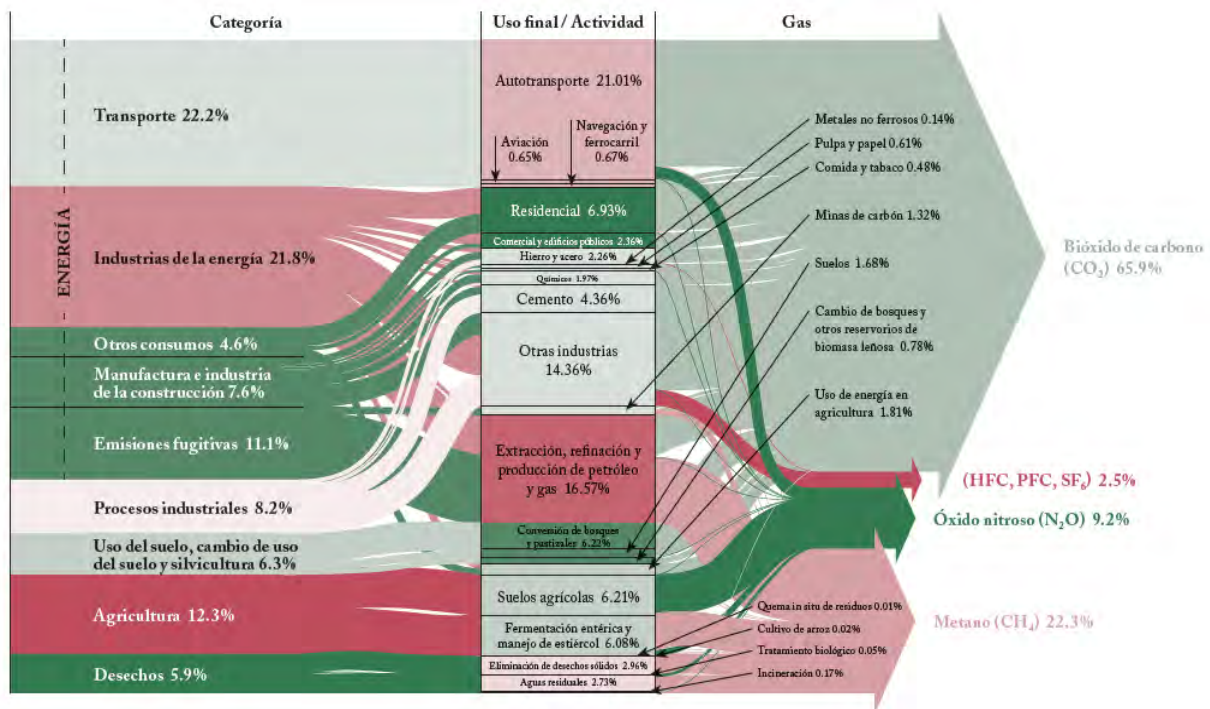


Fuente. IPCC, 2014.

Figura I.3. Emisiones de gases de efecto invernadero por sector económico.

Durante el 2010, en México los sectores que presentaron la mayor emisión de GEI fueron el de transportes (22.2%) y el sector de la industria de la energía (21.8%), ambos sectores tuvieron una contribución considerable en sus disposiciones finales en la industria del cemento, hierro y acero y química

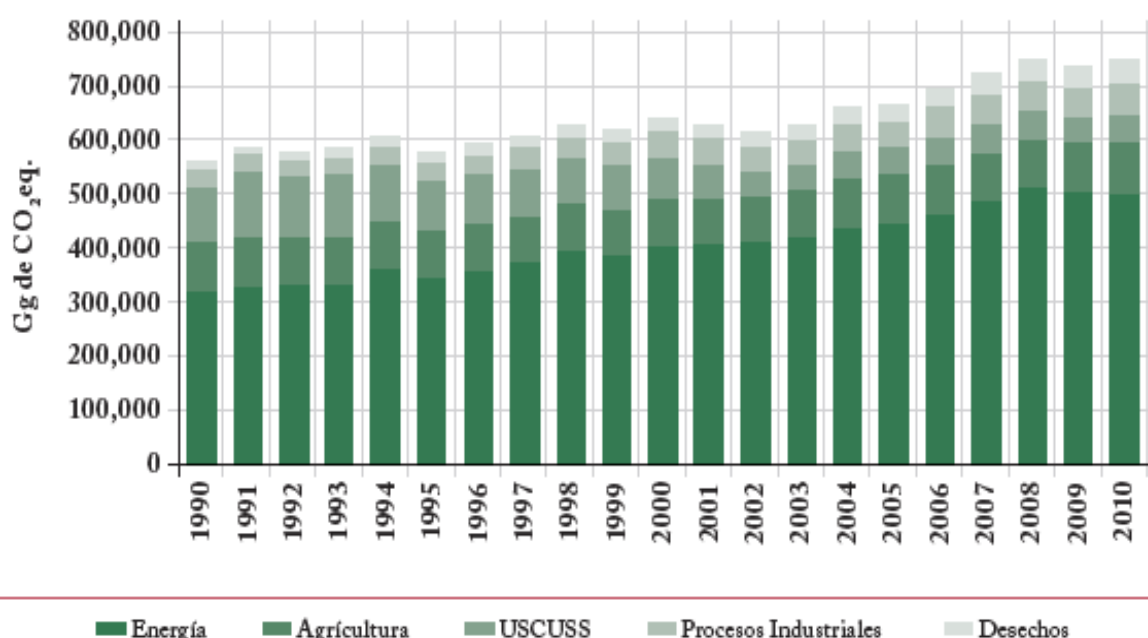
En relación a los gases emitidos, el dióxido de carbono fue el más emitido en nuestro país en el 2010 al representar, aproximadamente, el 66% del total de emisiones, originado en la producción de metales no ferrosos, tabaco y comida y pulpa para papel, así como en actividades mineras, agrícolas y en cambio de bosques. El metano, segundo gas con mayor emisión (22.3%), se derivó del cultivo de arroz, incineración, quema y tratamiento de residuos. Otros gases como el óxido nitroso, los perfluorocarbonos (PFC), los hidrofluorocarbonos (HFC) y el hexafluoruro de azufre (SF6) se emitieron en procesos industriales y agrícolas. (SEMARNAT, 2013) (Ver figura I.4).



Fuente. Inventario Nacional de Emisiones, 2010.

Figura I.4. Diagrama de emisiones GEI para México (2010).

Según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del 2010 (SEMARNAT, 2013) el sector de energía fue el que presentó una mayor generación de GEI con un 67.3% del total de emisiones registradas. Los sectores de agricultura y USCUS (Uso de suelo y cambio de uso de suelo) representaron, aproximadamente, el 19% de las emisiones; sectores como el de desechos y agricultura no tuvieron una contribución alarmante. Las cantidades anteriores presentan una variación considerable si se comparan con las emisiones registradas durante el año base de 1990, lo cual muestra la evolución de los procesos productivos en los diferentes sectores económicos de México así como la dependencia a los combustibles fósiles para la generación de energía, asimismo pone en evidencia los cambios en las actividades de producción agrícola, pecuaria, silvícola, industrial y de servicios, y de aquellas relativas a los usos de suelo en el país. Ver figura I.5.



Fuente. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010

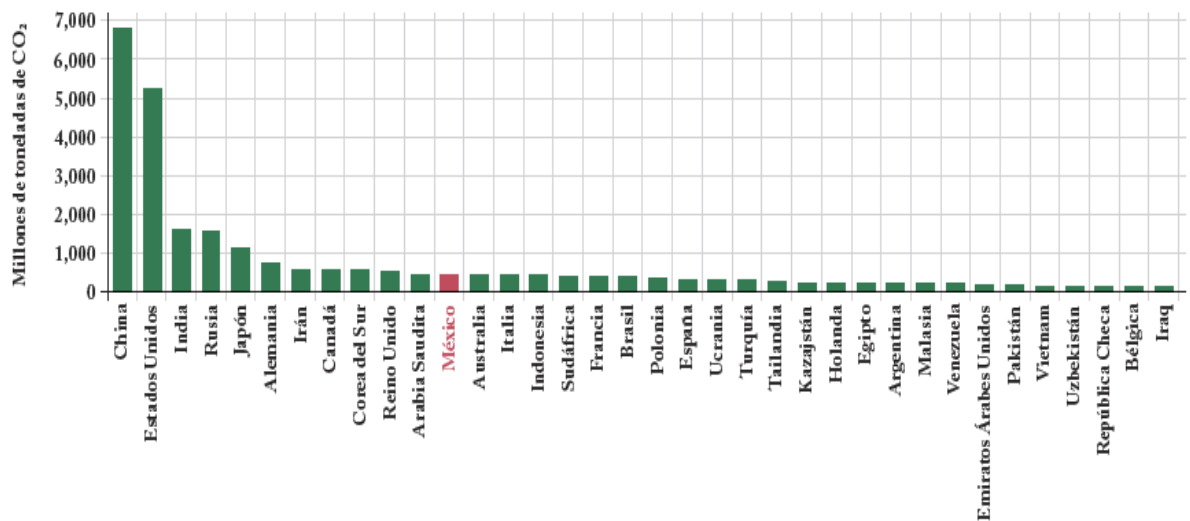
Figura I.5. Tendencia de las emisiones de GEI en México (1990-2010)

En el 2009, la Agencia Internacional de Energía (AIE) realizó una estimación de las emisiones registradas por la quema de combustibles a nivel internacional. Para la realización de dicho análisis, se consideraron factores como el ingreso *per cápita*, el

Producto Interno Bruto (PIB) y el Índice de Desarrollo Humano (IDH) de 134 países; dicho estudio reveló que en América Latina, Brasil, Argentina y México (1.4%) contribuyen con el 3.8% del total de emisiones mundiales lo que no representa una cantidad significativa en comparación con países como Estados Unidos y China, los cuales contribuyen con el 18.6% y 24.4% del total de las emisiones globales. (SEMARNAT, 2013)

Las conclusiones que se obtuvieron de la estimación de emisiones generadas por la quema de combustibles fósiles son que los países con menor ingreso por habitante emiten una mayor cantidad de dióxido de carbono al recurrir a la quema de combustibles como la leña y, contrariamente, países que utilizan fuentes de energía renovables presentan emisiones menores por habitante sin importar que los ingresos sean mayores (SEMARNAT, 2013).

Con base en las estimaciones de la AIE, México ocupa el lugar número 12 en la emisión global de CO_2 , lo que se muestra en la figura I.6.



Fuente. Inventario Nacional de Emisiones de GEI 1990-2010.

Figura I.6. Países con mayor contribución de emisiones de CO_2 por quema de combustibles fósiles (2009)

I.1.2 Impactos y evidencias del cambio climático

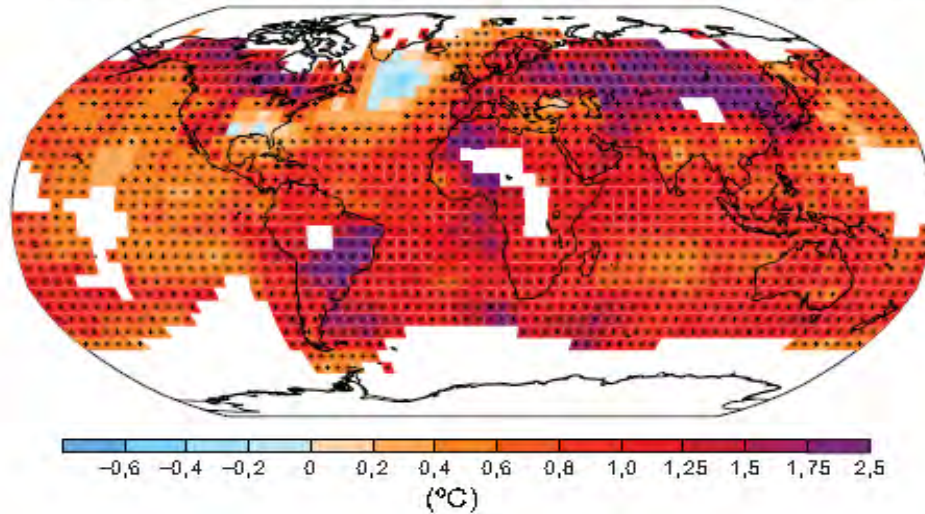
La modificación de procesos naturales, resultado del incremento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, ha agravado los efectos negativos del cambio climático a nivel global, tales efectos se han vuelto más evidentes y severos en los últimos años.

Según los reportes del IPCC (IPCC, 2013), los impactos del cambio climático se han observado principalmente en los mares y océanos, en la atmósfera, en la alteración de los ciclos biogeoquímicos de algunos elementos y en los cambios de precipitación registrados. Los impactos que han sido estudiados en los últimos años están relacionados con el calentamiento de la atmósfera y el océano, la disminución de volúmenes de hielo y nieve, el aumento en el nivel del mar y en las concentraciones de gases de efecto invernadero.

Los estudios realizados por el IPCC indican que la superficie de la Tierra se ha tornado más cálida en los últimos años, de hecho, se estima que la temperatura del hemisferio norte registrada en el periodo de 1983-2012, fue la más cálida de los últimos 1400 años. Por otra parte, la superficie oceánica y terrestre han tenido un calentamiento que va de los 0.65 a 1.06 °C lo que ha provocado que el planeta experimente un aumento general en su temperatura. (Ver figura I.7)

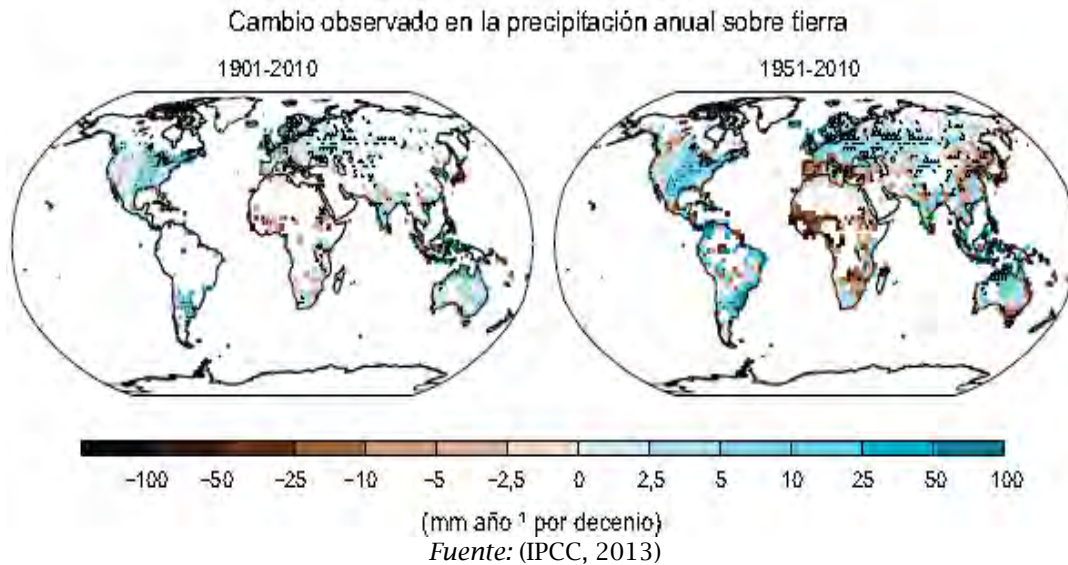
Aunado a las variaciones de temperatura y del calentamiento oceánico y de las capas de la atmósfera, se encuentran los cambios en fenómenos meteorológicos y climáticos, los que se traducen en el aumento de días y noches cálidos respecto al número de días y noches fríos, en la frecuencia de las ondas de calor en Europa, Asia y Australia y en la intensidad y frecuencia de precipitaciones en América del Norte y Europa (figura I.8).

Cambio observado en la temperatura en superficie, 1901-2012



Fuente: (IPCC, 2013)

Figura I.7. Cambios en la temperatura de la superficie del planeta.



(mm año⁻¹ por decenio)
Fuente: (IPCC, 2013)

Figura I.8. Cambios en la precipitación anual del planeta.

La disminución de los cuerpos de hielo y nieve en el Ártico y la Antártida son de los impactos más analizados al tratar el tema de cambio climático y es que diversos estudios han señalado que el hielo en Groenlandia y la Antártida han ido perdiendo volumen y que los glaciares de todo el mundo también se han reducido. La pérdida de los mantos de hielo aumentó del periodo comprendido de 1992-2001 al periodo

entre 2002-2011, registrando pérdidas de 30 (-37 a 97) Gt/año y de 147(72 a 211) Gt/año, respectivamente. El derretimiento del hielo del Ártico y el aumento de la temperatura del planeta han provocado un aumento en el nivel medio del mar, el cual ha sido estimado en 0.19 m (1901-2010).

Las reducciones en los mantos de hielo del Ártico son producto del calentamiento del planeta, sin embargo, se ha observado que, de manera contraria, los cuerpos de hielo de la zona antártica han aumentado en rangos que van del 1.2% al 1.8%, aproximadamente, según lo registrado en el periodo de 1979 y 2012 (IPCC, 2013). No se tiene certeza acerca de las causas que provocan este incremento en los hielos antárticos, sin embargo, las hipótesis señalan que se debe a al aumento en los vientos del sur, lo que supondría un cambio en la dirección normal de los vientos, fenómeno que no puede ser explicado con precisión debido a la falta de conocimiento que aún se tiene de la Antártida (BBC, 2015).

Además de los impactos ya mencionados, se ha observado que los ciclos biogeoquímicos, específicamente el ciclo del carbono, han sido afectados por el aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Las emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles y de las actividades de cambio y uso de suelo han impactado en las concentraciones de dióxido de carbono, las cuales han aumentado en un 40% desde la era preindustrial. La concentración de dióxido de carbono no sólo agudiza el efecto invernadero, sino que además provoca la acidificación de los océanos ya que éstos absorben el dióxido de carbono; según el IPCC, los océanos han absorbido el 30% de las emisiones antropógenas de CO_2 (IPCC, 2013).

Aunque ya se han descrito los principales impactos del cambio climático, existen otros que por su naturaleza no carecen de relevancia debido a la afectación que podrían tener sobre la economía mundial y, en consecuencia, sobre los grupos humanos, por ejemplo:

- Modificación en las áreas de distribución geográfica, rutas migratorias y comportamiento estacional de especies terrestres y marinas

- Cambios negativos en el rendimiento de los cultivos, en especial de los cultivos de trigo, maíz y soja.
- Aumento de la mortalidad debido al cambio de temperatura, en este caso, asociada al calor (en algunas regiones se puede presentar el efecto inverso, es decir, disminución de la mortalidad asociada al frío)
- Sequías, inundaciones, olas de calor, ciclones e incendios forestales.

I.1.3 Escenarios frente al cambio climático

Las afectaciones del cambio climático en ecosistemas terrestres y marinos podrían agravarse si es que no se toman las medidas necesarias. El IPCC, con base en modelos climáticos y observaciones, ha planteado una serie de escenarios¹ con el fin de conocer cuáles serán las condiciones futuras del planeta si es que las tendencias actuales del cambio climático siguen su rumbo como hasta ahora.

De acuerdo a los escenarios que se han planteado, el futuro climático no resulta muy alentador ya que se estima que la temperatura media anual durante el periodo 2016-2035 aumentará entre 0.3° y 0.7°C, en comparación con la temperatura registrada de 1986-2005. A largo plazo, es decir, en el periodo 2081-2100, la temperatura aumentará entre 2.6°C y 4.8°C, considerando una alta emisión de gases de efecto invernadero. Asimismo, el incremento de la temperatura afectará con mayor fuerza las regiones terrestres en comparación con las oceánicas, siendo la región del Ártico la que presente un mayor calentamiento, y se presentarán situaciones climáticas extremas, lo que significaría un aumento en la frecuencia de temperaturas extremas calientes y en la disminución de temperaturas frías, las cuales se presentarían como inviernos fríos extremos (IPCC, 2013).

¹ El IPCC define un escenario como una “*descripción plausible de un futuro verosímil, basada en un conjunto consistente y coherente de supuestos sobre las fuerzas motrices (por ejemplo, el ritmo de la evolución tecnológica y los precios) y sobre las relaciones más importantes*”.

En la figura I.9 puede observarse el cambio en la temperatura media anual de acuerdo a los cuatro escenarios planteados por el IPCC en su *Quinto Informe* (IPCC, 2013): RCP 8.5 (escenario con altas emisiones de GEI), RCP 6.0 y RCP 4.5 (escenario con emisiones de GEI estables) y RCP 2.6 (escenario con emisiones GEI bajas)².

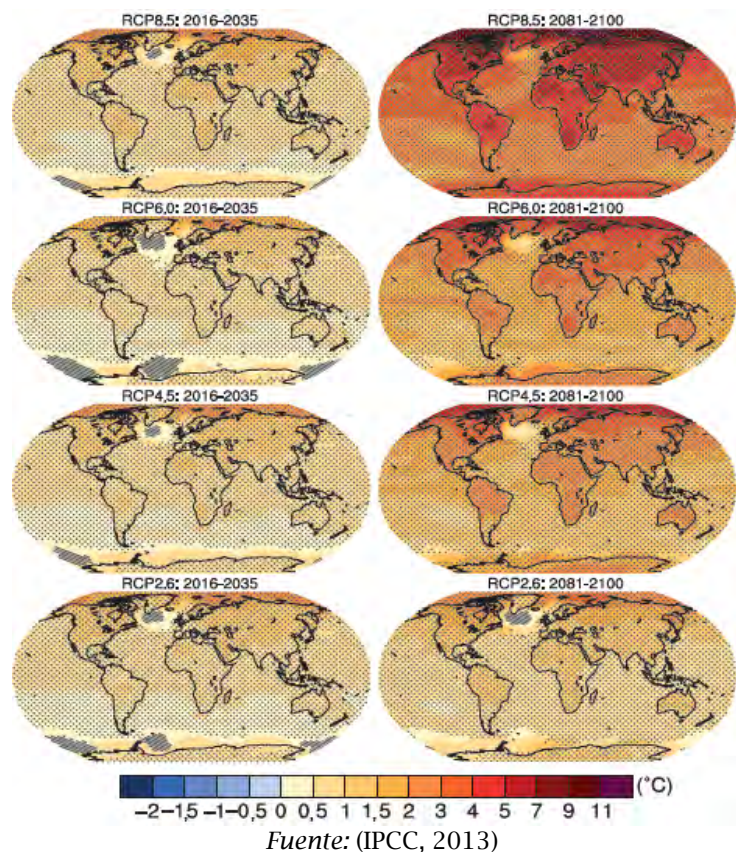


Figura I.9. Cambio en la temperatura media anual

El ciclo hidrológico, actualmente ya modificado, continuará sufriendo cambios, lo que se verá reflejado en el aumento de precipitaciones a nivel global. Es de llamar la atención la disparidad de precipitaciones que se presentará ya que en algunas regiones habrá un aumento en éstas y en otras habrá una disminución considerable, todo ello resultado del cambio de humedad y del transporte del vapor de agua; las regiones áridas, semiáridas y subtropicales ubicadas en latitudes medias

² Escenarios de emisión, establecidos por el IPCC en su Quinto Informe, denominados *Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés)*.

experimentarán una disminución de precipitaciones mientras que en las regiones húmedas aumentarán (IPCC, 2013).

El aumento o disminución de las precipitaciones en el planeta está relacionado con el aumento de la temperatura global ya que, de forma paralela, aumenta la evaporación superficial en los océanos y se producen cambios en las regiones terrestres. Se estima que las escorrentías en la zona sur de Europa, Oriente Medio y África austral disminuyan y que en las regiones altas del hemisferio norte aumenten debido al incremento en las precipitaciones durante el invierno y la primavera. Algunas regiones podrían enfrentar sequías si es que se presentan las disminuciones que hasta ahora se han proyectado.

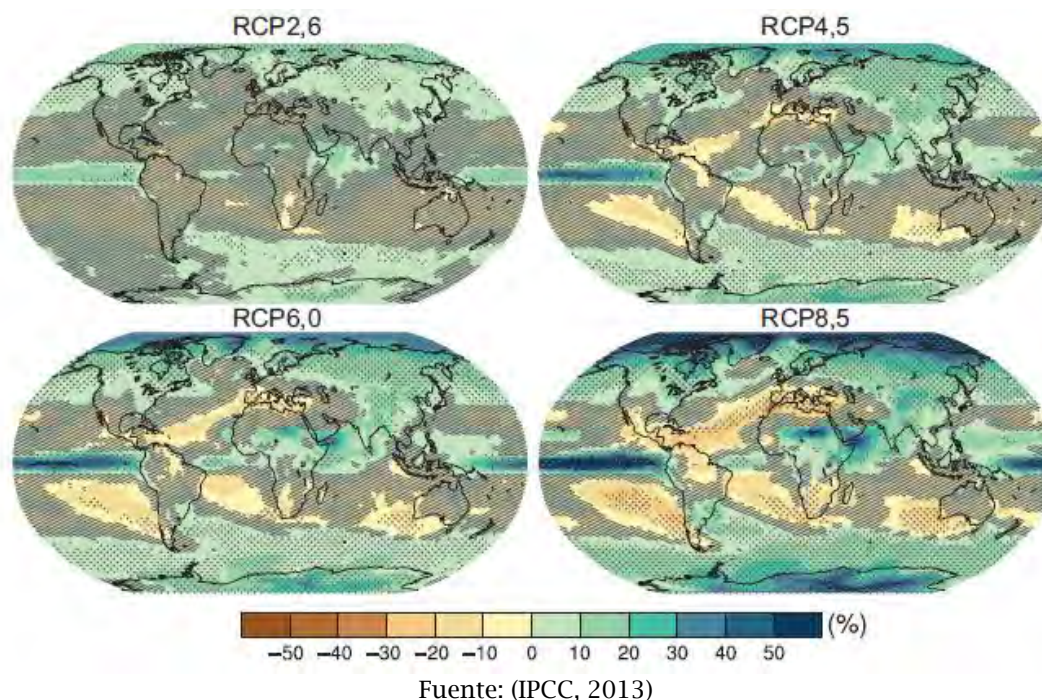


Figura 1.10. Cambio de la precipitación media anual (2081-2100)

Los cambios en las precipitaciones no sólo tienen impacto en las zonas terrestres, sino que también repercuten de manera considerable en los mantos de hielo, los cuales sufrirán reducciones en sus volúmenes, tal es el caso de los mantos de hielo del hemisferio norte. Las proyecciones indican que los cuerpos de hielo de este hemisferio experimentarán una reducción considerable, haciéndose más notable

durante la primavera, época en la que podrían presentar una reducción que variará del 7 al 25% a finales del siglo XXI, según sea el escenario de emisiones. De continuar con un alto nivel de emisiones GEI, el océano Ártico quedará casi libre de hielo a mediados del presente siglo. (IPCC, 2013)

El cambio climático ha alterado el proceso de los ciclos biogeoquímicos, en especial el ciclo del carbono, provocando el aumento de dióxido de carbono en los océanos y, en consecuencia, de su acidificación. El dióxido de carbono alcanzará las capas oceánicas más profundas y reducirá las cantidades de oxígeno disuelto; los estudios e investigaciones realizadas establecen que el ciclo de carbono continuará siendo alterado debido al aumento de dióxido de carbono presente en la atmósfera.

Los océanos, además de acidificarse, experimentarán un aumento en su temperatura en un rango que va de los 0.3 a los 2 °C dentro de los primeros 100m a finales del siglo, siendo las superficies oceánicas de las regiones tropicales y subtropicales las que muestren un calentamiento más intenso.

Los fenómenos climáticos también sufrirán modificaciones en sus procesos naturales. Por ejemplo, se prevé que la fecha de comienzo de los monzones³ sea incierta, pudiendo ésta adelantarse, y que las fechas de retirada se retrasen, lo que provocaría que las estaciones monzónicas fueran más prolongadas en algunas regiones. Por otra parte, las lluvias estacionales podrían acentuarse en ciertas regiones y disminuir en otras como América del Norte y Central, el Caribe, América del Sur, África y Asia Occidental, provocando severas sequías.

Las proyecciones indican que los ciclones tropicales mostrarán cambios en la velocidad de los vientos y en la intensidad de sus precipitaciones, de ser así, las precipitaciones más extremas sucederán en las zonas de América del Norte y Central, en África Oriental, en el oeste, este, sur y sureste de Asia, así como en Australia y en la gran mayoría de las islas del Pacífico (IPCC, 2013).

Sumado a los escenarios proyectados en el nivel del mar, la temperatura global, los océanos, los fenómenos climáticos, las precipitaciones y los ciclos biogeoquímicos,

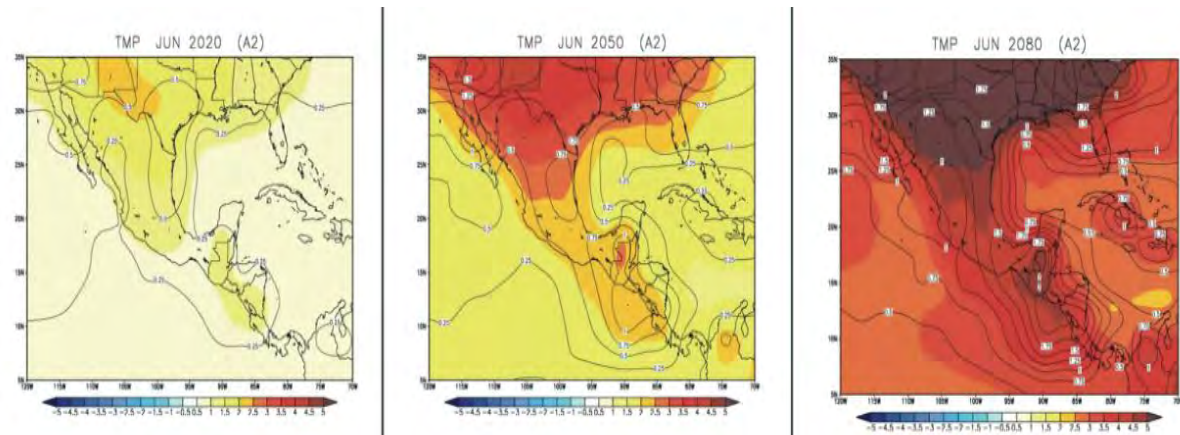
³ *Un monzón es un cambio estacional en la dirección de los vientos entre el continente y el océano (CONAGUA, 2016).*

los expertos han señalado la probabilidad de que se produzca un aumento en la altura de las olas así como en las temporadas de oleaje en el océano Ártico (IPCC, 2013).

Escenarios para México

Los escenarios climáticos pronosticados para México no difieren en gran medida de los que se han modelado a nivel global. Las condiciones climáticas futuras dependerán del desarrollo socioeconómico del país, ya que dicho desarrollo se encuentra estrechamente relacionado con la cantidad de GEI emitida a la atmósfera.

Con base en los modelos climáticos elaborados para México, se estima que la temperatura se eleve en un rango de 2 a 4°C para el 2050 y que la parte más continental del norte del país sea la que experimente un mayor calentamiento. Por su parte, las precipitaciones disminuirán en aproximadamente un 15% en regiones del centro de México y de menos del 5% en la zona costera del Golfo (INECC,SEMARNAT, 2006), (figuras I.11 y I.12).



Fuente: (INECC,SEMARNAT, 2006)

Figura I.11 Escenarios de cambio en la temperatura, durante el mes de junio para México, en los años 2020,2050 y 2080. (Considerando un alto nivel de emisiones GEI).

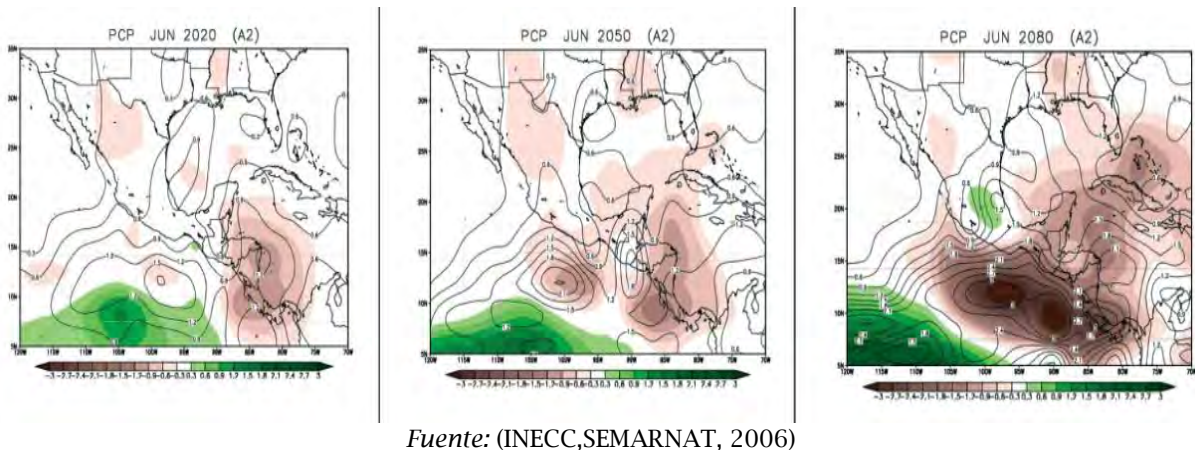


Figura 1.12. Cambios en la precipitación proyectados para 2020, 2050, 2080, considerando un alto nivel de emisiones.

Los fenómenos climáticos extremos, como los huracanes, ciclones tropicales y frentes fríos, presentarán ciertas alteraciones, sin embargo, los estudios realizados aún muestran cierto grado de incertidumbre respecto a ello. Las proyecciones indican que los frentes fríos podrían ser menos frecuentes y que, en consecuencia, las precipitaciones en la vertiente del Golfo también disminuyan. Considerando los datos actuales, los ciclones tropicales aumentarán su intensidad en un 14%, las precipitaciones en un 18% y la intensidad de los vientos en un 6%, en un radio de 100 km respecto al centro del huracán (INECC,SEMARNAT, 2006).

También se ha planteado la hipótesis de que el ciclo hidrológico se altere y se vuelva más intenso, aumentando el número de tormentas y los periodos de sequía más extremos y prolongados en el país.

Debido al aumento de temperatura y la disminución en las precipitaciones se prevé la posibilidad de que la disponibilidad de agua en el país se encuentre en una situación crítica. La situación actual del recurso hídrico muestra que la disponibilidad es de aproximadamente 4,000 m^3 /hab/año presentando marcadas diferencias ya que en algunas regiones esta cifra se encuentra cercana a los 2500 m^3 /hab/año. Los escenarios para el 2020 señalan que la disponibilidad del agua en las regiones de Baja California, del Río Bravo y en las cuencas del norte será menor a los 1000 m^3 /hab/año (INECC,SEMARNAT, 2006).

Los escenarios en el sector hídrico son de los más alarmantes pues los grados de presión, en algunas zonas del país, se presentarán en rangos que van de fuertes a críticos. Para el año 2020, Baja California y Sonora pasarán a tener un grado de presión crítico mientras que Sinaloa, la Región Hidrológica de Lerma, la zona sur del país y la Península de Yucatán presentarán grados de fuertes a críticos.

Los escenarios climáticos hacen obvia la vulnerabilidad del sector forestal y del sector agrícola, en este último es de preocupar que se pierda la aptitud de la tierra para la siembra de maíz y la intensidad de las sequías. Dentro del sector forestal, para el año 2050, el 50% del territorio del país será modificado y, aproximadamente, el 20% de la superficie cambiará de climas cálidos a climas secos lo que repercutirá de manera negativa en algunos tipos de vegetación, siendo los más susceptibles los pastizales, los bosques de encino y los matorrales xerófilos (INECC, SEMARNAT, 2006).

Los escenarios en el aumento en el nivel del mar en México señalan que un aumento cercano a 1 metro podría ocurrir en los estados de Campeche, Nayarit, Quintana Roo, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán, lo que representaría una afectación al 1% en el territorio nacional. De los estados mencionados con anterioridad los más afectados serían Tabasco, Campeche y Quintana Roo, con un porcentaje entre 7% y 9% de territorio afectado (SEMARNAT, 2012).

I.2 México frente al cambio climático: Política en materia climática

Los impactos negativos que ha tenido el cambio climático sobre la sociedad han despertado la inquietud de las naciones por tomar las medidas correspondientes para hacer frente a este problema, pues de no ser así, los estragos podrían ser devastadores. En México, se ha reconocido la necesidad de participar en acciones e iniciativas enfocadas a mitigar los efectos del cambio climático y en la construcción de sociedades capaces de responder de manera responsable a éstos a través de estrategias y proyectos de adaptación.

Un paso relevante en México para encarar el cambio climático fue la publicación de la Ley General de Cambio Climático (LGCC) en el año 2012, con lo cual se convirtió

en el primer país subdesarrollado en contar con una legislación de tal índole. En términos generales, la LGCC establece las bases para actuar de acuerdo a dos ejes rectores: mitigación y adaptación al cambio climático; las acciones de mitigación incluyen el desarrollo de instrumentos que regulen las emisiones de GEI, como el Inventario Nacional de Emisiones y el Registro Nacional de Emisiones, y económicos que faciliten el desarrollo de proyectos, como el Fondo para el Cambio Climático. Las medidas de adaptación, propuestas en dicha ley, tienen por objetivo la creación de instrumentos que permitan elaborar diagnósticos que marquen la pauta para el desarrollo de instrumentos de planificación urbana y prevención de desastres naturales (INECC, SEMARNAT, 2012).

Sumado a lo anterior, la LGCC busca la participación de México en las negociaciones internacionales a través de la implementación de tratados y protocolos que sean acordes a las iniciativas nacionales. Por otra parte, con la creación del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y del Sistema Nacional de Cambio Climático y el fortalecimiento de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático se define un nuevo marco institucional a la vez que se incluye a la sociedad científica, civil, privada y al gobierno en la política nacional (INECC, SEMARNAT, 2012). Actualmente, la LGCC es la base sobre la cual se sustenta la política climática en México.

En el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (PND), en los ejes “México en Paz” y México Próspero”, se incluyen los principales objetivos por medio de los cuales se buscarán disminuir los riesgos sociales y económicos derivados del cambio climático. Resultado de los objetivos y líneas de acción propuestos en el PND y de la LGCC, surge el Programa Especial de Cambio Climático 2013-2018 (PECC) para establecer estrategias y líneas de acción a corto plazo. El PECC está enfocado en la reducción de la vulnerabilidad en los sectores sociales y económicos y en el aumento de su resiliencia y en el fortalecimiento de las estrategias nacionales así como en la conservación, restauración y manejo sustentable de los ecosistemas para garantizar la adaptación y mitigación al cambio climático (Presidencia de la República, 2013). *A través de este enfoque se promueve el fortalecimiento de capacidades institucionales y de la población, así como el diseño, priorización e implementación coordinada de*

acciones encaminadas a reducir la vulnerabilidad de los sistemas y el reconocimiento de que la prevención tiene un costo menor a la atención del desastre (Presidencia de la República, 2013).

La Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) visión 10-20-40, al igual que el PECC, se deriva de la LGCC, sin embargo, su alcance es a largo plazo. La ENCC es un instrumento de planeación que busca promover el desarrollo sostenible y bajo en emisiones GEI en el país con el uso de energías renovables y limpias y el manejo responsable de los recursos naturales. El objetivo central de la Estrategia es lograr la colaboración de todos los niveles de gobierno para orientar de manera correcta las líneas de acción y ejes estratégicos y, en consecuencia, transitar hacia una economía sustentable y baja en emisiones al tiempo que se cumple con los objetivos a nivel internacional (Presidencia de la República, 2013).

Lo ejes que rigen la Estrategia Nacional de Cambio Climático se apoyan en lo establecido en la LGCC, algunos de estos ejes se mencionan a continuación:

- *Sustentabilidad en el aprovechamiento o uso de los ecosistemas y recursos naturales.*
- *Prevención de los daños al medio ambiente y preservación del equilibrio ecológico.*
- *Integralidad y transversalidad al adoptar un enfoque de coordinación y cooperación entre órdenes de gobierno, así como con los sectores social, público y privado.*

A nivel nacional, también han sido elaborados los programas sectoriales, en los cuales se plantean las acciones ante el cambio climático que habrán de emprender la distintas Secretarías.

En lo que respecta al nivel subnacional, se ha logrado la colaboración de la comunidad científica y de las entidades federativas para la elaboración de los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). Los PEACC son instrumentos que sustentan el diseño de políticas de cambio climático a nivel estatal y municipal. La Ciudad de México (antes Distrito Federal) y los estados de Chiapas, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Puebla y Tabasco, entre otros, cuentan con su

PEACC mientras que los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche firmaron, en el 2010, la Declaratoria para la Acción Conjunta ante el Cambio Climático en la Península de Yucatán para desarrollar acciones de mitigación y adaptación (INECC, SEMARNAT, 2012).

El objeto común de los arreglos institucionales, estrategias y programas, mencionados con anterioridad, es la promoción de una economía sostenible y baja en emisiones así como el impulso de energías renovables y limpias en el país, sin embargo, las emisiones en el sector energía, uno de los más importantes para la economía nacional, continúan siendo altas por lo que es necesario el planteamiento de nuevas acciones que permitan disminuir el uso de combustibles fósiles para la producción de energía y encontrar alternativas que coincidan con las metas propuestas.

En el siguiente apartado se hace un breve análisis del sector energético, con un enfoque en la producción de energía, para conocer su situación actual y cómo puede desarrollarse teniendo bajas emisiones y manteniendo su eficiencia y alinearse con la política de cambio climático nacional.

I.3 Sector Energético y Desarrollo Sustentable en México

A través de las leyes, estrategias, iniciativas y acuerdos internacionales, en materia climática, celebrados por México, se ha asumido la responsabilidad de reducir las emisiones GEI como una forma de mitigar el cambio climático. El Protocolo de Kioto sentó las bases para que los países desarrollados pusieran en marcha metodologías y acciones para reducir sus emisiones de manera obligatoria, es decir, que sus emisiones no rebasaran el límite de emisiones permitido, de lo contrario, se harían acreedores a sanciones económicas significativas. México, al no ser un país desarrollado, decidió contribuir de manera voluntaria con dichos esfuerzos y se fijó la meta de reducir las emisiones, respecto al año 2000 (línea base), un 50% para el 2050.

La meta de reducción del país ha sido promovida a través de proyectos de planeación que buscan definir acciones enfocadas a tal fin, sin embargo, la dependencia a los combustibles fósiles en el sector energético para la producción de energía ha puesto en duda el compromiso de México.

La ineficiencia del sector energético mexicano en los últimos años es indudable ya que uno de los referentes en la materia, PEMEX, ha tenido un retroceso en su producción en comparación con las inversiones que se han hecho para reactivarlo. Si a este factor se le suman las amenazas del cambio climático por altas emisiones, se hace evidente la necesidad de modificar los modelos de producción energéticos, basados en fuentes no renovables como el petróleo, para garantizar un crecimiento económico en el sector y garantizar un desarrollo sustentable en el país. En este contexto, se gesta una de las acciones más importantes emprendidas por el ejecutivo federal en los últimos años: la Reforma Energética.

I.3.1 Reforma energética

El diagnóstico del sector energético mexicano arrojaba datos que exigían la transformación del marco regulatorio y constitucional de dicho sector. Las inversiones destinadas a Pemex para actividades de extracción y exploración no eran proporcionales a la producción de petróleo y se pasó de 3.4 millones de barriles diarios en 2004 a 2.5 millones de barriles diarios en el 2013.

El aumento en la importación de gas natural (30% en el 2013) puso de manifiesto la escasa capacidad técnica y económica de Pemex para satisfacer la demanda nacional. Asimismo, la gasolina y los petroquímicos reportaron porcentajes de importación altos en comparación con los reportados en 1997: 49% de la gasolina y 66% de los petroquímicos que se consumieron en el 2012 eran importados mientras que en 1997 estos porcentajes eran del 25% y 41%, respectivamente. Con base en las tendencias anteriores, los escenarios señalaban que México podría ser un importador de petróleo, gas natural y petrolíferos.

Fue en el 2013, cuando el Gobierno Federal presentó y aprobó las modificaciones constitucionales en materia de energía, siendo la más relevante la reforma a Pemex y la apertura del sector energético a la inversión extranjera. La Reforma Energética

significó la transformación del marco regulatorio que fijaba las reglas y administraba el mercado de la generación y distribución de la energía en nuestro país (Ruiz Rincón, 2015).

La Reforma Energética tuvo como objetivos fundamentales:

- Mantener la propiedad de la Nación sobre los hidrocarburos que se encuentran en el subsuelo
- Modernizar y fortalecer, sin privatizar, a Pemex y a la Comisión Federal de Electricidad como empresas productivas del Estado 100% mexicanas.
- Permitir que la Nación ejerza de manera exclusiva la planeación y control del sistema eléctrico nacional, en beneficio de un sistema competitivo que permita reducir los precios de la luz.
- Contar con un mayor abasto de energéticos a mejores precios.
- Garantizar estándares internacionales de eficiencia, transparencia y rendición de cuentas.
- Combatir de manera efectiva la corrupción en el sector energético.
- Fortalecer el ahorro de largo plazo a través de la creación del Fondo Mexicano del Petróleo para la Estabilización y el Desarrollo, en beneficio de las generaciones futuras.
- Impulsar el desarrollo con responsabilidad social y protegiendo al medio ambiente.
- Atraer inversión al sector energético mexicano para impulsar el desarrollo del país.
- Reducir los riesgos financieros, geológicos y ambientales en las actividades de exploración y extracción de petróleo y gas.

En el 2014, fue cuando la Reforma Energética terminó por tomar forma y fueron promulgadas las leyes secundarias en materia energética y, en ese mismo año, sus respectivos reglamentos. Se expidieron 9 leyes nuevas y se reformaron otras 12. En la tabla I.1 se resumen las nuevas leyes creadas a partir de la Reforma Energética, así como las que fueron reformadas.

Tabla I.1. Leyes secundarias derivadas de la Reforma Energética

| Leyes | Sector | | |
|------------|--|---|---|
| | Eléctrico | Hidrocarburos | Otros |
| Nuevas | <ul style="list-style-type: none"> • Ley de la Industria Eléctrica • Ley de Energía Geotérmica • Ley de la Comisión Federal de Electricidad | <ul style="list-style-type: none"> • Ley de Hidrocarburos. • Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente. • Ley de Petróleos Mexicanos. • Ley de Ingresos sobre Hidrocarburos. | <ul style="list-style-type: none"> • Ley de Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética • Ley del Fondo Mexicano del Petróleo para la Estabilización y el Desarrollo |
| Reformadas | <ul style="list-style-type: none"> • Ley de Aguas Nacionales | <ul style="list-style-type: none"> • Ley Minera | <ul style="list-style-type: none"> • Ley de la Inversión Extranjera • Ley de Asociaciones Público-Privadas • Ley Federal de las Entidades Paraestatales • Ley de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios del Sector Público • Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas • Ley Orgánica de la Administración Pública Federal • Ley Federal de Derechos • Ley de Coordinación Fiscal • Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria • Ley General de Deuda Pública |

Fuente: *Prospectiva de Energías Renovables 2014-2028* (SENER, 2014)

I.3.2 Reforma energética en el sector eléctrico

El sector eléctrico presentó cambios muy importantes derivados de la Reforma Energética. La Ley de la Industria Eléctrica es la más relevante para el sector ya que establece los principales cambios en la generación, transmisión, distribución y comercialización de la electricidad. Con la creación de esta ley se definen obligaciones en materia de energías limpias, acceso abierto, suministro, servicio universal, y electrificación a los participantes de esta industria (Lazo, et al., 2015).

La finalidad de la Ley de la Industria Eléctrica es promover el desarrollo de la industria eléctrica y garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal de energías limpias y reducción de emisiones contaminantes.

La Reforma Energética en el Sector Eléctrico comenzó a implementarse durante el 2014 y 2015, ya para el 2016 se dio inicio a las operaciones dentro del Mercado Eléctrico Mayorista lo que representó un gran cambio en la operación y dinámica de éste. En la figura I.13 se muestra el Plan de Implementación de la Reforma Energética en el sector eléctrico.

Los principales cambios al sector eléctrico que establece la Reforma son (PwC, 2015):

- El Centro Nacional de Control Eléctrico (CENACE) será un organismo público descentralizado encargado del control operativo del SEN, operación del mercado eléctrico mayorista, gestión del acceso abierto a la red nacional de transmisión y redes generales de transmisión.
- La Comisión Federal de Electricidad (CFE) transferirá los recursos al CENACE para que éste pueda realizar sus funciones.
- El CENACE deberá apoyar a la CFE, en un periodo de 12 meses, para que pueda operar sus redes de manera eficiente.
- Creación de nuevas figuras para abrir el mercado a nuevos participantes en un ámbito competitivo: generadores, suministradores, comercializadores y usuarios calificados (Lazo, et al., 2015)



Fuente: (SENER, 2014)

Figura I.13. Plan de Implementación de la Reforma Energética en el Sector Eléctrico

Con los cambios anteriores, se mejora el conocimiento de los puntos de la red disponibles para la interconexión de nuevas centrales de generación y por ende se crea un mercado dinámico. Por otra parte, se mejora la eficiencia de las tecnologías al contar con un operador independiente encargado de la gestión del mercado eléctrico mayorista (PwC, 2015).

La Reforma Energética trajo consigo modificaciones institucionales en el sector eléctrico con el fin de fortalecer el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Los principales cambios institucionales se resumen en la siguiente tabla:

Tabla I.2. Cambios institucionales en el sector eléctrico derivados de la Reforma

| Institución | Modificaciones |
|----------------------------------|---|
| Secretaría de Energía (SENER) | Fortalecimiento para realizar las actividades de planeación, apoyándose de organismos con mayor solidez y autonomía, es ahora la encargada del diseño de la política energética del país, teniendo a su cargo la toma de decisiones sobre la planeación del |

| Institución | Modificaciones |
|--|---|
| | SEN. |
| Comisión Reguladora de Energía (CRE) | Se convierte en un órgano regulador coordinado desconcentrado de la misma SENER, dotado de personalidad jurídica propia, autonomía técnica y de cierta autonomía presupuestal. |
| Comisión Federal de Electricidad (CFE) | La CFE pasa de ser un organismo descentralizado a una Empresa Productiva del Estado, para brindar un servicio público de energía eléctrica de calidad, competitividad y sustentabilidad, comprometidos con el desarrollo del país y con la preservación del medio ambiente. |
| Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) | Opera ahora como órgano desconcentrado, siendo el encargado del control operativo del SEN, de operar el mercado mayorista y del acceso abierto a las redes de transmisión y distribución. |

Fuente: Estrategia Estatal de Energía Sustentable del Estado de Yucatán, (Lazo, et al., 2015)

Mercado Eléctrico posterior a la Reforma

A raíz de la Reforma, el mercado eléctrico adquirió una nueva configuración a través de la cual se pretende fomentar el buen funcionamiento de éste así como dar respuesta a las necesidades de todos los actores involucrados. Con el nuevo esquema del mercado eléctrico, la Secretaría de Energía será la encargada de desarrollar los programas para la instalación y retiro de las Centrales Eléctricas. De la misma forma, la SENER autorizará los programas de ampliación y modernización de la Red Nacional de Transmisión y los elementos de las Redes Generales de Distribución que correspondan al Mercado Mayorista y que sean propuestos por el CENACE, considerando la opinión de la Comisión Reguladora de energía.

Las Centrales Eléctricas con una capacidad mayor a 0.5 MW y las Centrales Eléctricas que sean representadas por un Generador, sin importar su tamaño, requerirán de un permiso otorgado por la Comisión Reguladora de Energía. Algunos titulares de la Centrales no requerirán permiso de ningún tipo, denominados Generadores Exentos,

sin embargo, sólo podrán vender su energía y Productos Asociados a través de un Suministrador (SENER, 2014).

Los Transportistas y Distribuidores de encargarán de la operación de la Red Nacional de Transmisión y las Redes Generales de Distribución y operarán sus redes de acuerdo a lo dispuesto por el CENACE.

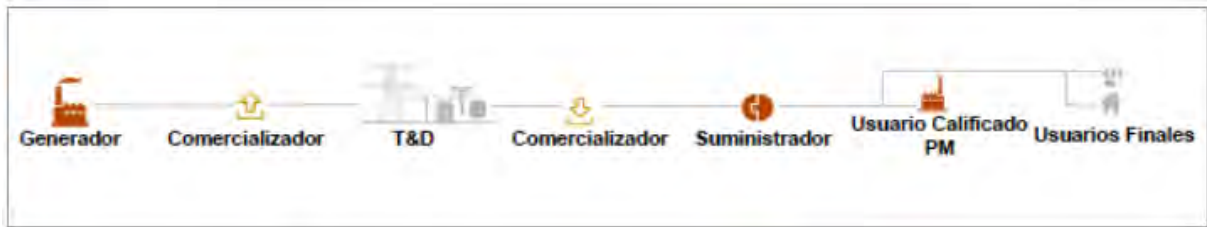
Por su parte, los Suministradores, incluida la CFE, comprarán la energía requerida por sus clientes mediante la celebración de contratos con Generadores y el mercado de energía eléctrica.

En lo que respecta al Mercado Eléctrico Mayoritario, se integró por componentes como las Subastas de Mediano y Largo Plazo, el Mercado de Certificados de Energía Limpia, Mercados de Potencia, entre otros, que operarán de manera independiente y establecerán las bases y criterios de comunicación y operación de las entidades involucradas en el mercado.

Los principales actores involucrados en el Mercado Eléctrico Mayorista son:

- **Generadores.** Representan Centrales Eléctricas en el mercado.
- **Generadores de intermediación.** Representan en el mercado a la Centrales Eléctricas y Centros de Carga incluidos en los Contratos de Interconexión Legados.
- **Usuario Calificado Participante del Mercado.** Representa los Centros de Carga para el consumo propio o para el consumo de sus instalaciones.
- **Suministradores.** El mercado para consumo de otros Usuarios Finales en la modalidad de Suministrador Básico, Suministrador Calificado o Suministrador de Último Recurso.
- **Comercializadores no suministradores.** Realizan transacciones en el Mercado sin representar activos físicos.

El funcionamiento del Mercado Eléctrico se explica en el siguiente esquema.



Fuente: (PwC, 2015)

Figura I.14. Participantes del Mercado Eléctrico

La conformación del Mercado Eléctrico Mayorista garantiza la eficiencia del mercado eléctrico y favorece la generación de energía a través de fuentes renovables, las cuales adquieren una gran importancia debido a que promueven el desarrollo sostenible en el país al disminuir la emisión de gases contaminantes y asegura el crecimiento económico dentro del sector eléctrico sin que se vean afectados los intereses de los participantes del mercado.

I.3.3 Riesgos y oportunidades en el sector eléctrico de México en el contexto de cambio climático

Riesgos en el sector eléctrico

Mucho se ha hablado de los impactos del cambio climático a nivel global y a nivel nacional, así como de las altas emisiones GEI que se generan en el sector energético, siendo la generación de energía eléctrica la actividad con mayores emisiones, sin embargo, se tiene poco conocimiento de la situación adversa que podría presentar el sector si no se reducen dichas emisiones y la temperatura sigue incrementándose. Para contrarrestar los daños que puede causar el cambio climático en el sector energético, en especial en la generación de energía, es necesario una transición energética que respalde los esfuerzos hechos en México para contribuir con el objetivo mundial de no permitir que la temperatura continúe aumentando, limitándola a un incremento máximo de 1.5 °C.

El aumento en la temperatura, el crecimiento demográfico y el crecimiento económico provocarán que la demanda de energía aumente de forma paralela, incluso se ha estimado que la demanda energética global para aire acondicionado residencial sea de 4000 TWh en el 2050, 14 veces más que el 2000,

aproximadamente. La infraestructura asociada a las energías renovables puede ser afectadas de manera alarmante si la temperatura sigue aumentando: la eficiencia de las plantas de energía térmica se verá afectada debido a las conversiones térmicas, las plantas de energía nuclear podrían sufrir daños en sus equipos por eventos climáticos extremos y la generación de energía hídrica se verá amenazada por la alteración del ciclo hidrológico.

Muchos son los retos que tienen que enfrentarse a nivel técnico, político y económico si se pretende una transición del uso de combustibles fósiles a energías limpias. La energía solar y la energía eólica no están del todo exentas de los impactos del cambio climático ya que la inestabilidad de los patrones climáticos y la frecuencia de los eventos climáticos extremos podrían dar equipos, lo que se traduciría en onerosas pérdidas económicas. De manera similar, el sector del petróleo y el gas, de los más importantes en México, presentan peligros como afectaciones severas en las plataformas marinas y la infraestructura terrestre. Las líneas de transmisión de energía y tuberías también se verán afectadas por el aumento de temperatura y fenómenos climáticos extremos; el aumento en el nivel del mar, inundaciones y deslizamientos de tierras, producto de las fuertes lluvias, ponen en riesgo los ductos ubicados en regiones costeras, asimismo los fuertes vientos impactarán las redes y transporte de energía eléctrica (Universidad de Cambridge; World Energy Council, 2014).

Opciones de mitigación del cambio climático en el sector eléctrico

Las medidas de mitigación del cambio climático en el sector eléctrico están enfocadas en la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y limpias. Las energías renovables han ido tomando relevancia a nivel mundial debido a que reducen las emisiones GEI y satisfacen la demanda energética de manera eficiente, sin embargo, la implementación de proyectos de esta naturaleza tiene barreras institucionales que de no modificarse impedirán su desarrollo y avance. Ante este hecho, las medidas de mitigación no sólo deben atender aspectos técnicos sino que además deberán considerar los aspectos políticos y arreglos institucionales de la región en la que se desee promover la generación de energía renovable y limpia, en este caso, en México.

Las opciones de mitigación en el sector energético consideran acciones relativas a:

- Recortar emisiones producidas por la extracción y conversión de combustibles fósiles.
- El cambio a combustibles bajos en carbono.
- Mejorar la eficiencia energética en la transmisión y distribución.
- Incrementar el uso de tecnologías de energía renovable.
- Introducción de la captura y almacenamiento de carbono.
- Reducción de la demanda final por energía.

Las opciones mencionadas impactan positivamente en el sector energético, no obstante, las acciones con mayor importancia para el sector eléctrico son la eficiencia energética en la transmisión y distribución, el uso de energías renovables y la reducción de la demanda final.

La ineficiencia en la transmisión y distribución de energía derivan en emisiones GEI. Las pérdidas estimadas en países en desarrollo son de aproximadamente el 20%, en países de pertenecientes a la OCDE se reportaron pérdidas de 6.5% del total de producción durante el 2000. Las mejoras en transformadores y el uso de energía distribuida reducirían las pérdidas al igual que la inclusión de nuevas tecnologías en las líneas de transmisión como la carga dinámica.

Por su parte, las energías renovables representan una gran alternativa para la generación de energía y la reducción de emisiones contaminantes. La energía eólica y la energía solar fotovoltaica presentan un amplio potencial a nivel mundial, de hecho, en el periodo comprendido entre los años 2005-2012 la generación de energía a partir del viento creció 5 veces mientras que la generación solar fotovoltaica 25 veces. La promoción de este tipo de energía debe hacerse a través de apoyos directos como tarifas de entrada, subastas, cuotas de energía renovable, así como por apoyos indirectos como aumento en los precios de carbono (Universidad de Cambridge; World Energy Council, 2014).

Las barreras de los proyectos renovables se relacionan con el desarrollo de las instalaciones necesarias dentro de la red eléctrica, lo que se traduce en mayores inversiones y en apoyos políticos adicionales.

La reducción de la demanda de energía por parte de los usuarios finales es clave ya que permitirá que se amplíen las tecnologías energéticas y que se disminuya la dependencia a los combustibles fósiles.

El marco político influye de manera directa en la ejecución de proyectos de mitigación. La generación de capacidades, la eliminación de cualquier tipo de barreras y la definición de medidas regulatorias determinarán el éxito de las políticas climáticas. Asumir la responsabilidad por las emisiones y el cumplimiento de contratos son dos aspectos que deben contemplar los principales actores en el suministro de energía para garantizar que las políticas climáticas sean implementadas y respetadas.

La creación de marcos regulatorios sólidos, la inversión en tecnología y los precios al carbono son elementos que el gobierno mexicano debe considerar si pretende fortalecer la política climática federal y avanzar en la generación de energía a partir de fuentes renovables y limpias para lograr sus metas de reducción.

Energías renovables en México. Una opción de mitigación

Leyes e iniciativas que promueven el desarrollo de energías renovables

Con la creación de la Reforma Energética se reconoció la importancia de una transición energética y de fomentar los proyectos de generación de energía a partir de fuentes renovables. Se espera que la Reforma contribuya con las metas de reducción y generación de energía a partir de fuentes renovables debido a los siguientes aspectos:

- Apertura a la inversión y competencia.
- Perspectivas claras sobre las trayectorias de ampliación del mercado para energías renovables.
- Instrumentos avanzados de interacción con la autoridad y comunidades para la gestión social de proyectos.
Mecanismos de mercado para incentivar la inversión.
- Marco regulatorio favorable para la generación distribuida.

Lo anterior propicia que la Comisión Federal de Electricidad fortalezca su cartera de inversión en energías renovables. Los sectores público y privado podrán beneficiarse de los recursos renovables del país. El principal instrumento para promover las energías limpias serán los Certificados de Energía Limpia (CELs).

Los Certificados de Energía Limpia son títulos que emite la Comisión Reguladora de Energía que acreditan la producción de una cantidad determinada de energía eléctrica a partir de Energías Limpias. Con los CELs se garantiza la competencia de diferentes tecnologías y, por ende, el cumplimiento de las metas del sector eléctrico, el fortalecimiento del Sistema Eléctrico Nacional y la diversificación de la matriz energética (SENER, 2015). Los generadores y distribuidores de energía podrán realizar transacciones de CELs con el objetivo de cubrir el límite impuesto por el Estado, esto es, que el 5% de la energía provenga de fuentes limpias ya que de no ser así se harán acreedores a multas económicas.

Por otra parte, en México existen leyes que tienen como objetivo fomentar el desarrollo de energías renovables como:

- Ley de la Industria Eléctrica. Creada a partir de la Reforma Energética, esta ley establece los elementos para fortalecer el mercado de las energías renovables.
- Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE). Esta ley fija el objetivo de generar energía eléctrica a partir de recursos no fósiles: 35% al 2024, 40% al 2035 y 50% al 2050. Producto de esta Ley se crea el Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.
- Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB). La LPDB determina las bases para producción, comercialización y uso eficiente de los energéticos a partir de actividades agropecuarias, forestales, algas y procesos enzimáticos del campo mexicano (SENER, 2014).

Bajo este esquema de promoción de energías renovables, surge el Programa Especial de Aprovechamiento de Energías Renovables 2014-2018 (PEAER) establecido en el Plan Nacional de Desarrollo. La elaboración de este Programa tiene como objetivos centrales:

- Establecer metas específicas para el aprovechamiento de energías renovables, así como definir las estrategias y acciones necesarias para alcanzarlas.
- Establecer metas de participación de las energías renovables en la generación de electricidad.
- Incluir la construcción de obras de infraestructura necesarias para que los proyectos de energías renovables se puedan interconectar con el Sistema Eléctrico Nacional.
- Definir estrategias para fomentar aquellos proyectos que a partir de fuentes renovables de energía provean energía eléctrica a comunidades rurales que no cuentan con este servicio.
- Definir estrategias para promover la realización de proyectos de generación de electricidad a partir de energías renovables, preferentemente para los propietarios o poseedores de los terrenos y los sujetos de derechos sobre los recursos naturales involucrados en dichos proyectos (Gobierno de la República, 2014).

Los programas y leyes mencionados anteriormente buscan sentar las bases de un marco regulatorio que fomente el uso de energías renovables para la generación de energía y reducir las emisiones GEI en el sector eléctrico. La política climática nacional se ha visto enriquecida con la elaboración de estas leyes ya que se logra la inclusión de la sociedad civil y se fortalecen los vínculos entre los participantes del sector eléctrico y las instituciones del Gobierno Federal con miras a lograr un crecimiento económico en el sector e impulsar el desarrollo sostenible en el país.

Energías renovables en México

El crecimiento demográfico del país y las crecientes necesidades de la población han provocado que el sector energético busque opciones para satisfacer la demanda energética. Los combustibles fósiles han sido el recurso principal en la producción de energía, no obstante, las altas emisiones que se derivan de su uso y su naturaleza no renovable han sido determinantes para buscar nuevas fuentes que permitan generar energía de manera limpia y que reporten los mismos beneficios económicos y estas fuentes son las energías renovables. El uso de energías renovables a nivel mundial ha tenido un desarrollo significativo, en países como Brasil, Alemania,

Dinamarca, España, Canadá y Reino Unido se han desarrollado nuevas tecnologías que permitan aprovechar de mejor manera los recursos renovables para la generación de energía eléctrica.

En América Latina, México es el país que mayor inversión ha tenido en proyectos de energías renovables. El crecimiento del país en energías renovables, respecto al 2014, ha sido de un 109% durante el 2015 (Frankfurt School-UNEP Centre, 2016). La generación de energía eléctrica ha sido una de las actividades que presenta una mayor participación de energías renovables a nivel mundial y la que podría presentar un crecimiento destacado en nuestro país.

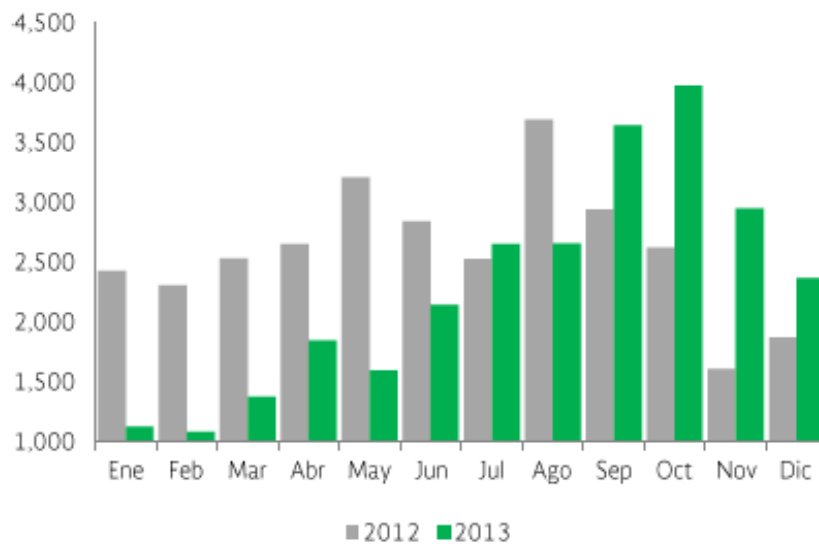
Aunque la generación de energía eléctrica en México sigue teniendo como principal insumo a los combustibles fósiles, la inclusión de energías renovables en esta actividad es destacada. Las estimaciones indican que para el 2018, la generación de energía eléctrica a partir de fuentes limpias (incluye a las energías renovables, la energía nuclear y las carboeléctricas con captura de carbono) será de un 22.81%, teniendo una mayor participación para los años 2024 y 2027, con porcentajes de 24.61% y 26.49%, respectivamente (ver figura I.15).



Figura I.15. Participación de energías renovables en la generación de energía eléctrica para los años 2018, 2024 y 2027

Energía hidráulica

La energía hidráulica es la primera fuente renovable de aportación a la generación de energía eléctrica de la CFE, y que se inyecta al Sistema Eléctrico Nacional. En el 2013, la generación de energía eléctrica a partir de fuentes hidráulicas sufrió un decremento del 12.41% respecto al 2012, sin embargo, la puesta en operación de proyectos como La Yesca, presentó una gran oportunidad para lograr la mejoría de la generación hidroeléctrica.



FUENTE: SENER con datos del SIE. 2014. 2014.

Figura 1.16. Generación bruta hidroeléctrica (GWh)

La CFE opera 42 centrales con 94 unidades con capacidad menor a 30 MW, sumando una capacidad total de 286.6 MW. La generación hidroeléctrica se concentra en 14 estados de la República, entre los que destacan, el Estado de México, Michoacán, Veracruz y Chiapas. Se espera que para el 2029, la participación de las hidroeléctricas en la generación total de electricidad sea de 11.6%.

Energía eólica

Por otra parte, el potencial de México para el desarrollo de proyectos eólicos es sobresaliente. La capacidad de generación ha ido en aumento debido a proyectos

como Rumorosa II y II, en el estado de Baja California, y Sureste I, II y III con una capacidad total de 1.216 MW, programados durante el periodo 2013-2016. El desarrollo de proyectos eólicos continúa en aumento, para ello se han invertido 14,000 millones de dólares, incluida la inversión privada. Con la inversión anterior se planea poner en marcha 7 proyectos en el estado de Oaxaca, con una capacidad de 2,330 MW, 13 en Tamaulipas con 1665.5 MW y 7 en Baja California con 740.5 MW (SENER, 2014).

En el 2013, se encontraban en operación 19 proyectos de autoabastecimiento con una capacidad instalada de 1,551 MW. Con la construcción programada de 33 proyectos, con una capacidad de aproximada de 3,340 MW se estima que la generación eólica podría tener un crecimiento de hasta 5,197 MW, aproximadamente, en el corto plazo.

Energía geotérmica

La energía geotérmica es la segunda fuente para la generación de energía eléctrica, aporta el 2.35% de la generación bruta de energía y el 1.54% de la capacidad instalada. El CENACE, la considera como la única energía renovable que sirve como carga base para el sistema eléctrico. Su crecimiento ha sido notable desde su inicio en México en 1973, tanto que en el 2013 contaba con una capacidad de 823.4 MW.

La CFE tenía la mayor participación en la generación de este tipo de energía, sin embargo, en el 2013, la CRE expidió el primer permiso bajo el esquema de autoabastecimiento por 35 MW, para la generación eléctrica por geotermia. Más tarde, la CRE otorgó otro permiso, ahora bajo el esquema de Pequeño Productor, para otro proyecto que entraría en operación durante el 2016. Asimismo, proyectos como Los Humeros Fase A y Fase B, con una capacidad total de 54 MW, y Los Azufres III Fase I y Fase II, con capacidad de 50 MW cada uno, han favorecido el crecimiento de la energía geotérmica en la generación de electricidad del país (SENER, 2014).

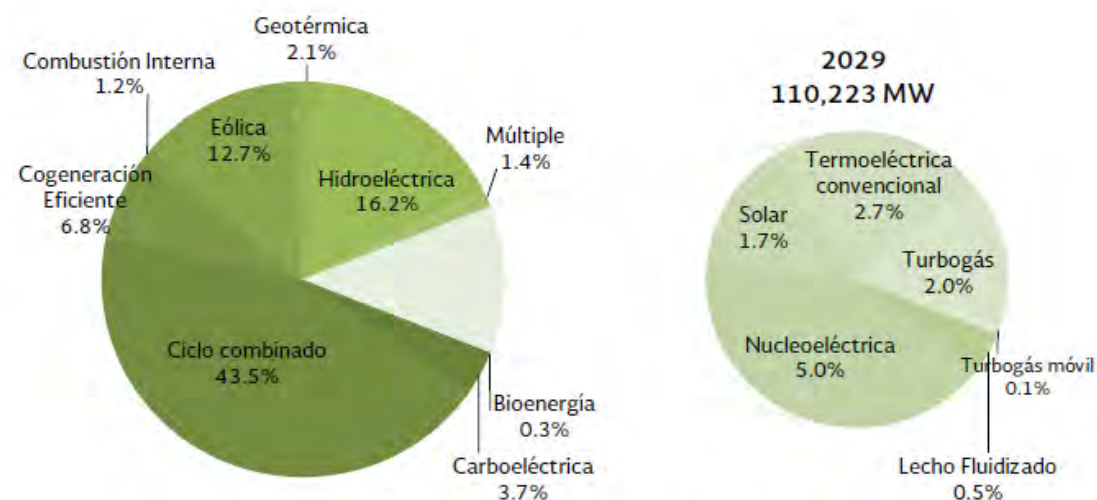
Energía solar

El recurso solar ha sido aprovechado de manera significativa en México. A nivel mundial, la energía solar fotovoltaica ha tenido un papel protagónico dentro de las

energías renovables y nuestro país no ha sido la excepción: el crecimiento para la CFE y los Productores Independientes de Energía (PIE) supera el 530%.

La puesta en operación de proyectos fotovoltaicos y proyectos piloto de energía termo-solar, como el Proyecto Aura Solar (30 MW) y el proyecto “Tai” de *Eosol Energy de México* (16.8 MW), ha impulsado la producción de electricidad a partir de energía solar, principalmente por medio de tecnología fotovoltaica. El futuro de esta energía en el país es bastante alentador, de hecho, México se ha posicionado dentro de los 20 primeros países a nivel mundial con más capacidad instalada para su aprovechamiento (SENER, 2014).

El desarrollo de energías renovables en nuestro país es todavía incipiente si es comparado con el de otros países, sin embargo, los escenarios se muestran favorables. La participación de este tipo de energías en la capacidad de generación tendrá un aumento considerable para los años futuros en especial la energía solar y la energía eólica (Figura I.17) por lo cual es necesario contar con conocimientos técnicos y marcos políticos regulatorios lo suficientemente robustos para aprovechar correctamente estos recursos y lograr los objetivos que nos hemos planteado en materia ambiental.



La tecnología llamada *Múltiple*, hace referencia a la combinación de dos o más tecnologías convencionales y limpias.

Fuente: *Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029*

Figura I.17. Participación de tecnologías en la capacidad de generación eléctrica, 2029.

Para efectos del presente documento, en los siguientes capítulos se profundizará en el aprovechamiento de la energía solar a través de la tecnología fotovoltaica y su aplicación en proyectos nacionales y los impactos generados a partir de éstos. Previamente, se analizarán los aspectos técnicos relacionados con la generación de electricidad a partir de esta energía y su potencial de generación en México para comprender la importancia de su desarrollo y los beneficios que se derivan de ello.

Capítulo II. Energía Solar

II.1 Contexto de las energías renovables

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de fuentes naturales y que son, teóricamente, inagotables debido a su abundancia y renovación natural. Estas energías pueden clasificarse de acuerdo con la fuente a partir de la cual son generadas, entre estas se encuentran:

- Energía hidráulica. Es aquella que se genera a partir de la caída del agua.
- Energía geotérmica. Se produce cuando el agua se transforma en vapor al entrar en contacto con rocas de alta temperatura en el interior de la tierra.
- Energía eólica. La energía eólica es la que produce por la energía del viento.
- Energía solar. Este tipo de energía se produce mediante el aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol.
- Biomasa. La biomasa utiliza como fuente energética materia orgánica de origen animal o vegetal.
- Energía mareomotriz. La energía mareomotriz aprovecha el movimiento del agua producido por el viento y las fuerzas gravitatorias que ejercen el Sol y la Luna, originando las mareas.
- Energía de las olas. Esta energía, también llamada undimotriz, tiene como principal fuente el movimiento de las olas del mar.

Las energías renovables han cobrado una gran importancia a nivel mundial debido a que ayudan a mitigar los efectos del cambio climático a través de la reducción de emisiones, por este motivo, se ha buscado promover el desarrollo de tecnologías que permitan aprovechar de una mejor manera los recursos naturales a partir de los cuales se genera este tipo de energía.

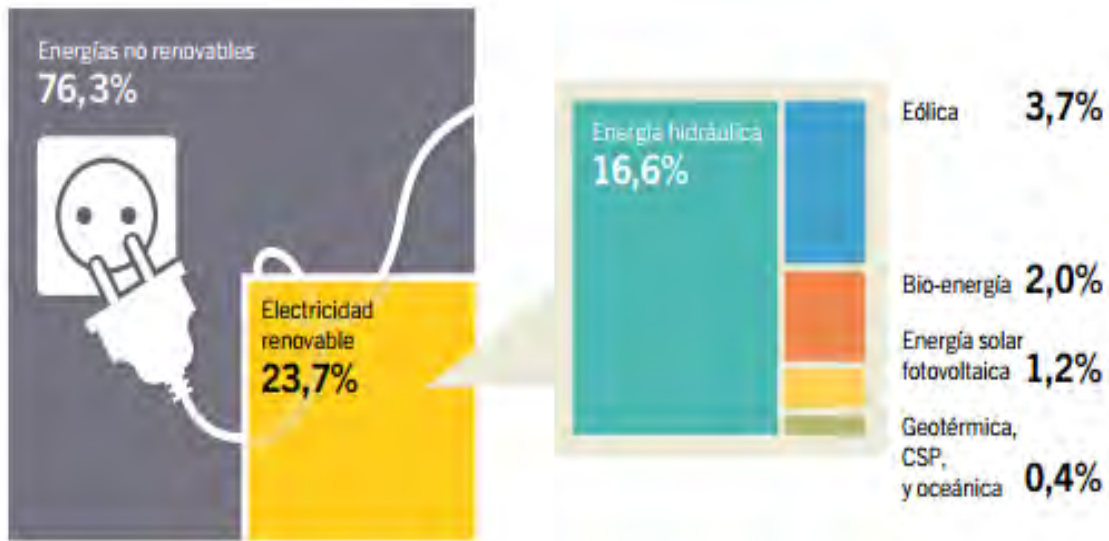
Los beneficios que brindan las energías van más allá del aspecto ambiental. Entre los beneficios de este tipo de energías pueden enumerarse los siguientes:

- Reducción de emisiones de dióxido de carbono.
- Diversificación de las fuentes de energía.
- Posibilitan el acceso a servicios de electricidad de comunidades que se encuentran alejadas de redes eléctricas de distribución.
- Favorecen el desarrollo industrial y económico a nivel regional.
- Creación de empleos especializados.
- Contribuyen al equilibrio territorial.
- Impulsan la creación y desarrollo de tecnologías locales.

La generación de energía eléctrica se ha convertido en uno de los campos de aplicación más importante de las energías renovables ya que ayudan a reducir las altas emisiones provenientes del uso de combustibles fósiles por lo que se ha hecho indispensable transitar a energías más limpias que produzcan beneficios económicos equivalentes sin impactar de manera negativa en el ambiente. Por otra parte, con el uso de energías renovables para la generación eléctrica se pretende contribuir con el desarrollo sostenible en todos los países y asegurar que todas las sociedades puedan tener acceso a energías no contaminantes. En este contexto, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoce la necesidad de emplear recursos energéticos renovables para la producción de electricidad en su *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*, específicamente, en su *Objetivo 7: Energía Asequible y No Contaminante*.

A través del objetivo 7 se busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos ya que ello tiene repercusiones positivas en el desarrollo de otros sectores como la educación, medicina y salud, agricultura, infraestructura, comunicaciones y tecnología. Pese a los esfuerzos por satisfacer la demanda energética, en la actualidad más de 1,200 millones de personas, principalmente en África y Asia, no cuentan con electricidad y las muertes por el uso de leña y carbón vegetal, para generar calor, en lugares cerrados continúan en aumento. Una de las soluciones principales para resolver los problemas anteriores está dirigida a la investigación y desarrollo de tecnologías energéticas no contaminantes entre las que se incluyen las energías renovables (ONU, 2017).

Por otro lado, la producción de electricidad a partir de fuentes renovables aún presenta un rezago significativo si se le compara con la producida a partir de combustibles fósiles. Del total de energía eléctrica producida a nivel mundial durante el 2015, el 76.3% provino de fuentes no renovables, el 27.7% restante de energías renovables de las cuales, la energía hidráulica tuvo la mayor participación (figura II.1).

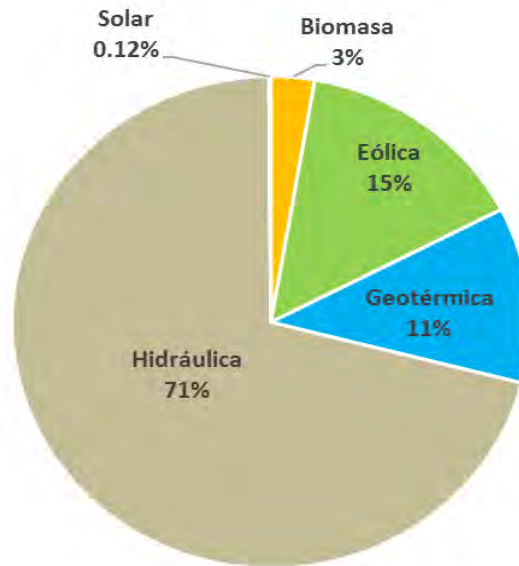


Fuente: REN21, 2016.

Figura II.1. Participación estimada de energía renovable en la producción de electricidad a nivel mundial, finales de 2015

En México, las energías renovables han cobrado un papel relevante dentro de la generación de electricidad, en especial la energía hidráulica. A través de las centrales hidroeléctricas se genera el 71% de la electricidad procedente de fuentes renovables. La participación por tipo de energía renovable en la generación de electricidad en México se observa en la siguiente figura:

Generación de energía eléctrica renovable



Fuente: *Inventario Nacional de Energías Renovables, 2015*

Figura II.2. Generación de Energía Eléctrica Renovable

Las energías solar y geotérmica presentan escenarios de crecimiento promisorios de acuerdo con el inventario de proyectos potenciales para la generación de electricidad por energías renovables. La energía geotérmica podría tener una participación cercana al 42% y la energía solar al 14%, lo que representa un aumento considerable si es que se compara con su situación actual.

La energía solar, después de la energía eólica, tiene grandes oportunidades de desarrollo en nuestro país. México es el país latinoamericano con mayor potencial fotovoltaico debido a que presenta altos índices de radiación solar (aprox. 6kWh/m²/día en promedio), aunado a lo anterior, nuestro país es uno de los cinco países en el mundo con mayor potencial para invertir en energía solar (Muciño, 2015).

Dadas las proyecciones de crecimiento y desarrollo para la energía solar, y para efectos del presente documento, en los siguientes apartados se explicará con mayor detalle qué es la energía solar y cuáles son las formas más comunes de aprovecharla. Debido a la importancia que tiene para el desarrollo económico y social del país, la

energía fotovoltaica será el tema central ya que es la que cuenta con las mayores oportunidades de financiamiento y las condiciones geográficas del país favorecen su evolución.

II.2 Energía Solar

La energía solar proviene de la radiación solar y puede ser aprovechada de diversas formas ya sea empleando el calor o la radiación en dispositivos ópticos. El uso de la energía solar tiene dos objetivos principales: generar beneficios económicos al abaratar los costos por el uso de fuentes no renovables, como los combustibles fósiles y la energía nuclear, y mitigar los daños ambientales que esta últimas causan.

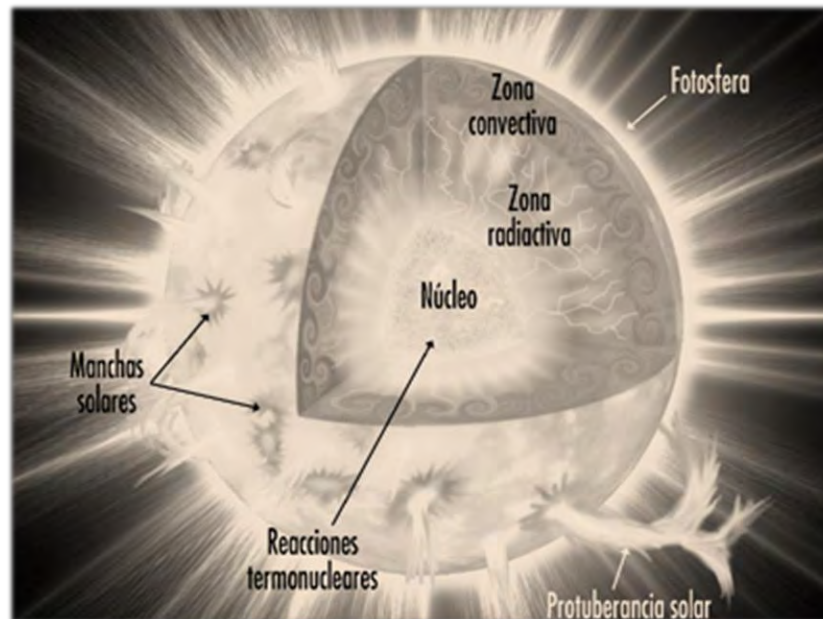
La energía solar presenta grandes ventajas para el ser humano, sin embargo, algunos aspectos de su naturaleza como su gran dispersión sobre la superficie de la Tierra y la variabilidad de la radiación solar han hecho necesario el desarrollo de técnicas que permitan su correcto aprovechamiento.

La radiación solar que recibe una superficie horizontal (1 kW/m^2) está sujeta a la latitud, nubosidad, humedad y otros factores geográficos pero su carácter intermitente es el principal problema al que se han tenido que enfrentar los desarrolladores de tecnologías. La preocupación por contar con un sistema de captación de energía solar que facilite su suministro, sin que se vea afectado por la variabilidad de las condiciones climáticas, ha provocado que se diseñen procesos que permitan su implementación, estos procesos pueden resumirse de la siguiente manera:

- Captación y concentración de la energía solar.
- Transformación de la energía para que pueda ser utilizada.
- Almacenamiento.
- Disposición de una fuente energética suplementaria para hacer frente a las deficiencias de energía solar, si es que llegaran a presentarse o si las condiciones no han sido las óptimas para que sea captada.

Para comprender el funcionamiento de la energía solar es necesario conocer las características principales de la fuente energética a partir de la cual se genera: el Sol. El Sol puede definirse como una gran esfera de gases principalmente hidrógeno (92.1%) y helio (7.8%) (NASA, 2016), con un diámetro aproximado de 1,392,000 km; se encuentra a una distancia aproximada de 150 millones de kilómetros de la Tierra.

La temperatura del Sol está en función de su estructura: la temperatura en el núcleo es de aproximadamente 10^7 °K, mientras que en la fotosfera (capa superficial) es de 6×10^3 °K.



Fuente: <http://www.e-junior.net/articulo/4117/ozono>

Figura II.3. Estructura del Sol

Las reacciones químicas que suceden en la estructura interna y externa del Sol tienen influencia en los planetas del sistema solar y la Tierra no es la excepción. La radiación solar, proceso que tiene su origen en reacciones solares, es el aspecto más importante para el aprovechamiento de la energía solar por lo que es menester explicarlo en los siguientes apartados.

II.2.1 Radiación solar

Factores como la distancia entre la Tierra y el Sol, el diámetro solar y la temperatura del Sol determinan el flujo de energía proveniente del sol que incide sobre la superficie terrestre: la radiación solar.

La radiación solar puede definirse como el flujo de energía proveniente del Sol en forma de ondas electromagnéticas a través de las cuales se transmite la energía solar a la superficie terrestre. Este flujo de energía puede expresarse en unidades de energía por unidad de área y por unidad de tiempo (irradiancia), generalmente en Js/m^2 , equivalentes a W/m^2 , o en términos de irradiación, que es la energía solar aportada en un cierto periodo de tiempo y que se expresa en $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{día}$ o $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{día}$, si el periodo es de un día.

Las ondas electromagnéticas que recibimos y que pueden ser percibidas por el ser humano tienen una longitud de onda que va de los $0.4 [\mu\text{m}]$ a los $0.7[\mu\text{m}]$, esto forma parte de lo que se conoce como luz visible. El resto de las ondas electromagnéticas que no podemos percibir forman parte de la radiación infrarroja y ultravioleta del espectro solar.

Constante y espectro solar

La emisión de energía solar que incide sobre la superficie terrestre puede considerarse constante, de ahí nace el concepto de *constante solar*. La constante solar (G_{sc}) es el flujo de energía solar que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, a la distancia media del Sol a la Tierra.

La constante solar tiene un valor aproximado de:

$$G_{sc} = 1,353 \text{ W/m}^2 \dots\dots(1)$$

Esta constante solar es muy importante para el cálculo de la radiación que incide sobre la superficie de nuestro planeta. El flujo de energía que llega a la Tierra está en función de la época del año, debido a la variación en la distancia que existe entre nuestro planeta y el Sol. Basado en lo anterior, existe una ecuación que ayuda a

determinar la cantidad de energía solar que incide sobre un plano perpendicular a la radiación solar extraterrestre a lo largo del año:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \dots \dots (2)$$

donde,

G_{on} , es el flujo de radiación extraterrestre

n , es el número de día del año.

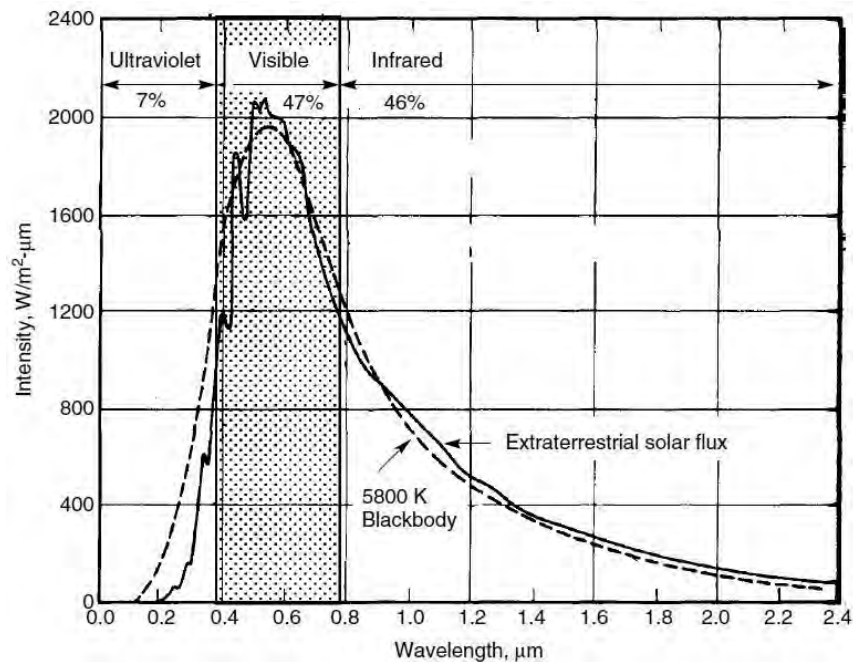
Espectro solar

La radiación solar está estrechamente relacionada con el espectro solar electromagnético. La radiación solar se emite en todo el espectro electromagnético, no obstante, la radiación ultravioleta (UV), la radiación visible (VIS) y la infrarroja son las más relevantes dentro del aprovechamiento de la energía solar; estos tres tipos de radiación constituyen lo que se denomina *radiación térmica*.

La emisión de radiación de los cuerpos está determinada por su temperatura, cuanto mayor sea su temperatura ocurre que:

- La intensidad de emisión es mayor
- El color o tipo de radiación cambia a una menor longitud de onda.

La línea punteada que puede observarse en la figura II.4 representa la irradiancia espectral de un cuerpo negro, considerado como un radiador perfecto, que se encuentra a una temperatura cercana a los 6000 K. La temperatura anterior es la que debe tener dicho radiado ideal para tener la misma emisión de energía del Sol.



Fuente: Jorge Mírez, Matlab/Simulink in Renewable Energy

Figura II.4. Irradiancia espectral del Sol

Radiación solar terrestre

La radiación solar que llega a la atmósfera está determinada por las condiciones que esta última presente (cuestiones meteorológicas); la radiación solar que llega a la Tierra experimenta fenómenos de reflexión, absorción y difusión que disminuyen su intensidad. Considerando lo anterior, es necesario aclarar los términos de radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada ya que son significativos en el proceso de aprovechamiento de la energía solar.

Los tipos de radiación, según el fenómeno que experimentan, son los siguientes:

- **Radiación directa.** Este tipo de radiación, como su nombre lo indica, es la que proviene directamente del Sol.
- **Radiación difusa.** La radiación difusa es aquella que es absorbida y difundida por la atmósfera terrestre. Este tipo de radiación aumenta durante los días nublados ya que la presencia de nubes, y otras partículas, de polvo, por ejemplo, producen efectos de dispersión.

- **Radiación reflejada.** Esta radiación es la que refleja la superficie terrestre. La reflexión de la radiación dependerá de las características de la superficie reflectora, que a su vez está determinada por el coeficiente de reflexión también conocido como albedo. Mientras las superficies horizontales reciben una mayor cantidad de la radiación difusa, las superficies verticales son las que, mayoritariamente, reciben la radiación reflejada.

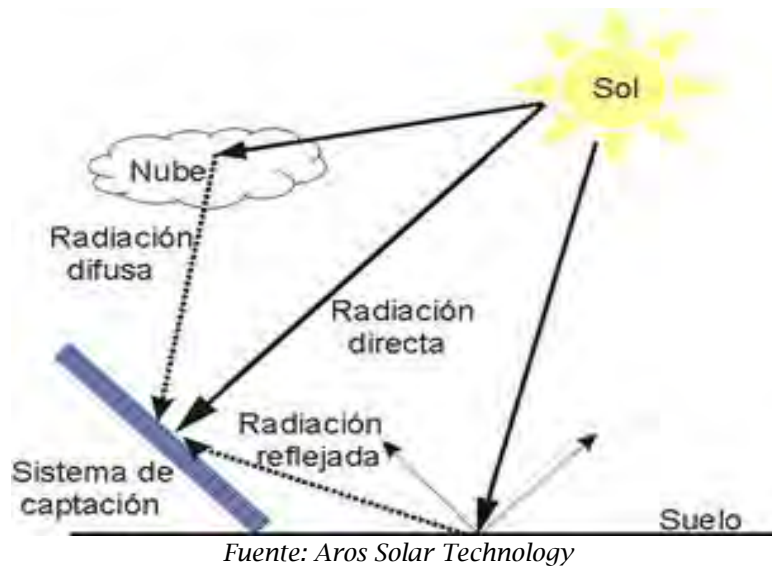


Figura II.5. Tipos de radiación solar

La radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, como se mencionó anteriormente, está sujeta a diversos factores por lo que su distribución final sobre nuestro planeta es menor que la constante solar pues los rayos solares se debilitan al pasar por la atmósfera. La distribución de la radiación solar sobre la superficie de nuestro planeta se da de la siguiente manera:

- Las nubes, el vapor de agua y el dióxido de carbono absorben aproximadamente el 17%.
- El 30% se refleja hacia el espacio debido a las nubes, partículas y gases atmosféricos.

- Un 53% alcanza el suelo: aproximadamente el 35%, en forma de luz solar directa, formando sombras. El porcentaje restante, llega en forma de luz difusa: al azul del cielo y gris de un día nublado.

La radiación global total es la suma de las tres anteriores y se expresa como:

$$I_T = I_D + I_S + I_R \dots \dots (3)$$

donde,

I_T , radiación solar total

I_D , radiación directa

I_S , radiación difusa

I_R , radiación reflejada

Además de los factores que modifican la radiación solar recibida por la superficie de la Tierra, la radiación total también depende de la inclinación de las superficies respecto al plano horizontal y de las características de las superficies reflectantes (albedo). En la tabla II.1 pueden observarse los valores de albedo para algunas superficies.

El grado de inclinación de las superficies influye en el aprovechamiento óptimo del recurso solar: una superficie inclinada disminuye la radiación dispersa y aumenta la radiación reflejada, aspecto de gran relevancia para la instalación de alguna superficie de captación. La latitud de lugar en la que se requiere captar la energía solar juega un papel muy importante dado que una superficie inclinada al sur con un ángulo igual a la latitud tendrá mayor potencial de aprovechamiento de la energía solar.

Tabla II.1. Albedo de algunas superficies para valores diarios de radiación

| Superficie | Albedo |
|--------------------|-------------|
| Tierra y atmósfera | 0.3 |
| Agua líquida | 0.05 - 0.20 |
| Nieve fresca | 0.75 - 0.95 |
| Nieve vieja | 0.40 - 0.70 |
| Nubes espesas | 0.30 - 0.90 |
| Nubes delgadas | 0.20 - 0.70 |
| Mar | 0.25 - 0.40 |
| Suelo | 0.05 - 0.20 |
| Hierba | 0.16 - 0.26 |
| Desierto | 0.20 - 0.40 |
| Bosques | 0.10 - 0.25 |
| Asfalto | 0.05 - 0.20 |
| Concreto | 0.10 - 0.35 |
| Urbano | 0.10 - 0.27 |

Fuente: (Tejeda Martínez & Gómez Azpeitia, 2015)

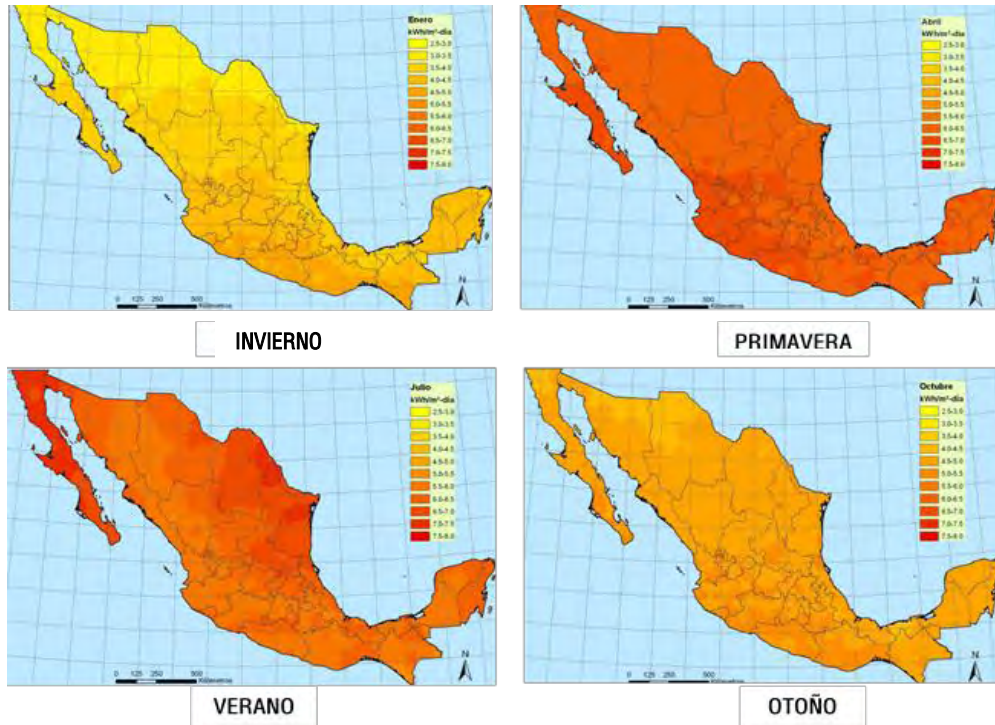
Recurso solar en México

Para conocer la irradiación global sobre superficies inclinadas es necesario conocer la irradiación global en superficies horizontales, la cual tiene que ser descompuesta en sus componentes de radiación directa y radiación difusa. La irradiación solar dependerá de la estación del año y de la hora solar de determinados lugares.

Irradiación global

En México, durante el invierno, la zona norte presenta los valores más bajos de radiación (2-2.5 kWh/m²). A su vez, la zona sur experimenta valores ligeramente más altos, con valores que van de los 4.5 a los 5 kWh/m² en regiones como Guerrero, Oaxaca, Morelos, Puebla y Chiapas. Por otra parte, en el verano la irradiación global en la República Mexicana tiene valores máximos en la región noreste y en la Península de Baja California (7-8 kWh/m² día); en el resto de los estados se registran radiaciones de 5-6 kWh/m².

En la primavera, se presenta un aumento general en la radiación de toda la República Mexicana, siendo el noreste la región con los mayores niveles alcanzados (7 kWh/m²). En contraste, el otoño es el periodo en el cual se presentan los valores de radiación más bajos a causa de los días nublados y la presencia de lluvias.



Fuente: (Tejeda Martínez & Gómez Azpeitia, 2015)

Figura II.6. Irradiación global por estación del año

La irradiación global anual que recibe la República Mexicana presenta variaciones diversas a causa de los fenómenos meteorológicos que se presentan a lo largo del año. La región noreste presenta niveles altos de radiación en el año, sin embargo, ésta disminuye durante el verano debido a las nieblas originadas por los cambios que se presentan en los vientos.



Fuente: (Tejeda Martínez & Gómez Azpeitia, 2015)

Figura II.7. Irradiación global anual (kWh/m² día)

Irradiación solar directa y difusa anuales

La irradiación directa anual en México presenta los valores más altos en la península de Baja California y en los estados ubicados en la zona central del país (3.5-4 kWh/m² día). El resto de las regiones presenta valores más bajos de irradiación que pueden ir de 2.5 a 3kWh/m² día.

Por otro lado, la radiación difusa registra valores menores durante todo el año de la región central al norte del territorio (1.5 -1.75 kWh/m² día). La región sur alcanza valores ligeramente mayores, por ejemplo, la península de Yucatán puede llegar a alcanzar valores de 1.75 a 2 kWh/m² día.

En definitiva, el concepto de radiación solar resulta de suma importancia en el aprovechamiento de la energía solar ya que define la viabilidad de los proyectos a desarrollar en cualquier región. Como ya ha sido mencionado, la energía solar ha ido cobrando importancia en la generación de energía eléctrica pues brinda beneficios

económicos, sociales y ambientales, de ahí que deban elegirse los métodos y tecnologías adecuadas para su captación. A continuación, se describen las tecnologías más utilizadas para la generación de electricidad a partir de la energía solar: la solar termoeléctrica y la solar fotovoltaica.

En primera instancia, se mencionarán de forma breve los aspectos generales de la energía solar termoeléctrica, así como su funcionamiento. Posteriormente, se describe el funcionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos y los factores que intervienen en su operación con el fin de comprender su significación y por qué su desarrollo representa una oportunidad de crecimiento para el sector eléctrico en México.

II.3 Aprovechamiento de la energía solar para la generación de electricidad

II.3.1 Energía solar termoeléctrica

Para comprender la operación de las centrales termoeléctricas es necesario explicar cuál es la clasificación que puede darse a los sistemas solares térmicos de acuerdo con los rangos de temperatura que utilizan para la realización de actividades específicas. La clasificación de los sistemas por rango de temperaturas es:

- *Sistemas de baja temperatura.* Estos sistemas están destinados al calentamiento de agua bajo su punto de ebullición ($T < 100^{\circ}\text{C}$).
- *Sistemas de media temperatura.* La aplicación de estos sistemas se da en actividades que requieren temperaturas superiores a los 100°C . Aunado a lo anterior, los sistemas de media temperatura son usados para la producción de vapor y para el calentamiento de otro tipo de fluidos.
- *Sistemas de alta temperatura.* Este tipo de sistemas son utilizados para la producción de energía eléctrica ya que requieren temperaturas mayores a los 300°C .

Definido lo anterior, puede afirmarse que la energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía solar para la generación de energía eléctrica. El principio básico bajo el cual actúan las centrales termoeléctricas es el calentamiento de agua, o algún otro fluido, para generar vapor que movilice un generador eléctrico.

El principio básico de funcionamiento de las centrales termoeléctricas puede resumirse en los siguientes aspectos:

1. Concentración de la radiación solar a través de dispositivos especiales (concentradores).
2. Absorción y almacenamiento de la energía.
3. Transferencia de energía.
4. Conversión de la energía térmica en energía mecánica.
5. Conversión de la energía mecánica en energía eléctrica.

Funcionamiento de las centrales termoeléctricas

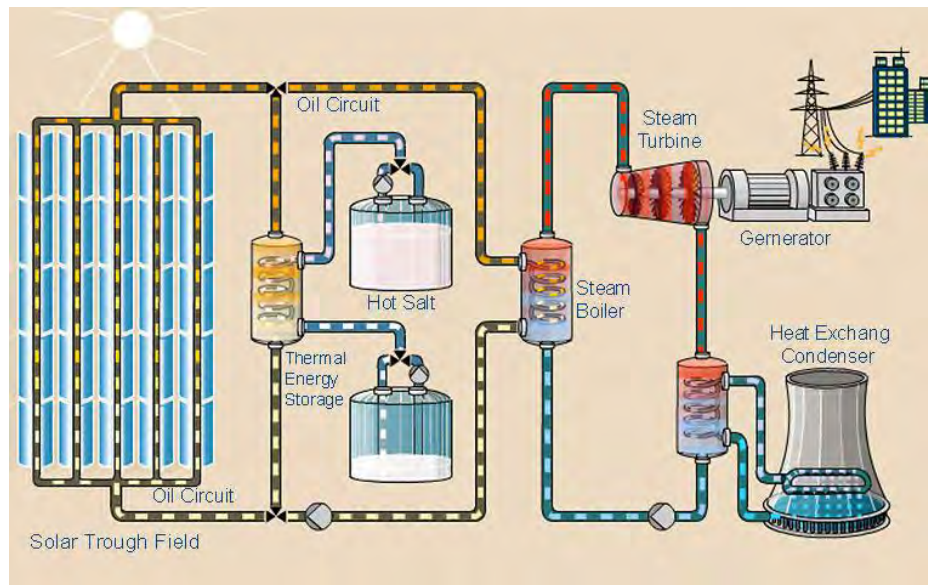
El aprovechamiento de la energía solar, utilizando la energía térmica como proceso intermedio, para la generación de electricidad puede realizarse a través de dos métodos: concentrando la radiación solar a lo largo de una línea (CCP y Fresnel) y las que concentran la radiación solar en un punto (torre central y discos Stirling). De acuerdo con lo anterior, las centrales termoeléctricas utilizan distintas tecnologías para llevar a cabo los procesos respectivos, entre las más comunes se encuentran:

- Centrales de concentrador cilindro-parabólico (CCP).
- Centrales de concentrador lineal Fresnel.
- Centrales de torre o de receptor central.
- Centrales de discos parabólicos (Stirling).

Existe otro tipo de centrales que combinan las tecnologías de los sistemas anteriores (híbridos) o incluyen combustibles fósiles y biomasa en sus sistemas de generación. Las tecnologías principales se describen de manera breve a continuación.

Centrales de concentrador cilindro-parabólico (CCP)

Los concentradores cilindro parabólicos pueden concentrar la energía de 30 a 80 veces y pueden llegar a alcanzar potencias por campo unitario de 30 a 80 MW. El funcionamiento de las centrales con este tipo de concentradores consiste en concentrar la radiación solar a lo largo de una línea recta con una extensión entre los 600 y los 800 metros. El fluido que transporta ingresa al sistema con una temperatura y velocidad determinadas para salir con una temperatura superior.



Fuente: <https://www.mtholyoke.edu/~wang30y/csp/PTPP.html>

Figura II.8. Funcionamiento de una central CCP

El fluido utilizado para transportar el calor en las centrales CCP, puede ser agua, sin embargo, las pérdidas por vaporización han condicionado su uso y se ha optado por fluidos que no presenten cambios de estados en el proceso de transporte. El fluido que ha presentado las mejores características es el denominado Heat Transfer Fluid (HTC). El HTC, mezcla de óxido de difenilo y bifenilo, tiene una temperatura a la entrada de la línea de 290 °C y a la salida de 390 °C; entre mayor sea la temperatura del fluido mayor será la eficiencia de la central pero las características del fluido limitan su funcionamiento a temperaturas inferiores a los 400 °C.

La captación y transferencia de calor al HTC se da a través del llamado campo solar, el cual debe tener una extensión de 2 hectáreas por cada MW instalado. En el campo solar se encuentran instalados los módulos captadores, que cuentan con dimensiones y formas específicas pero que comparten tres elementos indispensables para su funcionamiento, a saber:

- El espejo reflector, componente clave para la reflexión de la radiación solar incidente.
- El tubo absorbedor, que transforma la radiación solar en energía calorífica.
- La estructura que sujeta a los módulos.

Los módulos se encuentran agrupados colectores y se mueven para conseguir la posición más perpendicular a la radiación solar y obtener el máximo aprovechamiento; a su vez, los colectores se encuentran unidos en lazos para transportar el HTC a toda la central.

El HTC transfiere calor al agua del sistema para generar vapor, el cual será conducido a una turbina de vapor para la realización de trabajo mecánico. El vapor a la salida de la turbina es condensado para aprovechar el agua y tener una mayor eficiencia. Finalmente, la energía mecánica producida por la turbina es transformada en electricidad con ayuda de un generador y es transportada a la red eléctrica por medio de líneas de transporte.



Fuente: SEIA (Solar Energy Industries Association), 2017

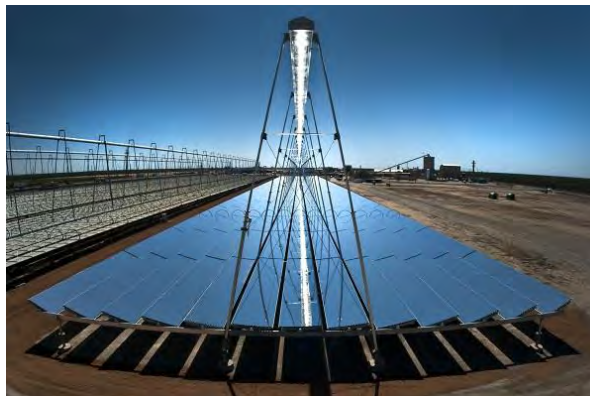
Figura II.9. Concentrador Cilindro-Parabólico

Centrales de concentrador lineal Fresnel

Las centrales de concentrador lineal Fresnel, al igual que las centrales CCP, concentran la radiación solar a lo largo de una línea, pero con la diferencia de que los reflectores utilizados son espejos planos, lo que representa grandes beneficios económicos y menores dimensiones del campo solar.

La operación de las centrales tipo Fresnel es parecida a la de las centrales CCP sólo que aspectos como el método de operación y los costos asociados a ello son más sencillos y bajos, respectivamente. Las centrales que utilizan esta tecnología tienen tres componentes principales: un campo de espejo primarios, un tubo absorbedor y un espejo secundario. Un conjunto de filas de espejos planos, con un ancho aproximado de 60 m, que se extienden a lo largo de líneas de entre 600 m y 900 m de longitud, configuran el campo primario. El campo primario refleja la radiación solar al tubo absorbedor, situado a una altura 8 m, encargado de transformar la energía solar en energía térmica. Po su parte, los espejos secundarios se encargan de captar la radiación solar que se ha desviado y no ha incidido en los espejos primarios.

A través del tubo absorbedor circula agua que, posteriormente, es convertida en vapor para movilizar las turbinas de alta y baja presión que se encuentran en la central. La necesidad de utilizar dos turbinas se debe a que, al producirse grandes cantidades de vapor, éste tiene que ser extraído y el agua condensada tiene que ser retirada.



Fuente: (SEIA (Solar Energy Industries Association), 2017)

Figura II.10. Concentrador lineal Fresnel

Centrales de torre o receptor central

Estas centrales consisten en un campo de heliostatos que siguen la posición del Sol y dirigen el rayo reflejado hacia un foco localizado en la parte superior de una torre o receptor. Este último es el responsable de transmitir la radiación solar en forma de calor a un fluido para convertirlo en vapor o para aumentar el rendimiento de alguna turbina de gas, esto último es más común cuando el fluido es un gas; en el caso de que el fluido sea agua, su temperatura es elevada para la producción de vapor, el cual sirve, al igual que en las centrales ya descritas, para dar movimiento a una turbina y repetir el procedimiento de cualquier central termoeléctrica.

Los heliostatos son espejos planos con un espesor que ronda los 4 y 6 mm y que cuentan con una estructura móvil que les permite seguir la dirección del sol. A su vez, la torre central cuenta con un tubo absorbedor a través del cual se transporta la energía calorífica. La torre o receptor central están diseñados con base en el fluido que circula en ellos (agua, sales orgánicas o gas) y en el procedimiento empleado para la transferencia de energía (de placa, tubulares, volumétricos).

La configuración del campo solar puede ser de dos tipos: norte y circular. En el campo norte, los heliostatos se encuentran detrás de la torre (al norte) para el máximo aprovechamiento del recurso solar; en el campo circular, la torre central está situada hacia el sur y los heliostatos se encuentran alrededor de ella.



Fuente:(SEIA (Solar Energy Industries Association), 2017)

Figura II.11. Central de torre central

Centrales de disco parabólico (Stirling)

Las centrales de disco parabólico cuentan con unidades independientes que poseen un reflector parabólico conectado a un motor Stirling situado en el foco (punto en el que concentra la radiación solar). Este tipo de centrales están formadas por un conjunto de unidades productoras independientes con potencias que van de los 5 a los 25 MW y que están conectadas a motores Stirling.

Las unidades generadoras cuentan con espejos que reflejan y concentran la radiación solar en un receptor, la cual, posteriormente, es absorbida y transferida al motor.

Las plantas de discos parabólicos tienen una extensión aproximada de 4.5 ha por MW instalado. El alto rendimiento de las centrales de disco parabólico, su sencillez técnica y la ausencia de fluidos para su funcionamiento hacen que éstas tengan un gran futuro pues el potencial de inversión es muy alto, sin embargo, las investigaciones acerca de los problemas técnicos que pudieran presentar han aumentado la incertidumbre de los desarrolladores de proyectos.



Fuente: (SEIA (Solar Energy Industries Association), 2017)

Figura II.12. Discos parabólicos con motor Stirling

II.3.2 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es aquella que convierte de forma directa la radiación solar en electricidad a través de módulos fotovoltaicos, los cuales están formados por células solares o fopilas. Estas células solares experimentan el efecto fotoeléctrico que no es más que la aparición de una corriente eléctrica en algunos materiales que son iluminados por la radiación electromagnética.

La luz solar, compuesta por fotones, incide sobre la célula solar, la cual los absorbe para transferir energía a los electrones de sus átomos. De esta manera, los electrones “escapan” de su posición normal y pasan a formar parte de una corriente en un circuito eléctrico.

La generación de electricidad a partir de la energía solar fotovoltaica no sólo depende de las células fotovoltaicas para que pueda funcionar correctamente, sino que debe incluir otro tipo de componentes para que el aprovechamiento de la energía sea el máximo posible. El conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que sirven para captar la energía solar y transformarla en electricidad constituyen los denominados sistemas fotovoltaicos.

Los sistemas fotovoltaicos se clasifican en sistemas aislados y sistemas conectados a la red, pese a las diferencias que pudieran presentar en el proceso de diseño e instalación, ambos sistemas comparten tres elementos principales: el campo fotovoltaico, el sistema de acondicionamiento de la potencia y el sistema de adquisición de datos. Antes de explicar cómo es que funcionan los sistemas fotovoltaicos es necesario explicar las características de los elementos que forman parte de cualquier sistema y el papel que juegan durante todo el proceso de transformación de la energía solar, por esta razón en los siguientes apartados se hace la presentación de cada uno de ellos.

Célula solar

Las células solares son el elemento básico en cualquier sistema fotovoltaico por lo que su diseño y fabricación tienen que considerar del material que habrá de utilizarse. El material elegido deberá contar con las propiedades adecuadas para aumentar la eficiencia y reducir las pérdidas de cualquier tipo.

En la actualidad, el material más común para la fabricación de células solares es el silicio cristalino. Las células de silicio cristalino son las más comerciales y producen un voltaje de aproximadamente 0.5 V; estas células deben tener un espesor de entre los 3 y 4 μm para que se presenten las condiciones ideales para generar el efecto fotovoltaico.

El silicio cristalino presenta dos configuraciones básicas: el silicio monocristalino y el policristalino. La diferencia principal entre las células que son elaboradas con los materiales anteriores es que las celdas policristalinas tienen una eficiencia menor debido a que en el proceso de fabricación se utiliza silicio de menor calidad, no obstante, la diferencia entre una y otra no es gran significancia.

Además de los materiales anteriores, que cuentan con estructura cristalina, se encuentra el silicio amorfo o película delgada. Las celdas de silicio amorfo son utilizadas en calculadoras, relojes y otros artefactos electrónicos que funcionan con luz solar ya que su costo es bajo y la eficiencia que se exige no es considerable. En la tabla II-2 se presenta el porcentaje de eficiencia, así como las ventajas y desventajas de los distintos tipos de celdas.

Tabla II.2. Comparación entre los distintos tipos de celdas solares

| Tipo de celda | Eficiencia (%) | Ventajas | Desventajas |
|------------------------|-----------------------|--|--|
| | Producción energética | | |
| Silicio Monocristalino | 12 - 16% | <ul style="list-style-type: none"> • Tecnología desarrollada y probada. • Estable • Mayor eficiencia | <ul style="list-style-type: none"> • Material costoso • Gran cantidad de material desperdiciado (proceso de fabricación). • Manufactura costosa |
| Silicio Policristalino | 11 - 14% | <ul style="list-style-type: none"> • Tecnología desarrollada y probada • Estable • Buena eficiencia • Menos costosas | <ul style="list-style-type: none"> • Material costoso • Material desperdiciado • Manufactura costosa |

| Tipo de celda | Eficiencia (%) | Ventajas | Desventajas |
|----------------|----------------|--|--|
| Silicio amorfo | 4 - 8% | <ul style="list-style-type: none">• Utiliza muy poco material• Producción rápida• Bajo costo• Menos afectación por niveles bajos de insolación. | <ul style="list-style-type: none">• Degradación pronunciada• Menor eficiencia• Menor durabilidad |

Fuente: (Fernández, 2010)

Panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas solares, los más comunes poseen entre 40-80 celdas conectadas eléctricamente en serie, teniendo superficies entre los 0.8 m² y los 2 m². Las celdas son protegidas con dos capas de protección: una en la parte superior y otra en la parte inferior; esta última funciona como una capa aisladora y provee rigidez al panel.

Asimismo, el panel cuenta con un vidrio en su parte delantera para proteger a las celdas del polvo, lluvia, granizo y de posibles golpes y de un marco metálico en las regiones laterales para facilitar su montaje y evitar la oxidación. Los contactos eléctricos se encuentran en la parte trasera, algunos paneles cuentan con cajas de plástico y agujeros laterales para la entrada y salida de los cables de conexión (figura II.13)

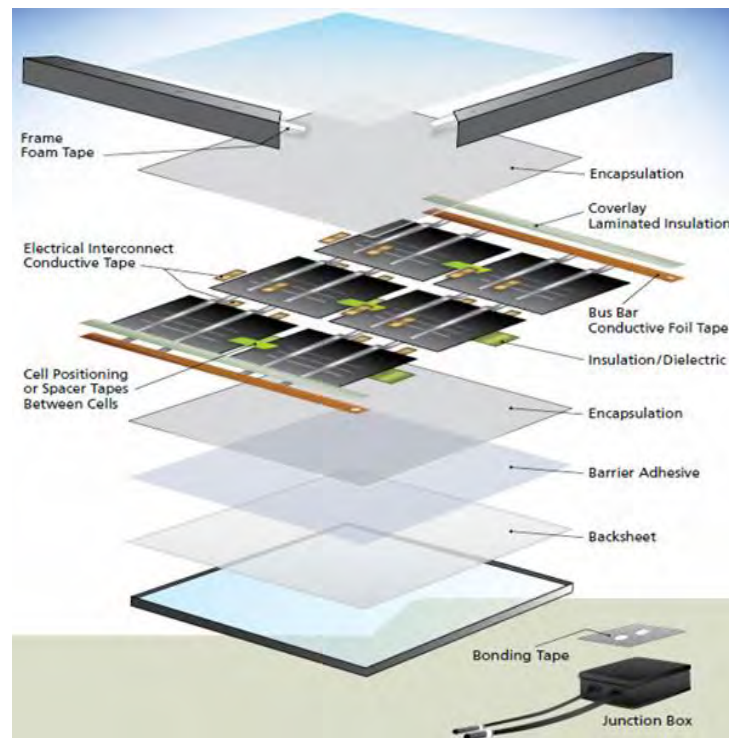
La potencia máxima de salida, característica más importante de los paneles, depende del tipo de células que los forman y puede llegar a variar entre los 50 Wp y los 220 Wp. Esta potencia máxima de salida considera una serie de factores que condicionarán su valor, tales como la intensidad de corriente, la tensión, la temperatura del lugar, la temperatura de trabajo y la degradación del panel.

Los principales módulos fotovoltaicos se encuentran resumidos en la tabla II.3.

Tabla II.3. Principales módulos fotovoltaicos

| Potencia de salida (W) | Tipo de módulo | Superficie | Aplicaciones |
|------------------------|--|---|---|
| Micropotencia 0-2 | <ul style="list-style-type: none"> Célula solar interior de 1.5 a 6 V. Módulo pequeño de silicio amorfo de 4 a 12 V. | 0-500 cm ² | Calculadoras, relojes, teléfonos, alarmas. |
| Potencia débil 2-10 | Módulos de silicio amorfo o silicio policristalino de 6 o 12V. | 500 cm ² -0.2 m ² | Instrumentación, estaciones meteorológicas, parquímetros, vallas electrificadas, electrificación rural. |
| Potencia media 20-50 | Módulos de silicio cristalino, mono o poli de 6 o 12V. | 0.2 m ² -0.5m ² | |
| Potencia fuerte 50-200 | Módulos de silicio cristalino, mono o poli de 12, 24V o más. | Mayor a 0.5 m ² | Casas aisladas, electrificación rural, conexión a red, telecomunicaciones, centrales solares. |

Fuente: (Labouret & Viloz, 2008)



Fuente: (Multibriefs, 2017)

Figura II.13. Estructura de un panel fotovoltaico

Generador fotovoltaico

Para que pueda disponerse de la potencia instalada adecuada, según la aplicación, se precisa del montaje de varios módulos fotovoltaicos. Dado lo anterior, existen dos configuraciones básicas para el montaje de los módulos: el montaje en serie y el montaje en paralelo. Debe considerarse que sólo los módulos que tienen la misma corriente se montan en serie y los que poseen la misma tensión se montan en paralelo.

El conjunto de módulos conectados eléctricamente en serie forman ramales, los cuales a su vez están conectados en paralelo para conformar un generador fotovoltaico. Los generadores fotovoltaicos se encuentran montados sobre estructuras mecánicas para aprovechar de mejor forma la energía solar.

Para el diseño de los generadores fotovoltaicos se toman en cuenta los factores que intervienen en los campos de aplicación; entre los principales factores a considerar se encuentran: la carga eléctrica demandada, la potencia máxima, posibilidad de conexión a la red eléctrica, latitud y radiación solar del lugar, características físicas del terreno o edificio y características eléctricas de carga.



Fuente: (Tecnotic, 2017)

Figura II.14. Generador fotovoltaico

Estructuras de soporte

Las estructuras de soporte, como su nombre lo indica, son las responsables de brindar apoyo a los generadores fotovoltaicos, a la vez que aseguran que éstos se encuentran en la posición ideal para captar la mayor radiación solar a lo largo de todo el año.

Existen dos estructuras básicas de soporte: las estructuras fijas y las estructuras con seguimiento solar. Los paneles que se encuentran sobre estructuras fijas cuentan con la inclinación óptima para captar los rayos solares durante el año; debido al cambio de posición del sol, la inclinación recomendada puede variar de acuerdo con la variación de la latitud del lugar aunque, generalmente, la inclinación es de 30° hacia el sur. La inclinación también puede variar en función de la aplicación de los paneles en $\pm 10^\circ$.

Por lo que se refiere a las estructuras con seguimiento solar, el diseño atiende a la necesidad de aumentar la producción eléctrica del sistema. Este tipo de estructuras pueden disponerse de tres maneras diferentes, una de ellas consiste en colocar los paneles con la inclinación adecuada para que la estructura pueda girar en un solo eje para seguir el movimiento del Sol (seguimiento polar en un eje). De la misma forma, los paneles pueden estar orientados hacia el sur y las estructuras hacen variar la inclinación de manera que los rayos solares incidan de manera perpendicular sobre su superficie (seguimiento azimutal en un eje). Finalmente, los paneles solares pueden apoyarse en estructuras de apoyo que en todo momento busquen la orientación y la inclinación necesarias para maximizar la irradiación solar sobre su superficie (sistema de seguimiento de dos ejes).

Cables de conexión

La elección de los cables de conexión es indispensable para que el transporte de la energía eléctrica en un sistema fotovoltaico sea eficiente y que las pérdidas de energía sean mínimas. El material más utilizado para la fabricación de los cables es el cobre, aunque también puede optarse por aluminio para disminuir las pérdidas en las conducciones.

Aunque los costos constituyen un aspecto importante para elegir el cableado, aspectos como la longitud y el área de los cables determinarán las pérdidas de energía (caídas de voltaje) y el volumen a utilizar, repercutiendo de forma directa en los costos finales.

Inversor

Los inversores son utilizados para convertir la corriente continua, que se encuentra presente en los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, en corriente alterna para que pueda ser inyectada a la red. Actualmente los tipos de inversores más utilizados son los autoconmutados y los conmutados en línea.

La diferencia entre ambos tipos de inversor es que a través de los conmutados en línea no se puede controlar el tiempo de parada de la conducción eléctrica, para ello requieren del apoyo de otros dispositivos. En el caso de los inversores autoconmutados, se cuenta con los dispositivos necesarios para controlar los tiempos de conducción y no conducción de la energía eléctrica.

Batería solar

El almacenamiento de la energía en los sistemas fotovoltaicos se realiza mediante baterías solares. Existen diferentes tipos de baterías solares pero las más comunes son de plomo ácido (Pb ácido) o de cadmio-níquel (NiCd) (Méndez & Cuervo, 2007). El funcionamiento general de las baterías solares consiste en una serie de reacciones químicas que indican su estado de carga; los electrodos de la batería, compuestos de plomo y óxido de plomo, se sumergen en un electrolito de ácido sulfúrico diluido. Estos electrodos, unidos a un receptor externo consumidor de corriente, se transforman en sulfato de plomo y en ácido diluido, la densidad de este último permitirá conocer el estado de carga y descarga de la batería.

El rendimiento de las baterías solares está en función de la temperatura del ambiente en el cual será instalada. La temperatura óptima para una batería es de aproximadamente 25°C ya que permite el balance entre su eficiencia y su vida útil.

Regulador de carga

La función principal de un regulador es proteger la batería de sobrecargas y descarga. La importancia de los reguladores de carga se debe a varias razones como: permite controlar los flujos de energía, protección de las baterías, asegura la vigilancia y seguridad de la instalación y ofrece información sobre el estado de carga de las baterías y de aspectos relativos al funcionamiento de las baterías.

Existen dos tipos de reguladores: los reguladores lineales y los reguladores conmutados. Los reguladores lineales, se clasifican a su vez en controles en serie y controles en paralelo. Esta última clasificación se relaciona con la dirección que toma la corriente de carga respecto al banco de baterías: en un control en paralelo, cuando la batería se alcanza un valor determinado de carga, la corriente de los paneles en desviada a un circuito que están en paralelo con el banco de baterías.

Los componentes descritos anteriormente resultan relevantes en el diseño de los sistemas fotovoltaicos, ya sean aislados o conectados a red, ya que permiten que el proceso de generación y distribución de electricidad se lleve a cabo de manera correcta y que las necesidades energéticas sean cubiertas en su mayoría. Las necesidades energéticas definirán el tipo de sistema fotovoltaico a utilizar, así como las características de los componentes a incluir.

II.3.3 Sistemas fotovoltaicos aislados

Los sistemas fotovoltaicos aislados son utilizados comúnmente para proporcionar energía eléctrica a usuarios que no tienen altos consumos energéticos y para los cuales resulta difícil conectarse a red. La aplicación principal de los sistemas aislados se encuentra en la electrificación de viviendas y edificios, alumbrado público, agricultura, bombeo y tratamiento de agua, señalización de obras y carreteras, sistemas de medición, entre otras.

Para el dimensionamiento de un sistema aislado deben tomarse en cuenta una serie de consideraciones que pueden resumirse en los siguientes pasos:

1. Determinación de las necesidades del usuario (tensión, características energéticas de los aparatos y el tiempo de operación de cada uno de ellos).
2. Cuantificación de la energía solar que pudiera recibir considerando su situación geográfica.
3. Definición de los módulos fotovoltaicos a utilizar.
4. Elección de la batería solar.
5. Elección del regulador.
6. Diseño de cableado
7. Estimación de los costos de instalación

Análisis de las necesidades energéticas del usuario

La primera tapa para el diseño de este tipo de sistemas es la más importante pues será determinante para las elecciones futuras de los componentes. Esta primera etapa requiere de la identificación de los aparatos con los que cuenta el usuario y del conocimiento de sus respectivas potencias eléctricas; además, habrán de estimarse las horas de operación al día de cada uno de los aparatos para calcular los consumos energéticos diarios y así realizar un balance energético de las instalaciones para conocer cuáles son las necesidades reales e identificar la medidas de ahorro de energía a implementar, ya sea la instalación de paneles solares o alguna otra medida de eficiencia energética.

Cuantificación de la energía solar a recibir

Para la cuantificación de la energía solar deben conocerse los datos meteorológicos del lugar en el cual se realizará la instalación fotovoltaica para conocer la orientación e inclinación de los módulos fotovoltaicos.

Los datos meteorológicos brindarán la información necesaria sobre los niveles de radiación del lugar, así como de los meses más favorables para la recolección de la energía solar. El diseño de la instalación fotovoltaica se hará tomando como referencia la condición más desfavorable de la región, esto es, el mes con menor radiación anual. Por otra parte, tienen que analizarse las posibles sombras que puedan producirse en edificios, si los módulos se van a colocar en alguno de ellos, u

originarse por otros obstáculos pues si alguna celda está en sombra podría ocasionar que el sistema reduzca su eficiencia.

Finalmente, se recomienda que los módulos estén orientados hacia el sur, si la instalación es en el hemisferio norte, y hacia el norte si la instalación es en el hemisferio sur. La inclinación de los paneles depende de los niveles de insolación anuales y de la latitud: se recomienda que la inclinación de los paneles sea igual, o cercana, a la latitud del lugar + 10° para un funcionamiento anual.

Definición de los módulos fotovoltaicos

En la elección de los módulos fotovoltaicos tiene que conocerse la producción eléctrica de los módulos en una jornada de operación, así como sus características técnicas. La tecnología de los módulos considera la potencia necesaria a instalar y las condiciones climáticas, además de las pérdidas de energía que pudieran presentarse.

Una vez determinados los módulos a utilizar, se determina cómo habrán de conectarse los paneles, es decir, en un arreglo en serie/paralelo o solamente en paralelo.

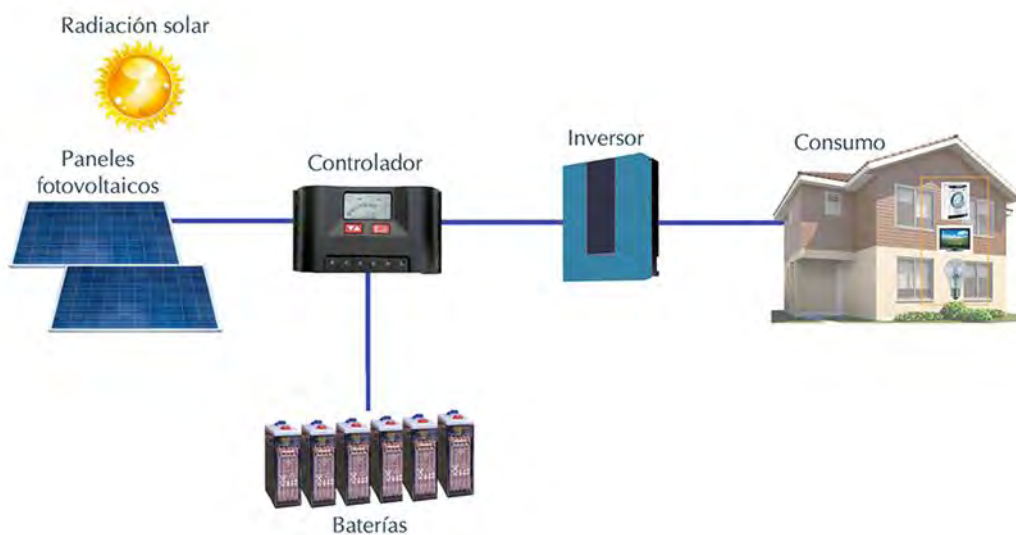
Elección de la batería solar y el regulador

La batería solar cuenta con propiedades que serán relevante en el diseño de un sistema fotovoltaico aislado y que tienen que tenerse en cuenta en el proceso de dimensionamiento, a saber: la tensión de operación, la pérdida de carga de la batería, la capacidad nominal (cantidad de carga que es posible obtener de una batería en 20 horas), la capacidad útil (capacidad disponible o utilizable de la batería), el estado de carga, la profundidad de descarga y el régimen de carga.

En lo que se refiere al regulador, es indispensable definir cuándo habrá de realizarse el corte de transmisión de energía entre los módulos y la batería. Una de estas tecnologías es el *regulador de carga* que hace que la batería se cargue bien y la protege de sobrecargas más no de los problemas de descarga, por otro lado el *regulador de carga y descarga*, adecuado para las instalaciones domésticas, permite que el suministro sea suspendido en alguno aparatos para que la batería se vuelva a

cargar. Definida la tecnología a utilizar, se procede al dimensionamiento final del regulador.

Se han descrito las etapas más importantes en el diseño de un sistema aislado, no obstante, existen otras actividades que lo complementan y que impactan en las propuestas económicas finales: el cableado final de la instalación, el montaje y mantenimiento de los módulos y otros componentes y los sistemas de iluminación son algunas de éstas.



Fuente: (BESTER,2015)

Figura II.15. Funcionamiento de un sistema aislado

II.3.4 Sistemas fotovoltaicos conectados a red

A diferencia de los sistemas fotovoltaicos aislados, los sistemas conectados a la red no cuentan con un sistema de almacenamiento de energía, es decir, con una batería solar, ya que la energía producida durante las horas de insolación es suministrada a la red. Una gran ventaja de los sistemas conectados a red es la ausencia de combustibles fósiles durante la producción de electricidad, lo que reduce considerablemente los costos y los impactos ambientales negativos.

Las aplicaciones principales de este tipo de sistemas se encuentran en:

- Sistemas sobreexpuestos en tejados de edificios. La instalación de los sistemas es relativamente fácil y, como su nombre lo indica, se aprovecha la superficie de los edificios para colocar los módulos fotovoltaicos.
- Centrales de producción. Para la instalación de este tipo de sistemas, son aprovechados grandes terrenos rurales que no son aprovechadas para otros usos o en cubiertas urbanas de gran extensión.
- Integración en edificios. En este caso, los paneles solares forman parte de la construcción y, por ende, se encuentran fijos a su cubierta.

Los componentes principales de un sistema fotovoltaico conectado a red son los módulos fotovoltaicos, el inversor, el dispositivo de intercambio con la red eléctrica y el contador de energía bidireccional. Como puede observarse, los componentes involucrados en un sistema conectado a red son menos que en un sistema aislado, lo que resulta en un diseño menos complejo, sin embargo, los estudios preliminares que deben realizarse deben ser más precisos para elegir adecuadamente los componentes con las mejores características y estimar la producción que tiene que producirse, en el caso de las grandes centrales.

Distribución de los módulos fotovoltaicos

Muchos son los aspectos que deben considerarse durante la instalación de los generadores fotovoltaicos en una central, no obstante, la inclinación es uno de los factores más importantes ya que guarda una relación directa con el máximo aprovechamiento de la energía solar. Lo ideal sería que la inclinación de los paneles variara a lo largo de todo el año pero si la superficie de la central es limitada esto se dificulta y entonces el ángulo de inclinación tiene que ser disminuido y aceptarse un porcentaje mínimo de pérdidas. A pesar de las pérdidas, la disminución del ángulo de inclinación tiene algunas ventajas, tales como: los soportes pueden ser más pequeños y por lo tanto más económicos, la potencia instalada es mayor, la sensibilidad al viento y el impacto arquitectónico son menores.

El tipo de energía recibida también juega un rol clave en la inclinación de los módulos. Los lugares con altitud baja, con nubes y brumas, reciben una mayor cantidad de energía difusa por lo que una inclinación más plana de los paneles favorecería una mayor captación de energía, por el contrario, los lugares con mayor

altitud reciben mayor energía solar directa por lo que la inclinación tiene que ser más alta.

La distancia entre los paneles solares está en función de la latitud del lugar y deberá asegurar que una exposición de mínimo cuatro horas durante el solsticio de invierno y que no presenten sombras que puedan afectar la captación de energía. La expresión utilizada para calcular la distancia entre los módulos es:

$$d = h/tg(61^\circ - \text{latitud}) \dots (4)$$

donde $h/tg(61^\circ - \text{latitud})$ es un coeficiente adicional denominado k y está en función de la latitud del lugar.

Dimensionamiento de un sistema conectado red

El dimensionamiento de un sistema conectado a red sea cual sea su alcance, incluye la elección de los componentes, la configuración del campo fotovoltaico, la estimación de la energía anual producida y el análisis de costos.

La elección de los componentes del sistema dependerá de los aspectos técnicos y económicos, principalmente. La elección del convertidor, un elemento significativo en las centrales solares, tendrá que tener una potencia de salida ligeramente menor a la potencia generada por el campo fotovoltaico, esto por las pérdidas que pudieran presentarse en este último, es decir, las posibles pérdidas por el cableado y la diferencia de potencia entre los paneles. Si la potencia de entrada (la generada por los módulos) resulta ser mayor, la potencia del convertidor se mantiene y las pérdidas son menores.

Estimación de la producción de energía anual

La producción anual de energía de una central solar está en función de la irradiación solar, de la potencia instalada y del rendimiento de la instalación. Para realizar los cálculos necesarios se debe disponer de los valores medios, mensuales y anuales, de irradiación diaria sobre una superficie horizontal. A continuación, se definen algunos de los componentes que intervienen en la estimación de la producción de energía anual.

- $G_{dm}(0)$, valor medio mensual y anual de la irradiación diaria sobre superficie horizontal, en kWh/m^2 día.
- $G_{dm}(\alpha, \beta)$, valor medio mensual y anual de la irradiación diaria sobre el plano del generador en kWh/m^2 día, obtenido a partir del dato anterior, y dentro del cual se consideran las pérdidas por sombras en caso de que sean mayores al 10% anual. El término α representa la inclinación del generador fotovoltaico y β el azimut (ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar).
- PR, rendimiento energético de la instalación en condiciones reales de trabajo.

La estimación de la producción anual de energía se realiza aplicando la ecuación (5):

$$E_p = \frac{G_{dm}(\alpha, \beta) * P_{pm} * PR}{G_{CEM}} \dots (5)$$

donde P_{pm} : potencia pico del generador y $G_{CEM} = 1 kW/m^2$

Las unidades de E_p se encuentran en kWh/día.

Montaje de un sistema conectado a red

Al igual que los sistemas aislados, los sistemas conectados a red pueden montarse de diferente manera con base en las características de la instalación. Los montajes más comunes suelen hacerse sobre tejados o fachadas, bastidores, postes, arquetas o pueden estar integrados a los edificios, en cualquier caso, las estructuras de soporte deben contar con las protecciones correspondientes contra la corrosión y otras afectaciones de la intemperie.

El montaje sobre bastidores suele ser empleado en lugares accidentados (montañas, por ejemplo) para aprovechar sus propiedades y anclarlas al suelo. Las estructuras tienen que ser de acero inoxidable o aluminio y, generalmente, se fijan al suelo. Por otra parte, los montajes sobre postes se realizan en lugares pequeños y para evadir las sombras en los módulos; los elementos utilizados en este tipo de montaje deben estar adaptados al peso de los módulos y a la acción del viento, en lo que se refiere al poste, éste debe ser hueco y tener un orificio de acceso para los cables.

Aunque el montaje de los paneles sea similar al que se emplea en los sistemas aislados, los requerimientos de seguridad en los sistemas conectados a red son mucho más exigentes debido a la tensión del campo fotovoltaico. Entre los aspectos a considerar durante el montaje son las puestas a tierra, la protección contra rayos y el aislamiento.



Fuente: (ATERSA, 2018)

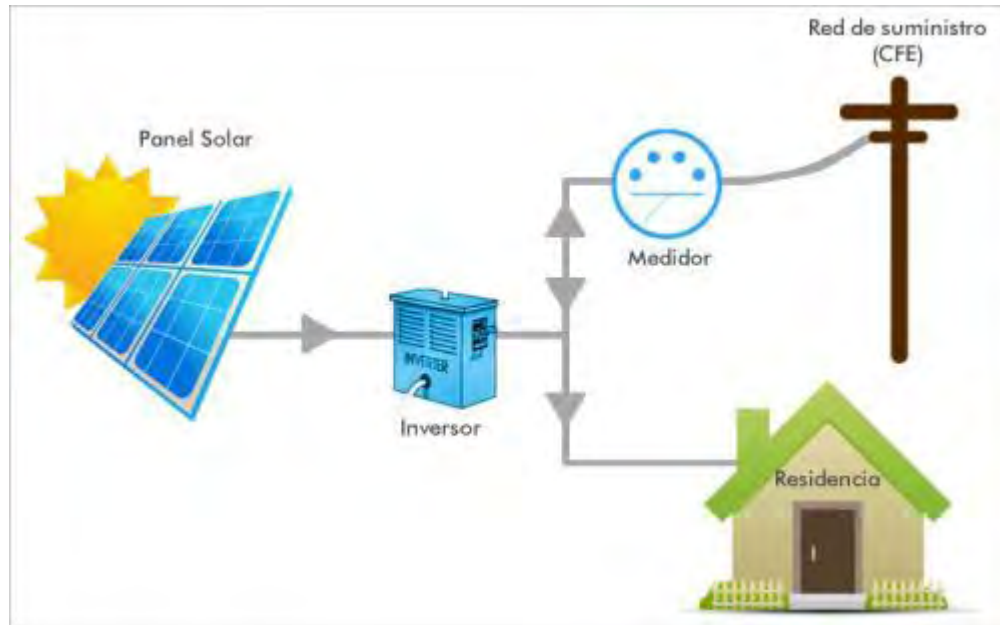
Figura II.16. Estructura de soporte de generadores solares

Mantenimiento del sistema

Los sistemas fotovoltaicos conectados a red requieren de un mantenimiento especial que asegure un buen funcionamiento durante toda su vida útil (30 años aproximadamente). Se distinguen dos tipos de mantenimiento: el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo

El mantenimiento preventivo incluye actividades que permiten el registro de las condiciones de funcionamiento del sistema y de la instalación. Algunas de las actividades que se incluyen en este tipo de mantenimiento son: la comprobación del estado de los módulos, del inversor y de los cables, así como el registro de todas las actividades de mantenimiento que se estén realizando tales como la limpieza de los paneles y las acciones asociadas al mantenimiento del inversor, de las estructuras de soporte y de los seguidores.

El mantenimiento correctivo abarca las acciones de sustitución de equipo necesarias en el sistema, entre estas acciones se incluyen las visitas a las instalaciones, así como la identificación y análisis de los costos de las posibles reposiciones de equipo.



Fuente: (CSIER RENOVABLE, 2017)

Figura II.17. Funcionamiento general de un sistema fotovoltaico interconectado a red

Capítulo III. Impactos de la energía solar

La energía solar proporciona grandes beneficios a los seres humanos y al medio ambiente pues no sólo promueve el desarrollo sustentable y la mitigación de los efectos del cambio climático, sino que trae consigo beneficios socioeconómicos sustanciales. En contraste con las fuentes tradicionales para la generación de energía eléctrica (combustibles fósiles), las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de fuentes renovables son nulas y los costos asociados pueden ser menores, sin embargo, la magnitud de los proyectos solares es proporcional a los impactos que pudieran causar durante su desarrollo e implementación.

Si bien los impactos de la energía solar, y en general de todas las energías renovables, son mínimos, el desarrollo de proyectos de esta especie puede provocar cambios en las regiones en las cuales se llevan a cabo, principalmente en el uso de suelo, en la flora y fauna, en los cuerpos de agua u originar niveles de ruido considerables, e incluso tener impactos visuales negativos, aunque este último suele ser relativo. En el caso de los proyectos de energía solar, éstos tienen implicaciones positivas en las regiones en las que se llevan a cabo como la recuperación de zonas degradadas, la reducción de líneas de transmisión y el mejoramiento de los recursos hídricos, en cualquier caso, es menester realizar los estudios y evaluaciones pertinentes que ayuden a identificar los posibles riesgos y tomar las medidas de mitigación correspondientes.

En el caso de los proyectos de energía solar, deben considerarse diversos aspectos para que sean efectuados de la mejor manera, a saber:

- La ubicación. Los sistemas solares de gran magnitud deben estar ubicados en zonas que no estén altamente pobladas, que no pertenezcan a alguna área nacional protegida y que no cuenten con gran belleza natural.
- El proceso operativo debe estar diseñado para promover el uso racional del agua, así como contar con medidas de seguridad y disposición de desechos apropiadas.

- Consultar a las comunidades durante las primeras etapas del proyecto para garantizar su aceptación.
- El uso de tecnologías y técnicas más sofisticadas.
- Identificación de las limitaciones del proyecto y la realización de evaluaciones previas a su desarrollo.
- Entrenamiento del personal que participará en la construcción de las centrales solares.
- El restablecimiento de la flora y fauna locales.
- La elaboración de la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) y de la Evaluación de Impacto Social (EVIS) correspondientes.

A continuación, se describen los posibles impactos que pueden llegar a presentarse durante el desarrollo de proyectos solares.

III.1 Impactos socioeconómicos

Lo constantes conflictos sociales que se derivan de la realización de proyectos de energía solar en diversas regiones, han puesto en duda los beneficios que éstos podrían ofrecer a las comunidades. En nuestro país, por ejemplo, aproximadamente 18 proyectos de energías renovables, entre ellos parques fotovoltaicos, se encuentran detenidos por problemas con las comunidades locales las cuales reclaman la falta de consulta o por los impactos asociados.

No obstante, lo anterior, la construcción de proyectos solares trae consigo beneficios económicos que promueven el bienestar social de las comunidades aledañas al lugar del proyecto como:

- Independencia energética a nivel regional y nacional.
- Creación de empleos para las poblaciones locales.
- Diversificación y abastecimiento en el suministro de energía.
- Promoción del desarrollo rural por medio de la electrificación.

Aunado a lo anterior, la afluencia de trabajadores externos provoca una derrama económica importante en la zona de proyecto debido al consumo de productos locales, de la misma manera, y como ya se ha mencionado, la creación de empleos

temporales contribuye a la dinamización de la economía, principalmente durante la etapa de construcción.

En este mismo contexto, el desarrollo de proyectos de energía solar favorece la creación de grupos de toma de decisiones en las poblaciones además de atraer inversión extranjera para el desarrollo de proyectos de energías limpias, lo que a largo plazo podría generar oportunidades en las comunidades y mermar la migración. La participación de las comunidades en este tipo de proyectos es una de las más grandes ventajas pues fortalece las iniciativas de desarrollo social creando alianzas con instancias y actores claves, lo cual abre la posibilidad de que sean atendidas algunas de las necesidades identificadas mediante la Evaluación de Impacto Social (EVIS).

Los beneficios económicos y sociales que resultan de los proyectos solares son significativos, sin embargo, algunos pobladores pueden verse afectados debido a que la instalación de los componentes principales de las centrales solares impide que se realicen actividades futuras de agricultura y ganadería, asimismo, el uso de agua durante la ejecución de los proyectos puede agravar la escasez del recurso en regiones con baja disponibilidad.

III.2 Impactos de la energía solar termoeléctrica

Ya se ha hablado de los múltiples beneficios que aportan las tecnologías de energía solar a la sociedad y al medio ambiente pero también es necesario conocer los impactos negativos que se presentan durante las diferentes etapas de los proyectos solares, aunque cabe señalar que son mínimos en comparación con los causados por el uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad.

El proceso de fabricación de los componentes y la construcción de las centrales termoeléctricas tienen impactos casi imperceptibles pues la emisión de gases de efecto invernadero durante la manufactura de los materiales y los componentes no es de un volumen considerable. Por su parte, los efectos del proceso constructivo no difieren en gran medida de los que se manifiestan en otros proyectos de energías renovables como generación de ruido, posibles alteraciones sobre la fauna y flora y

el paisaje del lugar además de la emisión temporal de contaminantes debido al transporte de trabajadores y materiales a la zona de proyecto.

III.2.1 Suelo, flora y fauna

Los efectos que se presentan en el suelo son mínimos ya que los proyectos de energía termoeléctrica son caracterizados por abarcar pequeñas extensiones de terreno y, generalmente, se encuentran ubicados en zonas desérticas con suelos no muy fértiles. En lo relativo a la flora y fauna, se ha encontrado que la sombra de los reflectores beneficia la creación de microclimas y favorece el desarrollo de la vegetación localizada en los alrededores del proyecto; las centrales termoeléctricas de concentración pudieran representar un riesgo para las aves y para los insectos voladores, los cuales pueden quemarse al volar cerca de la zona de reflectores, más la experiencia ha demostrado que estos daños son poco relevantes.

III.2.2 Impactos visuales y ruido

El paisaje de las regiones en las que se llevan a cabo proyectos termoeléctricos no sufre afectaciones de gran consideración pues los requerimientos técnicos para su ejecución señalan lugares de baja densidad de población para su construcción, además, durante el proceso de planeación y diseño, deben considerarse lugares con poca belleza natural.

Por otra parte, los niveles de ruido registrados en la operación de las centrales termoeléctricas tampoco suelen ser de importancia si son comparados con los registrados en parques eólicos. Las centrales termoeléctricas de disco parabólico equipadas con motor Stirling producen ruido durante su funcionamiento, pero los nuevos motores cuentan con tecnología que hacen que su operación sea más silenciosa, reduciendo así posibles perturbaciones.

III.2.3 Impactos en los recursos hídricos

El empleo de agua para facilitar los procesos de refrigeración en algunos tipos de centrales termoeléctricas (torre central, por ejemplo) supone un riesgo en las regiones que sufren de escasez ya que se incrementa la presión sobre el recurso.

Otro de los impactos potenciales es la contaminación de los recursos hídricos por descargas térmicas y/o por la liberación de sustancias químicas tóxicas, aunque éstos pueden ser evitados si se diseñan las medidas de operación correctas.

III.3 Impactos de la energía solar fotovoltaica

La aplicación de la energía solar fotovoltaica ha ido incrementándose a nivel mundial debido a que sus procesos operativos no son tan complejos en comparación con otras tecnologías además de los muchos beneficios que brinda, sin embargo, estas grandes ventajas se ven opacadas por los riesgos ambientales que conlleva la fabricación de los paneles solares.

Las sustancias químicas que son empleadas para fabricar las celdas solares pueden llegar a contaminar de manera significativa el aire y las aguas superficiales y subterráneas. Aunque las emisiones asociadas a la fabricación de las celdas solares no son de gran importancia, el daño que pueden causar en la calidad del aire es significativo considerando que son proporcionales al tamaño de los sistemas fotovoltaicos y que las características de la zona en la que son instalados también determinan la magnitud del impacto.

Otros impactos derivados del empleo de la tecnología solar fotovoltaica son abordados en los siguientes apartados.

III.3.1 Impactos en el uso de suelo

Las modificaciones o daños que pudiera sufrir el suelo se dan, generalmente, en la etapa de construcción. Las actividades que se requieren para la construcción de las centrales fotovoltaicas provocan movimientos en la tierra y perjudican las propiedades productivas del suelo, situación que ocasiona problemas con los pobladores ya que ven amenazadas sus costumbres.

III.3.2 Impactos visuales

Al igual que en las centrales termoeléctricas, la afectación visual sólo puede darse en el caso de que las centrales estén localizadas en zonas de gran belleza pues a

medida que la región cuenta con mayor valor estético la alteración es más evidente. En el caso de que los paneles solares se encuentren integrados en los edificios, la estética de éstos puede verse disminuida si es que el diseño arquitectónico no está en armonía con el sistema fotovoltaico.

III.3.3 Impactos sobre la flora y la fauna

Las centrales solares fotovoltaicas no tienen impactos negativos de gran relevancia en las especies florísticas, no obstante, ello depende de que se lleven a cabo los estudios correspondientes para identificar la presencia de endemismos o de especies que merezcan algún tipo de protección. De existir especies de flora protegidas, deberán implementarse medidas preventivas o elegir algún otro sitio para desarrollar el proyecto.

En cuanto a la fauna, las cadenas alimenticias son susceptibles de alteración cuando los proyectos son de gran magnitud, provocando el deterioro de los ecosistemas. Algunas especies que construyen sus nidos en superficie sobre zonas de pastizales pueden verse afectados pues los parques solares son construidos en terrenos donde abunda esta clase de vegetación.

Otro tipo de impactos causados por la construcción de parques fotovoltaicos son la generación de ruido y de residuos, pero al igual que en las centrales termoeléctricas, los niveles de ruidos no son de consideración y si la disposición de residuos es la correcta no se tendrán efectos negativos en la zona de proyecto.

En la tabla III. 1 se muestran algunos efectos negativos de los proyectos solares, así como algunas medidas de mitigación recomendadas para su ejecución.

Tabla III.1. Impactos negativos y recomendación de medidas de mitigación en los proyectos solares

| Impactos negativos/ Riesgos | Medidas de mitigación |
|---|---|
| Energía solar fotovoltaica | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Uso de suelo. Grandes extensiones son requeridas para los sistemas solares. • Reducción de tierras cultivables. • Afectación estética (impactos visuales). • Impacto en los ecosistemas (grandes centrales fotovoltaicas). • Uso de materiales tóxicos durante la construcción de los módulos. • Riesgos de salud derivados de la fabricación, uso y disposición de los módulos. | <ul style="list-style-type: none"> • Ubicación de proyectos fotovoltaicos en áreas aisladas y desiertas. • Evitar zonas con importancia ecológica y/o arqueológica. • Integración en grandes edificios comerciales (techos, fachadas). • Utilizar aisladores acústicos en zonas cercanas a carreteras y hospitales. • Diseño cuidadoso de los proyectos. • Integración de los paneles solares como elementos arquitectónicos en las construcciones. • Evitar el desarrollo de proyectos en zonas con alta belleza natural. • Adoptar las normas de seguridad existentes y buenas prácticas para evitar la liberación de materiales tóxicos y peligrosos. • Buenas prácticas de trabajo como el uso de guantes de protección, el uso de ropa adecuada durante la construcción y gafas de sol. |
| Energía termoeléctrica | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Actividades de construcción. • Impactos visuales • Uso de suelo • Efecto en los ecosistemas, la flora y fauna (especialmente aves). • Impacto en los recursos hídricos debido al tipo de uso (enfriamiento de vapor en la planta) y posible contaminación por descargas térmicas o derrame accidental de sustancias químicas. • Riesgos laborales. | <ul style="list-style-type: none"> • Buenas prácticas de trabajo. • Restauración de sitios • Ubicación adecuada. Evitar la ubicación de los proyectos en regiones con ecosistemas importantes y de gran belleza natural. • No sobreexplotar los recursos existentes. • Mejoramiento de las tecnologías empleadas. • Buenas prácticas de operación y cumplimiento de la normatividad vigente. • Entrenamiento de los trabajadores de las plantas termoeléctricas. |

Fuente: (Tsoutsos, et al., 2005)

Capítulo IV. Caso de estudio: Central Eléctrica Solar Fotovoltaica en Ahumada, Chihuahua

Con base en lo expuesto en los capítulos II y III del presente documento, a continuación, se describirá el proyecto de construcción de una central eléctrica solar fotovoltaica en el municipio de Ahumada, Chihuahua. A través de este caso de estudio se pretende mostrar la aplicación de la energía solar en la generación de electricidad y tener un acercamiento a los procesos de planeación y diseño de los proyectos solares y a todos los aspectos que intervienen como los ambientales y los socioeconómicos.

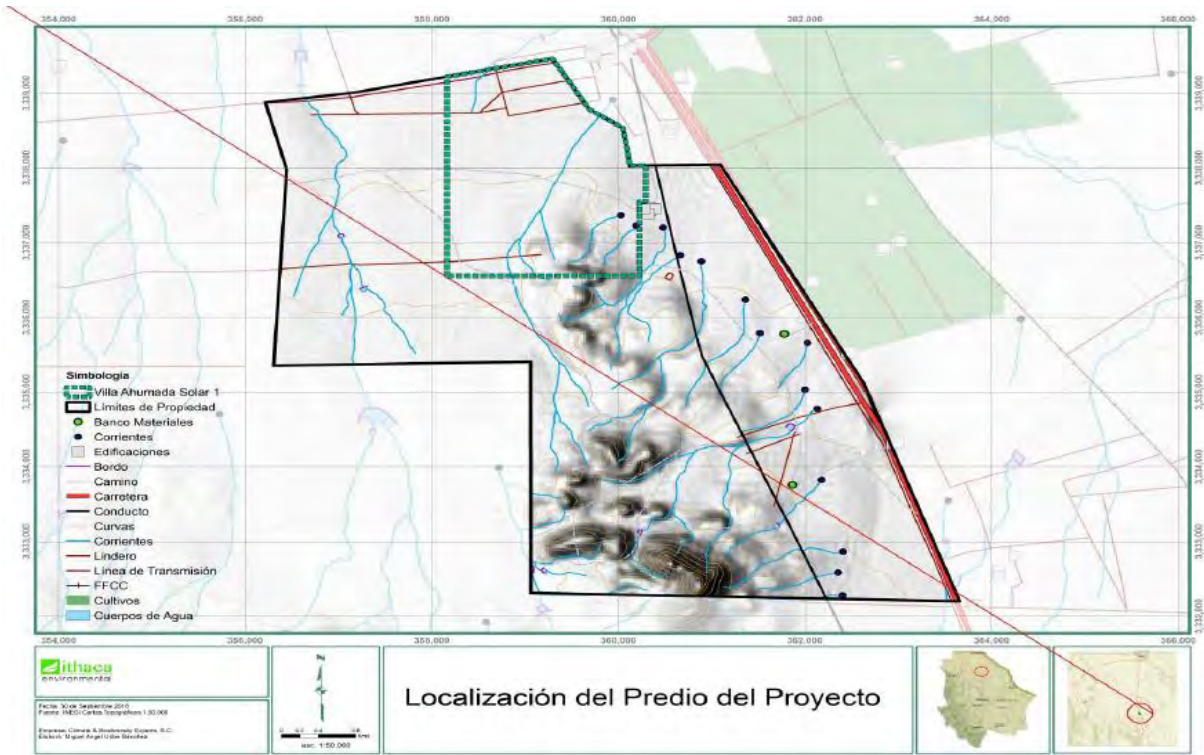
IV.1 Caracterización del sitio

La central eléctrica solar fotovoltaica denominada “BNB Villa Ahumada Solar I” estará ubicada en el municipio de Ahumada, en el estado de Chihuahua. La zona de proyecto se encuentra al norte del municipio, en dirección sur de la ciudad de Villa Ahumada y a la altura de la autopista Miguel Ahumada (km 186). La ubicación del proyecto puede observarse en la figura IV-1.

La zona de proyecto se encuentra cercana a la subestación eléctrica Moctezuma, lo que representa una gran ventaja para los fines de la central eléctrica. Los límites del polígono del proyecto son los siguientes:

- Al norte limita con la línea de transmisión de la CFE que conecta con la localidad de Benito Juárez, municipio de Buenaventura, Chihuahua.
- Al Sur y al Oeste limita con terrenos con vegetación de matorral desértico micrófilo del municipio de Ahumada.
- Al Este limita con la carretera Chihuahua-Miguel Ahumada y terrenos agrícolas del municipio de Ahumada.

La zona de proyecto es una zona de producción, la cual se caracteriza por su potencial para la producción de madera y otros productos no maderables. Actualmente, en el área se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas.



Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Figura IV.1. Ubicación del proyecto

IV.1.1 Clima

Los climas que predominan en la zona de proyecto son *Muy seco*, *Seco*, *Semiseco* y *Templado*, los cuales son, además, característicos del estado de Chihuahua: el clima *Muy seco* representa el 40% del total de la superficie del estado, el *Seco* y *Semiseco* el 33%, mientras que el *Templado* y el *Cálido subhúmedo* representan el 24 y 3%, respectivamente.

El municipio de Ahumada puede llegar a presentar temperaturas extremas que alcanzan un máximo de 48°C y un mínimo de -30° y niveles de precipitación muy bajos, de hecho, su precipitación media anual es menor a los 300 mm, muy por

debajo de la media nacional (771 mm). La precipitación pluvial anual en la zona del proyecto fue de aproximadamente 292 mm, siendo agosto el mes con mayor precipitación (71.1 mm), contrariamente, abril fue el mes con menores registros de precipitación (Ithaca Environmental, 2016).

De acuerdo con la Manifestación de Impacto Ambiental del proyecto (Ithaca Environmental, 2016), los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas de Samalayuca y Las Lajas indican que la temperatura media anual del municipio es de 15.3°C, la temperatura máxima anual es de 24.8°C y la temperatura mínima anual es de 5.8°C. Las temperaturas más bajas se han registrado en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, mientras que las más altas se presentan en mayo, junio y julio.

IV.1.2 Geología

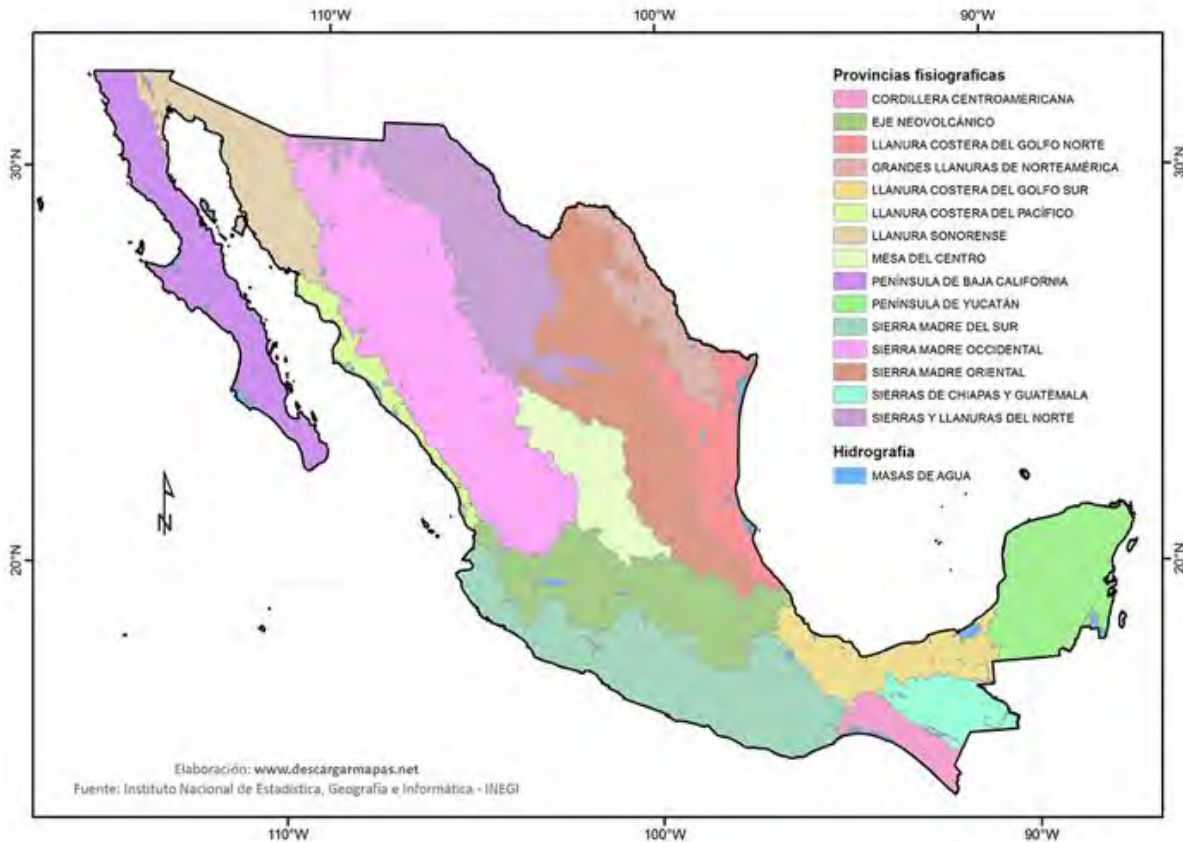
Características fisiográficas

Provincia fisiográfica

El área del proyecto se encuentra localizada en la provincia fisiográfica *Sierras y Llanuras del Norte* (Ver figura IV.2). Esta provincia fisiográfica se distingue por sus sierras bajas e inclinadas, las cuales se encuentran separadas por grandes llanuras, asimismo, es común la presencia de bolsones o cuencas endorreicas y lagos temporales. Dentro de la provincia se ubica la cuenca del río Conchos y, en su centro, el Bolsón de Mapimí. Al sur de Ciudad Juárez, se encuentra el campo de dunas de Samalayuca, uno de los más extensos del país (González, 2004).

El Estado de Chihuahua abarca nueve subprovincias fisiográficas, cinco de ellas (Sierras y Cañadas del Norte, Sierras y Llanuras Tarahumaras, Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses, Sierras y Llanuras de Durango, Gran Meseta y Cañones Duranguenses) pertenecen a la provincia fisiográfica de la Sierras Madre Occidental, las cuatro restantes (Llanuras y Médanos del Norte, Sierras Plegadas del Norte, Del Bolsón de Mapimí y Llanuras y Sierras Volcánicas) pertenecen a *Sierras y Llanuras del Norte*. El proyecto se ubica dentro de la subprovincia *Llanuras y Médanos del Norte*; esta subprovincia cuenta con amplias bajadas, sierras pequeñas escarpadas,

campos de dunas (médanos) y llanuras que se encuentran cubiertos por aluviones, aunque las sierras y lomeríos cuentan con rocas basálticas y calizas.



Fuente: Instituto Nacional de Geografía

Figura IV.2. Provincias fisiográficas de México

Características litológicas

Las características litológicas del estado de Chihuahua pueden clasificarse de acuerdo a la región: la región volcánica cenozoica representada por la Sierra Madre Occidental y la región sedimentaria formada por las sierras plegadas de calizas mesozoicas de la parte oriental del estado (CONABIO, 2014).

Las rocas que predominan en el estado se formaron desde el Precámbrico hasta la era Cenozoica. Los tipos de rocas más comunes son las ígneas extrusivas, las sedimentarias y los depósitos recientes. En el caso de la zona de proyecto, las rocas

que se han identificados cuentan con diversas características dependiendo del periodo en el cual se formaron:

- Las rocas ígneas extrusivas del **periodo terciario** ocupan la mayor superficie estatal y se distinguen por ser ácidas del tipo asociación riolita-toba, este tipo de rocas es común en la Sierra Madre Oriental. Otro tipo de rocas presentes en la Sierra Madre Oriental son las tobas riolíticas, las ignimbritas, almacenamientos internos de riolita, toba lítica, toba arenosa, toba vítrea, vidrio riolítico, entre otros.
- Las rocas del **periodo cuaternario** son principalmente ígneas y cuentan con componentes arcillosos, mal compactados y poco cementados por carbonato de calcio y óxido.

Relieve

El relieve del área del proyecto consiste en franjas de terreno formado en las bases de las cadenas montañosas y en elevaciones que van de los 1000 a los 1500 m.s.n.m.

Edafología

Las unidades edafológicas identificadas en la zona de proyecto se describen a continuación:

- Cambisol. Los cambisoles son suelos jóvenes y poco desarrollado, pueden encontrarse en cualquier tipo de vegetación o clima. Se distinguen por presentar masas pequeñas de tierras sueltas con acumulaciones de arcillas, fierro o manganeso. Sus usos son diversos, aunque están en función del tipo de clima del lugar en el que se encuentran. Su susceptibilidad a la erosión es moderada a alta.
- Calcisol. Este tipo de suelos tiene como característica principal la acumulación de carbonato cálcico (horizonte cálcico) a cierta profundidad. Son suelos con un pH básico y con presencia de carbonatos, lo que provoca que las plantas

no puedan absorber correctamente el hierro. Los calcisoles abarcan áreas semiáridas y subhúmedas.

- Regosol. Los regosoles están ubicados en distintos tipos de clima, relieve y vegetación, son claros y pobres en materia orgánica. La fertilidad de estos suelos es variable y su productividad está en función de la profundidad y la pedregosidad del lugar.
- Leptosol. Los suelos de este tipo son delgados y poseen escasa profundidad, la retención de agua y nutrientes es insignificante debido a las barreras físicas que presenta (rocas duras, alta pedregosidad, barreras químicas). Su aptitud para el uso agrícola es nula, no obstante, son ideales para usos recreativos o actividades de pastoreo.

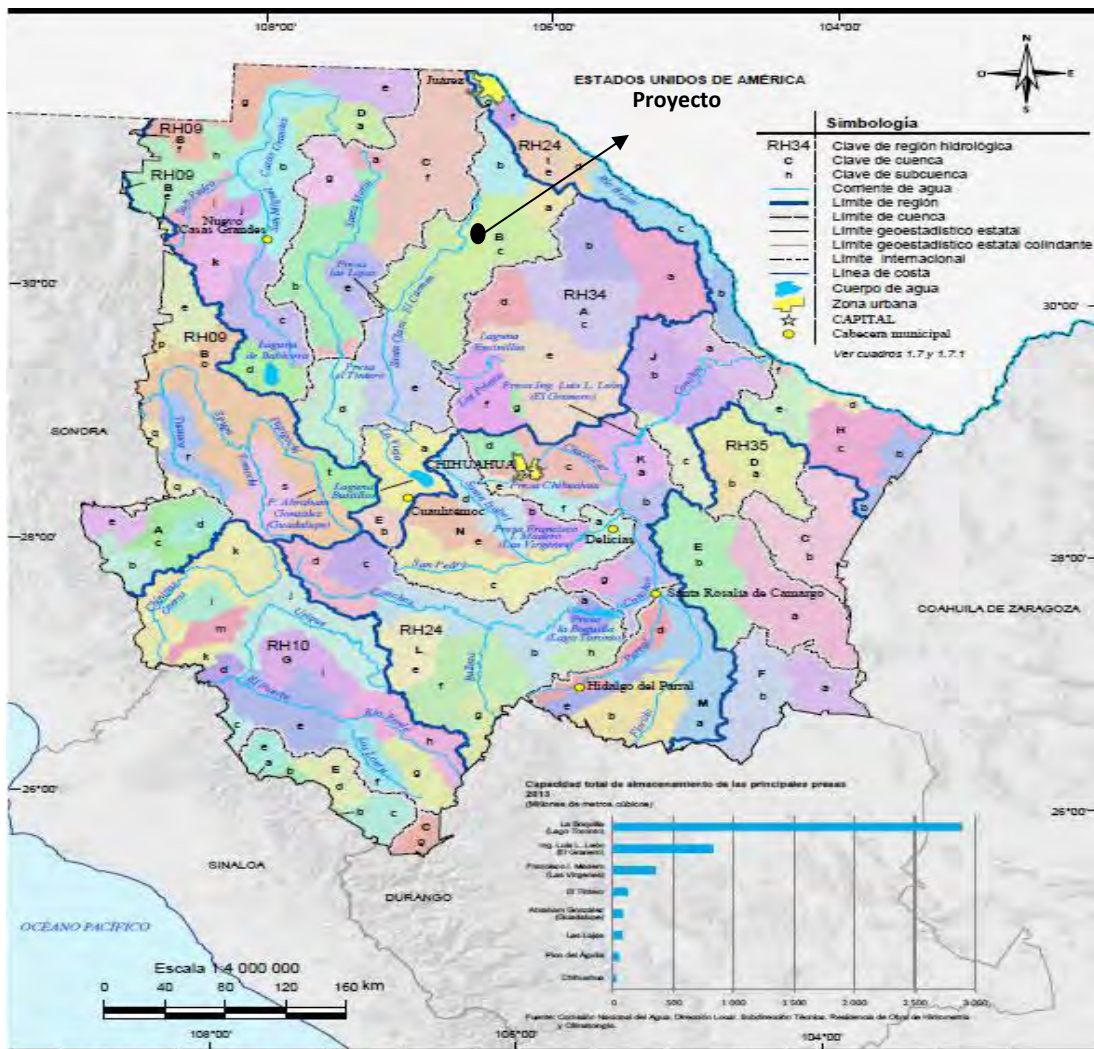
IV.1.3 Hidrología

El Municipio de Ahumada forma una cuenca cerrada en la cual, como su nombre lo indica, los ríos no desembocan en el mar sino en las lagunas de la región y las únicas pérdidas que se registran son por evaporación.

El Río del Carmen es la corriente principal de la cuenca, nace en el municipio de Buenaventura y desemboca en la Laguna de Patos, al norte de Villa Ahumada junto a la Carretera Federal 45. La construcción de presas y el uso para riego han provocado que la laguna se encuentre completamente seca ya que impiden que el río desemboque en ella.

El municipio de Villa Ahumada se encuentra comprendido en la Región Hidrológica *Cuencas Cerradas del Norte* (Región Hidrológica RH34). Esta cuenca es la que ocupa mayor superficie del estado de Chihuahua y agrupa todas las corrientes que se generan entre la Sierra Madre Occidental y las cuencas de los ríos Conchos y Bravo, se integra por las cuencas Río Casas Grandes, Arroyo El Carrizo y Otros, Río Santa María y Laguna Bustillos y de los Mexicanos (INEGI, 2003). El área aproximada de la región es de 88,418 km², de los cuales 87,473 km² se ubican en Chihuahua y 945 km² en Sonora.

Asimismo, el área de proyecto se encuentra en la cuenca y subcuenca Río del Carmen (RH34B y RH34Bc, respectivamente). Las características hidrológicas del estado de Chihuahua que influyen directamente en la zona de proyecto pueden observarse en la figura IV.3



Fuente: INEGI-CONAGUA. 2007. Mapa de la Red Hidrográfica Digital de México Escala 1: 250 000. INEGI. Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales Escala 1: 250 000, serie I. INEGI. Información Topográfica Digital Escala 1: 250 000, serie II.

Figura IV.3. Hidrografía del Estado de Chihuahua

La red de drenaje en la zona de estudio es de tipo intermitente, al igual que los cuerpos de agua que se encuentran en ella, por lo que las probabilidades de que se genere algún escurrimiento son mínimas además de que las zonas inundables se encuentran fuera del polígono.

En lo relativo a la hidrología subterránea, el proyecto se encuentra dentro de la región del acuífero subterráneo *Flores Magón-Villa Ahumada (Clave 0821)*. El acuífero abarca una superficie de 6,756 km² y comprende los municipios de Ahumada, Buenaventura, Namiquipa y Chihuahua.

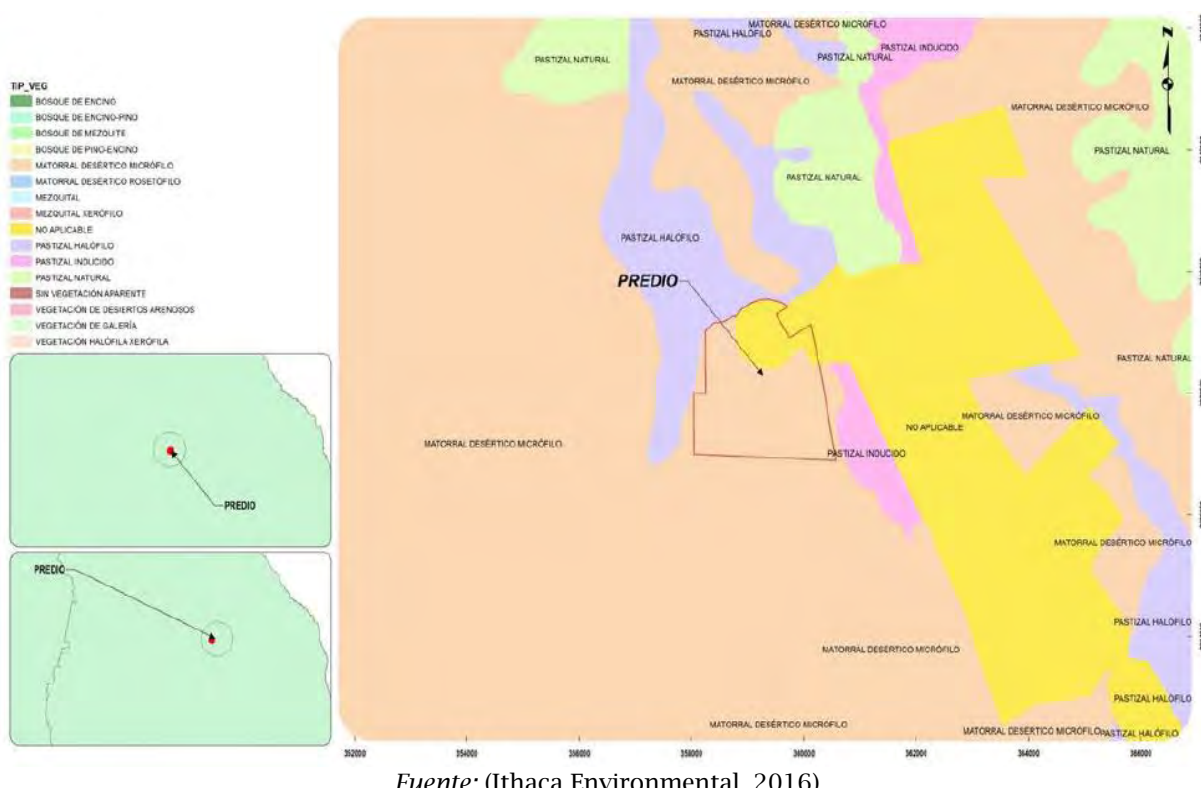
IV.1.4 Aspectos bióticos

Vegetación y uso de suelo

Para identificar y caracterizar la vegetación existente en el predio del proyecto se ejecutaron diferentes metodologías como la revisión de cartas de uso de suelo y vegetación, revisión cartográfica satelital, toma de fotografías con dron, toma de fotografías a nivel campo y muestreos en campo.

Los estudios realizados en el área de proyecto indican que ésta se encuentra en un uso de suelo *No aplicable* y *Vegetación de Matorral Desértico Micrófilo*, como puede observarse en la figura IV.4. El *Uso de Suelo No Aplicable* hace referencia a los usos agrícolas, pecuarios y urbanos que se llevan a cabo en una región determinada mientras que la vegetación de Matorral Desértico Micrófilo consiste, principalmente, en arbustos de hojas pequeñas, inermes o espinosos que se desarrollan en llanuras, bajadas y pies de montes. En este tipo de matorrales se distinguen por la presencia de suelos secos y secos semicálidos, precipitaciones escasas menores a 400 mm anuales, con largos periodos de insolación intensa.

Las especies características del Matorral Desértico Micrófilo son: *Acacia sp*, *Opuntia sp*, *Prosopis sp*, *Larrea sp*, *Flourensia sp*, *Erioneuron sp*, *Lippia sp*, *Koeberlinia spinosa*; las herbáceas *Hilaria mutica* y *Atriplex sp* y los pastos *Erioneuron pulchellum* y *Bouteloua sp* (Ithaca Environmental, 2016).



Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Figura IV.4. Uso de suelo y vegetación en el predio de proyecto

Flora

Dentro de la zona de proyecto se registraron 75 especies pertenecientes a 62 géneros y 26 familias, entre las que destacaron la *Compositae*, *Poaceae*, *Leguminosae* y *Cactaceae*. En las áreas con vegetación de Matorral Desértico Micrófilo se observaron dos especies bajo protección (*Coryphantha ramillosa* y *Echinomastus warnockii*) y una endémica (*Coryphantha compacta*), catalogadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Ithaca Environmental, 2016).

A continuación, se mencionan algunas de las especies de flora de las familias más representativas identificadas en el predio de proyecto (tabla IV.1).

Tabla IV.1. Familias y especies de flora más representativos en la zona de proyecto

| Familia | Nombre científico | Nombre común |
|-------------|--|---|
| Leguminosae | <i>Acacia constricta</i> Benth., 1852 | Chaparro prieto |
| | <i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd. | Huizache |
| | <i>Acacia neovernicosa</i> Isely | Huizache, espinillo blanco |
| | <i>Medicago sativa</i> L., 1753 | Alfalfa |
| | <i>Painteria elachistophylla</i> (A. Gray ex S. Watson) Britton & Rose, 1928 | Ebanillo |
| | <i>Phaseolus ritensis</i> M.E.Jones | Frijolillo, cocolmeca |
| | <i>Pithecellobium dulce</i> Mart. 1837 | Guamúchil |
| | <i>Prosopis glandulosa</i> Torr. | Mezquite dulce |
| | <i>Senna multiglandulosa</i> (Jacq.) H. S. Irwin & Barneby. | Retama, mutuy, chanchayllo, chinllay, pacte, motuy, tanquis, alcaparra o huashlla |
| Compositae | <i>Adenophyllum porophyllum</i> (Cav.) Hemsl., 1881 | Cimpasúchil |
| | <i>Ambrosia acanthicarpa</i> Hook., 1834 | Estafiate, altamisa, ajeno del país, amargosa, artemisa, artemisia, Santa María |
| | <i>Ambrosia psilostachya</i> DC. | Artemisa |
| | <i>Artemisia ludoviciana</i> Nutt. | Estafiate, hierba maestra |
| | <i>Baccharis sarothroides</i> Gray | Romerillo |
| | <i>Bahia dissecta</i> (A. Gray) Britton, 1889 | ND |
| | <i>Baileya multiradiata</i> (Harv.) A. Gray ex Torr., 1848 | Hierba amarilla |
| | <i>Brickellia eupatorioides</i> (L.) Shinnars, 1971 | ND |
| | <i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist, 1943 | Pegajosa, cola de caballo, mantecosa |
| | <i>Flourensia cernua</i> D.C. | Hojasén, Hoja ancha |
| | <i>Laennecia coulteri</i> (A. Gray) G.L. Nesom, 1990 | Rastrojera |
| | <i>Parthenium hysterophorus</i> L., 1753 | Falsa altamisa |

| Familia | Nombre científico | Nombre común |
|---------|--|--------------------|
| | Parthenium incanum Kunth | Mariola |
| | Xanthium strumarium L., 1753 | Cadillo |
| Poaceae | Aristida adscensionis L. | Zacate tres barbas |
| | Bouteloua aristidoides (Kunth) Grisebach (Needle Grama) | Zacate |
| | Bouteloua eriopoda (Torr.) Torr. | Navajita negra |
| | Bouteloua gracilis (Willd. ex Kunth) Lag. ex Griffiths | Navajita azul |
| | Bouteloua ramosa Scribn. ex Vasey | Zacate |
| | Bouteloua rigidiseta (Steud.) Hitchc. | Zacate |
| | Dasyochloa pulchella (Kunth) Willd. Ex Rydb. | Zacate borregero |
| | Eragrostis obtusiflora (Fourn.) Scribn. | Zacate jihuite |
| | Leptochloa filiformis (L.) Beauv. | Zacate liendrilla |
| | Setaria verticillata (L.) Beauv. | Zacate pegarropa |
| | Zea mays L. | Maíz |

Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Fauna

Con el fin de identificar los posibles impactos que pudieran sufrir los ecosistemas de la región en la que se construirá la central solar fotovoltaica, se llevaron a cabo una serie de estudios para identificar aquellas especies de fauna susceptibles a estos impactos. Los registros obtenidos indican que existen diferentes tipos de mamíferos, anfibios, reptiles y aves en la zona, sin embargo, no existe ningún riesgo potencial para ellos. Las especies identificadas en el polígono de proyecto se mencionan a continuación:

- **8 especies de lagartijas y 4 especies de serpientes** del orden Squamata. 3 especies de estos reptiles se encuentran incluidas en las categorías de *especies amenazadas (A) o bajo protección especial (PR)* de la NOM-059-SEMARNAT-2010.

- **Una especie de anfibio:** *Bufo Anaxyrus*.
- **Aves.** Con base en los estudios realizados en la zona de estudio, se encontró que algunas de las especies de aves identificadas pertenecen a la AICA (Área de Importancia para la Conservación de las Aves) No. 46 “Sierra del Nido”. Esta AICA cuenta con 10 especies de aves registradas (Ithaca Environmental, 2016). De igual manera, el polígono del proyecto se encuentra dentro de la ruta migratoria del centro de México, la cual es transitada por aves migratorias provenientes de Estados Unidos y Canadá.

En el área de proyecto se registraron 329 aves pertenecientes a 15 familias y 20 especies. Ninguna ave se encuentra bajo el cuidado especial de algún tratado internacional o nacional, a excepción del mochuelo de madriguera el cual se encuentra bajo el régimen de protección de la NOM 059 de SEMARNAT. Algunas de las aves identificadas fueron: gavilán rastrero (*Circus cyaneus*), zopilote aura (*catharthes aura*), paloma huilota (*zenaida macroura*), correcaminos norteño (*geococcyx californianus*), gallos (*gallus gallus*), gorrión cola blanca (*poocetes gramineus*), cuervo común (*corvus corax*), zanate mexicano (*quisqualus mexicanus*), golondrina tijereta (*hirundo rustica*), picogordo azul (*passerina caerulea*), entre otras. Ver figura IV.5.



Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Figura IV.5. Especies de aves observadas en la zona de proyecto

Mamíferos. Se identificaron 10 especies de mamíferos en el área; ninguna de estas especies se encuentra bajo algún régimen de protección. Los mamíferos observados son: el venado bura, pecarí de collar (esquina inferior derecha de la figura IV.6), coyote (esquina superior derecha de la figura IV.6), la zorra gris, la liebre de cola negra (esquina superior izquierda), el conejo castellano, la rata canguro bandera, la ardilla moteada (esquina inferior izquierda), la rata magueyera y el ratón de abazones. Ver figura IV.6



Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Figura IV.6. Mamíferos observados en el área

IV.1.5 Medio socioeconómico

Población

El área del proyecto se encuentra ubicada en el municipio de Ahumada del estado de Chihuahua. El municipio de ahumada tiene una superficie de 17,131 km², siendo el de mayor extensión en el estado. En el 2015, se registró una población aproximada

de 12, 568 habitantes, la cual se encuentra, mayoritariamente, concentrada en la cabecera municipal.

De acuerdo al Informe de pobreza y rezago social del CONEVAL (CONEVAL, 2010), en el municipio de Ahumada hay 3,115 hogares y viviendas privadas habitadas, de éstas 659 están encabezadas por jefas de familia.

Las mujeres, las personas de la tercera edad y los jóvenes son los grupos más vulnerables dentro del municipio. Las mujeres no tienen una participación relevante dentro del mercado laboral y las cantidades remuneradas son muy bajas; por su parte, los jóvenes y las personas de la tercera no cuentan con oportunidad laborales.

Economía

El municipio de Ahumada pertenece a la Región 02 (Juárez) del estado de Chihuahua, la cual también comprende los municipios de Juárez, Guadalupe, Distrito Bravo, Práxedes G. Guerrero y Ahumada (Ver figura IV.7). Esta región abarca una superficie de 2.89 millones de hectáreas, destacando el uso pecuario con 80% y el uso agrícola con sólo un 3% de la superficie.

El 88.9% de la superficie establecida para la producción agrícola es bajo la modalidad de riego. La superficie sembrada en la región es de 39,204 hectáreas. El municipio de Ahumada comprende el 5.6% de la superficie sembrada en Chihuahua.

Los principales productos cultivados en los municipios de la Región 02 son trigo, algodón, alfalfa, frijol, maíz, sorgo, chile verde. El algodón es el producto con mayor producción y el que mayor valor económico aporta al sector agropecuario (con un valor de producción de, aproximadamente, 770 millones de pesos) (Secretaría deDesarrollo Rural , 2010). Es importante mencionar que el municipio de Ahumada produce el 37.9% de trigo, el 22.6% del sorgo de grano y el 21.4% de frijol en Chihuahua.

La producción de carne en esta región es de aproximadamente 4,555 toneladas. La explotación del ganado bovino en la región es la más importante ya que cuentan con una producción de 8,522 toneladas, en cuanto a la producción de leche bovina la producción anual es de 56.3 millones de litros (Secretaría deDesarrollo Rural , 2010).

El municipio de Ahumada no contribuye de manera significativa con la actividad ganadera de la región ni en la del Estado: la producción ganadera en Ahumada es muy baja, representa el 2.5% de producción de carne bovina, el 3.5% de carne porcina, el 3.4% de carne de origen ovino y el 2.7% de leche bovina de la producción total de Chihuahua (Ithaca Environmental, 2016).

Por otra parte, el sector secundario en el municipio de Ahumada se encuentra todavía en desarrollo ya que no existen industrias ni fábricas instaladas en la región, por lo que los pobladores tienen que desplazarse a otros municipios del Estado, Ciudad Juárez, por ejemplo, en los que sí se realizan actividades industriales.

La gran mayoría de la población de Ahumada se desarrolla en el sector terciario, el sector de los servicios. Las actividades características de este sector en la región son la venta de productos gastronómicos locales, comercio en tiendas de autoservicio, abarrotes y otros negocios pequeños ubicados, principalmente, en la cabecera municipal (Ithaca Environmental, 2016).

De acuerdo con los estudios realizados por el Consejo Nacional de Evaluación de Política de Desarrollo Social (CONEVAL) en el 2010 (CONEVAL, 2010), 5,753 individuos (44.1% del total de la población) se encontraban en pobreza, de los cuales 5,314 (40.8%) presentaban pobreza moderada y 440 (3.4%) estaban en pobreza extrema, el 16.5 % (2,155 personas) de la población presentó carencias por acceso a la alimentación. El Índice de Desarrollo Humano (IDH) de Ahumada es mejor que el de otros municipios del país, ya que se ubica en la posición 772 de 2,456 municipios, sin embargo, su nivel se encuentra por debajo del promedio estatal y nacional. El municipio experimenta rezagos en el eje salud más en el eje ingresos presenta las mayores fortalezas (Ithaca Environmental, 2016).



Fuente: Gobierno del Estado de Chihuahua, 2017.

Figura IV.7. Regionalización del Estado de Chihuahua

Educación

De acuerdo con datos del CONEVAL (CONEVAL, 2010), los aspectos más importantes de la educación en el municipio de Ahumada pueden resumirse en los siguientes puntos:

- El grado de escolaridad de personas de 15 años o más es de 7 frente al 8.8 grado promedio de la entidad.
- El porcentaje de población de 15 años o más con educación básica incompleta fue de 61.4% del total de población en el municipio.

- El 3.7% de la población de 15 años o más es analfabeta

El sector de la población con mayor rezago educativo es el de los adultos mayores (55 años o más) quienes tienen tasas de analfabetismo superiores a las del estado, pero inferiores a las nacionales (Ithaca Environmental, 2016). En el 2010, el municipio contaba con 14 escuelas preescolares, 17 primarias y seis secundarias, además de un bachillerato.

Salud y servicios públicos

En cuanto a los servicios de salud, aproximadamente el 90% de los pobladores de Ahumada cuenta con algún servicio de salud, de este porcentaje, el 5% utiliza servicios médicos privados. El municipio cuenta con cuatro unidades médicas, el 0.7% del total de unidades médicas del estado: dos unidades del IMSS, una del ISSTE y otra más de la Secretaría de Salud. En el 2010, el personal médico era de 14 personas (0.2 % del total de médicos en la entidad) y la razón de médicos por unidad médica fue de 3.5, frente al 10.9 en todo el estado (CONEVAL, 2010).

El municipio cuenta con buen servicio de agua y electricidad, sin embargo, una proporción significativa de la población sigue utilizando fosas sépticas para el desalojo de residuos.

El presupuesto del municipio de Ahumada es bajo y con una recaudación muy baja de sus ingresos totales por lo que depende de los recursos y aportaciones del gobierno federal.

Cultura

Los atractivos culturales en la región son la Iglesia de San Fernando del Carrizal y el Museo de Villa Ahumada. El patrimonio cultural intangible de mayor relevancia son las Fiestas Patronales de Santa María Magdalena.

Los usos y costumbres del municipio de Ahumada se encuentran arraigados, principalmente, en las comunidades rurales, pese a ser considerada como una pequeña ciudad.

IV.2 Descripción general del proyecto

IV.2.1 Ubicación

El proyecto, como ya se ha mencionado, consiste en la construcción de una central eléctrica solar fotovoltaica en el estado de Chihuahua, en un predio de 525 hectáreas cercano a la subestación Moctezuma, de las cuales, 445 serán destinadas al desarrollo del proyecto y 80 a conservación. El proyecto tiene por objetivo la generación de electricidad a partir de la energía solar e inyectarla al Sistema Eléctrico Nacional.

El proyecto estará ubicado en el municipio de Ahumada, a seis kilómetros de la comunidad de Moctezuma y al costado oeste de la carretera federal 45 (entre Chihuahua y Ciudad Juárez), tendrá una capacidad instalada de 150 MW nominal. El proyecto se desarrollará en diferentes etapas, en las cuales se desarrollarán actividades específicas, a saber: la etapa de preparación del sitio (PDS), la construcción de la obra civil (OC) y la etapa de operación y mantenimiento, las dos últimas tendrán una duración cercana a los 18 meses.

En el presenta apartado, se expondrán las razones por las cuales se eligió el sitio en el que se ejecutará el proyecto así como sus características principales según la Manifestación de Impacto Ambiental.

IV.2.2 Justificación del proyecto

Para la lección del sitio en el cual se ejecutará el proyecto, se consideraron diversos factores con el fin de facilitar el ingreso al sitio y los trabajos de construcción, contar con las condiciones ideales para el buen funcionamiento de la central y reducir los daños potenciales en el medio natural. Entre las condiciones que fueron evaluadas para la elección del sitio se pueden enumerar las siguientes:

- **Niveles de radiación solar.** De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER), el municipio de Vila Ahumada cuenta con niveles de radiación cercanos a los 6000Wh/m²/día y escasa nubosidad (Ithaca Environmental, 2016), lo que

demuestra el alto potencial para el aprovechamiento de la energía solar en el sitio y, por ende, para el desarrollo de proyectos de energía solar.

- **Factores técnicos.** Dentro de este tipo de factores se consideraron los siguientes:
 - El predio se encuentra en una zona alejada de centros de población y de posibles obstáculos que pudieran provocar sombras en los generadores por lo que se reducen las posibilidades de no aprovechar en su totalidad el recurso solar.
 - La cercanía con la subestación Moctezuma facilita la interconexión con el Sistema Eléctrico Nacional y reduce las pérdidas de energía por transmisión.
 - El acceso al sitio es relativamente sencillo ya que el proyecto se ubicará cerca de la carretera federal 45 Chihuahua-Juárez, como puede observarse en la figura IV.1.
- **Cercanía con la cabecera municipal de Ahumada.** Una ventaja muy importante para los desarrolladores del proyecto es que la cabecera del municipio de Ahumada se encuentra a una distancia de aproximadamente 50 km, lo que facilitará la contratación de mano de obra local y de otro tipo de servicios que sean requeridos durante las distintas etapas.
- **Uso de suelo actual.** El predio no cuenta con vegetación que sea considerada de gran importancia; en el sitio predomina el uso de suelo *matorral desértico micrófilo* y los pastizales halófilos e inducidos. 366 hectáreas, de las 525 que comprende la central, poseen vegetación forestal y 159 no cuentan con vegetación.

IV.2.3 Características técnicas del proyecto

La central eléctrica solar fotovoltaica tendrá una capacidad instalada de generación de 150 MW nominal, para dicha generación serán necesarios los siguientes componentes:

- 574, 560 módulos policristalinos de 320Wp.
- Sistema de recolección en 1kVc o 1.5 kV en corriente directa.
- 38 bloques de potencia con 4 inversores cada uno, con uno o dos transformadores de pedestal (Ver figura IV.8)
- Sistema de recolección de la central de 34.5 kV AC.
- La subestación para el proyecto tendrá un transformador de potencia conectado a la subestación Moctezuma.

Las características del equipo del que se dispondrá son:

- 4 inversores de 990 kVA o 2 inversores de 2000 kVA para cada matriz:
 - Trifásicos
 - Con frecuencia de 60 Hz.
 - Salida nominal de 990 kVA o 2000 kVA a 25 grados
 - Tensión de 350 Vac a 650 Vac aproximadamente.

IV.2.4 Etapa de preparación del sitio y construcción

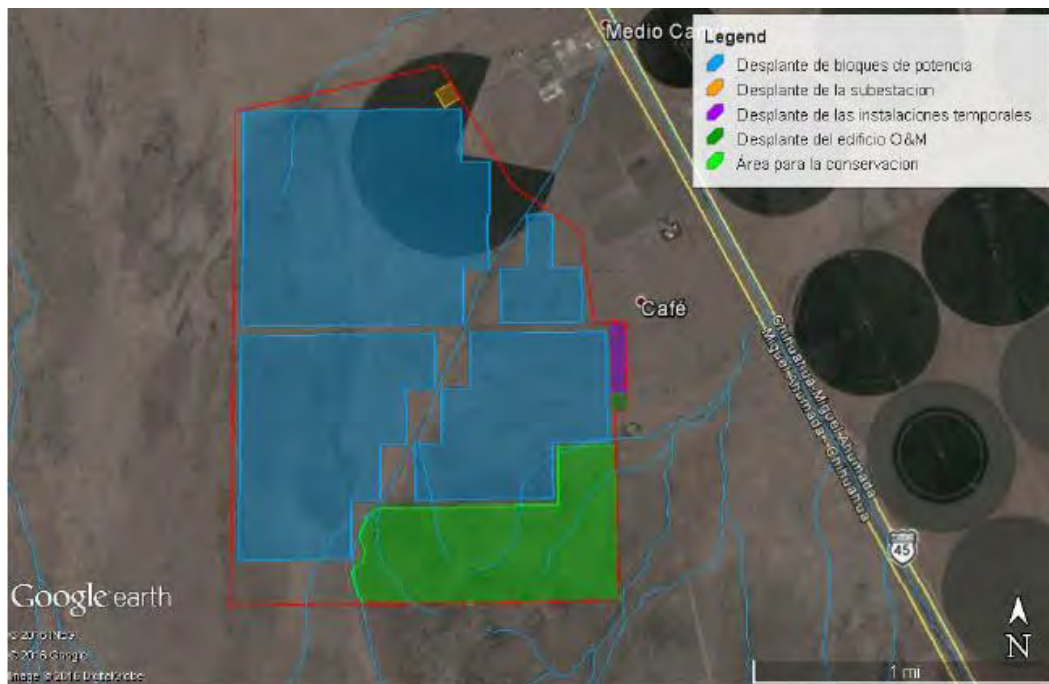
Durante la etapa de preparación del sitio se realizarán actividades de desmonte, poda y de remoción de la maleza para, posteriormente, realizar tareas de compactación del suelo. Las actividades comprendidas en esta etapa tienen por objetivo eliminar todos aquellos obstáculos que pudieran dificultar el proceso de construcción de la central y la instalación de los equipos correspondientes con base en lo señalado en el diseño del proyecto.

Sumado a las actividades ya mencionadas, se realizarán estudios de topografía, geotecnia e hidrología que sirvan de respaldo a los trámites que se realizarán para obtener los permisos de generación e interconexión con CFE, así como la aprobación de CONAGUA.

Construcción

En la etapa de construcción se llevarán a cabo obras temporales que permitan, entre otras cosas, el acopio de materiales en zonas seguras, que los trabajadores cuenten con servicios básicos mientras su estancia en la obra y el acceso a las diferentes zonas del proyecto. Asimismo, se realizará el montaje del equipo (sistema de seguimiento, generadores fotovoltaicos), de las instalaciones eléctricas y de los sistemas de seguridad.

En la figura IV.8 pueden observarse las zonas que serán destinadas para la construcción de obras temporales y otros elementos constructivos que formarán parte de la central.



Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Figura IV.8. Elementos constructivos del proyecto

Obras temporales

Las obras temporales estarán ubicadas junto al acceso principal a la zona de proyecto, y como ya se ha mencionado, facilitarán el desarrollo de los trabajos constructivos. Las obras temporales a construir se describen a continuación:

- Área de oficinas. Está área comprenderá, como su nombre los indica, oficinas, taller de trabajo, comedor y sitio de primer auxilio. La gran mayoría de estas obras consistirá en contenedores metálicos y paneles de madera.
- Área de acopio y almacenamiento. En esta área se reunirán los materiales a utilizar durante la construcción y los módulos fotovoltaicos y demás equipo a instalar.
- Zona de carga de combustible. Esta área, a diferencia de las demás, deberá realizarse considerando las normas de higiene y seguridad establecidas por la Secretaría de Trabajo y Previsión Social. Almacenará los combustibles para el abastecimiento de camiones y maquinaria a utilizar.
- Zona de acopio de residuos sólidos urbanos (RSU) y de manejo especial (RME). Además de los RSU y RME, se almacenarán otro tipo de residuos generados durante la construcción como fierro, madera, empaques y cartón.

Además de las obras anteriores, se dispondrá de una zona de baños para hombres y mujeres.

Instalación y montaje de equipos

Sistema de seguimiento y módulos fotovoltaicos

Como se explicó en el Capítulo II del presente documento, los sistemas con seguimiento solar pueden disponerse de tres formas diferentes y una de ellas consiste en orientar los generadores solares adecuadamente y las estructuras de seguimiento se encargan de modificar el ángulo de inclinación para el máximo aprovechamiento de la energía solar, este es el caso del sistema de seguimiento de la

central eléctrica solar fotovoltaica en cuestión. Un ejemplo de un sistema de seguimiento solar montado puede observarse en la figura IV.9.

El montaje del seguidor se realizará sobre las fundaciones para estructuras metálica previamente construidas, las cuales tienen una cimentación a base de picas hincadas directamente en el suelo. El montaje se realizará en cuatro etapas:

1. Colocación de soportes y vigas de torsión.
2. Actuador electromecánico
3. Conjuntos biela
4. Colocación de los módulos fotovoltaicos

La puesta a tierra de estos sistemas de seguimiento se hará a través de cables de cobre unidos a picas ancladas al terreno dentro de toda la central.



Fuente: (oEnergy, 2015)

Figura IV.9. Generadores fotovoltaicos con sistema de seguimiento solar

Para la colocación del cableado subterráneo, necesario para la conexión de los equipos en la central, se requerirá la construcción de zanjas para su canalización.

Instalaciones eléctricas

La instalación eléctrica de la central considera dos tipos de instalación: la instalación de corriente en baja tensión, la cual incluye la instalación de corriente continua en baja tensión (DC) y la instalación de corriente alterna en baja tensión (AC), y la instalación eléctrica en media tensión, las cuales se realizarán de acuerdo con las especificaciones técnicas que se indiquen en cada caso y con las funciones que deberán cumplir.

La instalación de corriente continua en baja tensión consiste en la agrupación de los módulos fotovoltaicos (strings) y en su interconexión para sumar eléctricamente sus tensiones. Los módulos fotovoltaicos se interconectan a través de cajas de agrupación de *strings* (SCB), las cuales contienen todos los elementos necesarios para la interconexión y los protegen de la intemperie. Por su parte, la instalación de corriente alterna en baja tensión se realiza con el fin de proporcionar electricidad a los seguidores solares.

La instalación eléctrica en media tensión consiste en formar los centros de inversión-transformación del central (IC) y en la agrupación de los transformadores. Los CI de la central (uno en cada uno de los 38 bloques de potencia) estarán formados por los inversores, los transformadores, el transformador de servicios auxiliares, las celdas MT, un armario de monitorización y unidades de refrigeración.

Sistemas de seguridad y monitorización

Para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento en la central se instalará una valla perimetral, un sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) y un sistema de seguridad compuesto por videocámaras y barreras de infrarrojos.

El SCADA permitirá supervisar el funcionamiento y los procesos que se lleven a cabo en los centros de inversión-transformación, por lo cual se deberá instalar una red

física de comunicaciones que recoja los datos de las cajas de agrupación de *strings* y de los inversores.

Línea de transmisión

La energía producida en la central será conducida a la subestación de CFE por medio de una línea de transmisión de aproximadamente un kilómetro. Para realizar esta conexión se llevarán a cabo trabajos topográficos y las cimentaciones de los apoyos.

Materiales y maquinaria a utilizar durante la construcción

Para poder realizar las labores de construcción de la central se dispondrá de los materiales y máquinas que se listan a continuación:

- **Maquinaria:** Bus-Minibús, grúas, telescópica, motoniveladora, vibrocompactador, tractocompactador, retroexcavadora, cargador frontal, máquina de hincado y camiones hormigueros, camiones tolva, camiones cisterna y camionetas.
- **Materiales:** Hormigón, material de relleno, módulos fotovoltaicos, seguidores y cableado.

IV.2.5 Operación y Mantenimiento

Operación

En el capítulo II, se describió a detalle el funcionamiento de los componentes principales de una central eléctrica solar fotovoltaica y el rol que cumplían dentro de ella, por lo que, en este apartado, se describirá de manera general cómo operará la central. La energía producida por los paneles solares (corriente continua en baja tensión) es transformada, en energía alterna, por medio de un inversor, el cual, a su vez, está conectado a un transformador que eleva el voltaje. Finalmente, en la subestación de maniobras se elevará la energía a alta tensión para ser conducida a la subestación de CFE.

El funcionamiento de las centrales eléctricas solares fotovoltaicas puede observarse en la figura IV.10. De forma esquemática se muestran los elementos clave de las centrales fotovoltaicas y cómo operan.

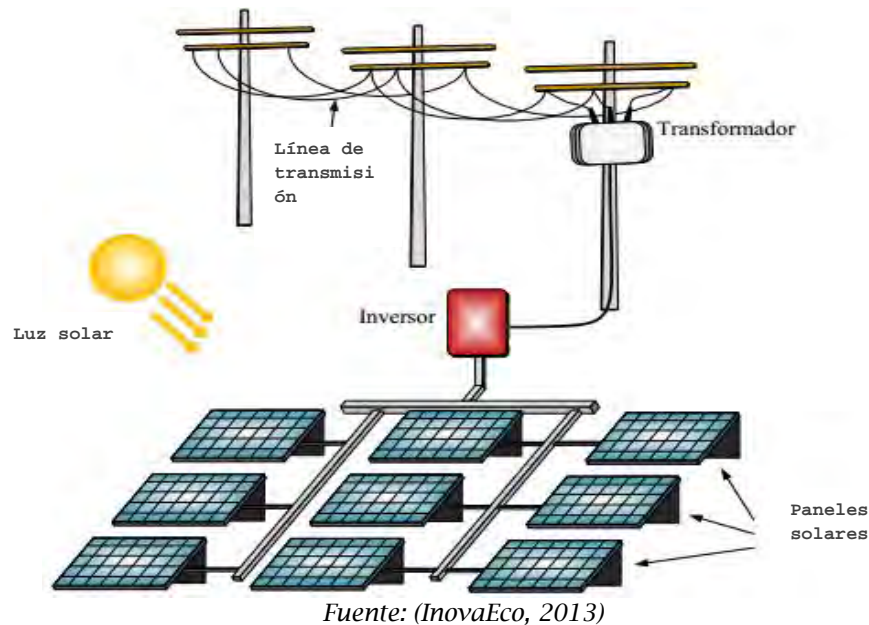


Figura IV.10. Esquema básico del funcionamiento de la central eléctrica solar fotovoltaica

Mantenimiento

Para asegurar la correcta operación de la central a lo largo de su vida útil se realizarán trabajos de mantenimiento correctivo, preventivo y en la infraestructura.

El mantenimiento preventivo incluye actividades relacionadas con la limpieza de equipos, instalaciones, paneles y lubricación de los seguidores solares, además de la verificación de su funcionamiento.

El mantenimiento correctivo tiene por objetivo la reparación, incluso sustitución de equipo dañado o que presente fallas durante el proceso operativo. Las actividades que se incluyen dentro de este tipo de mantenimiento son: la reparación de averías en inversores, celdas de media tensión, cableado y transformadores de potencia y la reparación en cuadros de protecciones de corriente continua y corriente alterna.

El mantenimiento en infraestructura se realizará para mantener activos los accesos al proyecto y la red de caminos internos.

IV.2.6 Abandono de las instalaciones

El proyecto tiene una vida útil de 25 años, una vez cumplido este periodo de tiempo de procederá al desmantelamiento de la central.

La etapa de abandono consistirá en el desmantelamiento de las instalaciones, la desconexión del equipo eléctrico de la central y en el desarme de los paneles solares.

IV.2.7 Disposición de los residuos sólidos y líquidos generados durante el proyecto

Los residuos no peligrosos, como madera y fierro, generados durante la construcción de la central se dispondrán en zonas cercadas. Los residuos sólidos serán colocados, de manera temporal en bolsas de plástico dentro de contenedores que, al igual que las aguas residuales generadas, serán tratados por empresas especializadas.

En el caso de los residuos sólidos peligrosos, producto de las actividades de limpieza y mantenimiento del equipo e instalaciones de la central, serán almacenados en una bodega especial que contará con los requerimientos necesarios para garantizar la seguridad en la zona de proyecto.

IV.2.8 Identificación de impactos potenciales del proyecto

Los impactos derivados de la construcción del proyecto están relacionados con la afectación del suelo y la vegetación arbustiva y arbórea principalmente. De acuerdo con la Manifestación de Impacto Ambiental (Ithaca Environmental, 2016), los impactos identificados en la zona de proyecto son los siguientes:

- 1) Desplazamiento de fauna local.
- 2) Fragmentación del hábitat.
- 3) Pérdida de vegetación
- 4) Modificación del paisaje.

- 5) Modificación del relieve.
- 6) Deterioro de la calidad del aire y emisiones GEI.
- 7) Generación de residuos sólidos.
- 8) Generación de aguas residuales domésticas.
- 9) Alteración de las propiedades del suelo.
- 10) Alteración de la calidad y cantidad de los recursos hídricos.
- 11) Emisión de ruido.

Estos impactos se presentan en las diferentes etapas de desarrollo de la central eléctrica solar y a las actividades específicas que se realicen en cada una de ellas. En la tabla IV.2 se mencionan los impactos asociados a cada etapa y a sus actividades específicas.

Tabla IV.2. Impactos asociados a las etapas y actividades del proyecto

| Etapa del proyecto | Actividades | Impactos relacionados |
|-----------------------|---|--|
| Preparación del sitio | <ul style="list-style-type: none"> • Presencia de personal • Desmonte y despalme • Excavación y nivelación del terreno | <ul style="list-style-type: none"> • Generación de aguas residuales domésticas. • Alteración de la calidad y cantidad del recurso hídrico. • Generación de residuos sólidos. • Alteración de las propiedades del suelo. • Desplazamiento de fauna local. • Pérdida de vegetación. • Pérdida irreversible del suelo. • Deterioro de la calidad del suelo y emisiones GEI. |

| Etapa del proyecto | Actividades | Impactos relacionados |
|----------------------------------|--|---|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Emisión de ruido. • Modificación del paisaje. |
| Obra civil | <ul style="list-style-type: none"> • Presencia de personal. • Caminos, cerca perimetral, cimentaciones y estructuras de soporte. • Instalaciones e interconexión. | <ul style="list-style-type: none"> • Generación de aguas residuales domésticas. • Generación de residuos sólidos. • Deterioro de la calidad del aire y generación de GEI. • Emisión de ruido • Desplazamiento de fauna local. • Alteración de las propiedades del suelo. • Modificación del paisaje. |
| Operación y mantenimiento | <ul style="list-style-type: none"> • Presencia de personal. • Limpieza de los paneles. | <ul style="list-style-type: none"> • Generación de aguas residuales domésticas. • Generación de residuos sólidos. • Consumo de agua. |
| Abandono del sitio | <ul style="list-style-type: none"> • Desmantelamiento de instalaciones. | <ul style="list-style-type: none"> • Deterioro de la calidad del aire y generación de GEI. • Generación de residuos sólidos. • Generación de aguas residuales domésticas. • Alteración de la calidad y cantidad del recurso hídrico. |

Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Como puede observarse en la tabla anterior, la mayoría de los impactos se presenta en las etapas de preparación del sitio y construcción de la obra civil. Asimismo, los impactos sobre la vegetación, el hábitat y el paisaje son los de mayor significancia, sin embargo, con las medidas de mitigación que se han definido se espera que estos efectos sean mínimos.

Los impactos estimados sobre los diferentes componentes del medio en el cual se ejecutará el proyecto, como la vegetación, fauna, recursos hídricos, hábitat, suelo y aire se resumen en la tabla IV.3.

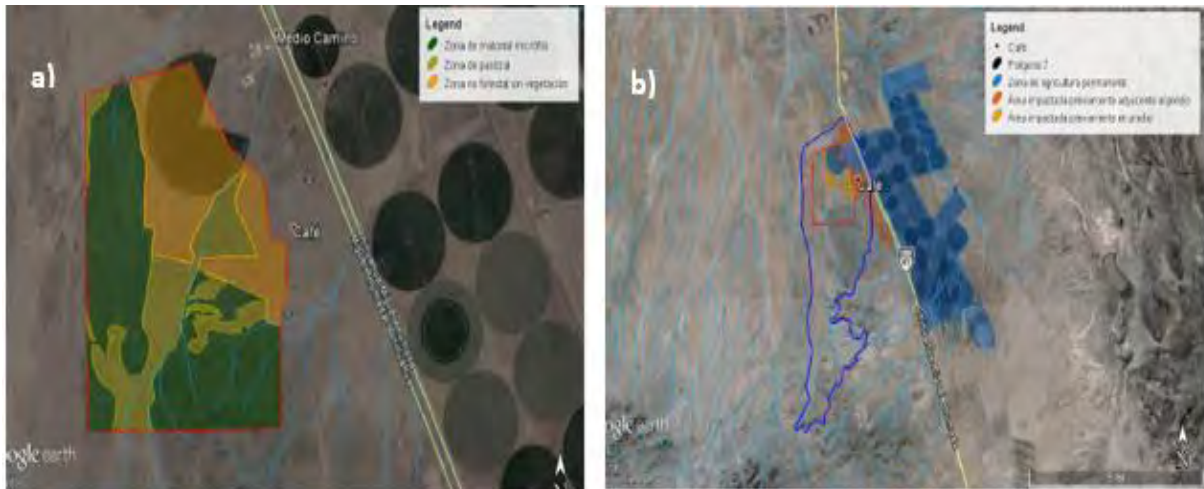
Tabla IV.3. Impactos identificados en del proyecto

| Componente | Impactos | Descripción |
|-------------------|--|--|
| Vegetación | <ul style="list-style-type: none">• Pérdida de vegetación | <p>El proyecto considera la conservación de 80 hectáreas de matorral desértico micrófilo por lo que sólo serán impactadas 286 hectáreas (54% del total del predio). La distribución de la vegetación dentro del predio puede observarse en la figura IV.11.</p> <p>El principal impacto se producirá debido la remoción de los arbustos de matorral desértico micrófilo. Se ha estimado que la pérdida de vegetación sea crítica en 176 hectáreas de matorral desértico, correspondientes a 34% de la superficie del predio.</p> |
| Fauna | <ul style="list-style-type: none">• Desplazamiento de especies | <p>El desplazamiento de la fauna local es consecuencia de la pérdida de vegetación y disminución de recursos, resultado de las actividades de la etapa de preparación del sitio. Especies de mamíferos como el venado y el pecaí tendrán que desplazarse de forma temporal a sitios cercanos.</p> |

| Componente | Impactos | Descripción |
|------------|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> Fragmentación del hábitat | <p>El desarrollo del Proyecto exigirá la desaparición de cultivos de alfalfa y maíz, lo que provocará el desplazamiento de las especies que basan su alimentación en ellos. Cabe mencionar, que las actividades de agricultura y ganadería que se han llevado a cabo en el predio ya han impactado 159 hectáreas del hábitat natural, esta zona puede observarse en la figura IV.12.</p> |
| Aire | <ul style="list-style-type: none"> Deterioro de la calidad del aire y generación de GEI. | <p>La contaminación del aire por emisiones GEI está asociada a la actividad de maquinaria utilizada en las etapas de preparación del sitio, construcción de obra civil y abandono del sitio.</p> |
| | <ul style="list-style-type: none"> Emisión de ruido | <p>El impacto por emisión de ruido es mínimo ya que la probabilidad de que más de dos equipos o maquinaria se encuentren operando al mismo tiempo en el mismo lugar es baja, además, el ruido sólo impactará al personal de la obra pues no existen comunidades y poblaciones cercanas a la zona de proyecto.</p> |
| Suelo | <ul style="list-style-type: none"> Alteración del suelo/ Pérdida irreversible | <p>La alteración de las propiedades del suelo se debe a actividades de compactación y remoción de la vegetación y uso de la maquinaria durante la preparación del sitio, construcción de la obra civil y abandono de las instalaciones. Asimismo, existe el riesgo de que sea derramado combustible al ser suministrado a las máquinas y vehículos.</p> |
| | <ul style="list-style-type: none"> Generación de residuos sólidos | <p>Los residuos sólidos urbanos serán generados por los trabajadores al satisfacer sus necesidades básicas en la</p> |

| Componente | Impactos | Descripción |
|------------|--|---|
| | urbanos | obra. |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Modificación del relieve | Las actividades de nivelación del terreno para la instalación de los paneles solares son la principal causa de modificación del relieve. El impacto provocado será mínimo ya que las actividades agrícolas y ganaderas han contribuido a la compactación del suelo, lo que disminuye la necesidad de realizar trabajos de nivelación. |
| Agua | <ul style="list-style-type: none"> • Generación de aguas residuales domésticas. | Las aguas residuales, al igual que los residuos sólidos urbanos, serán resultado de la presencia de personal en el sitio de proyecto, principalmente durante la preparación del sitio. |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Alteración de la calidad y cantidad del recurso hídrico. | La alteración de los recursos hídricos puede llegar a ocurrir en las etapas de preparación y abandono del sitio. De no tratarse adecuadamente, las aguas residuales domésticas podrían contaminar las aguas superficiales y subterráneas cercanas a la zona de proyecto, aunque la probabilidad de que esto ocurra es mínima. |
| Paisaje | <ul style="list-style-type: none"> • Modificación del paisaje | El paisaje se verá afectado por la instalación y presencia de los módulos fotovoltaicos, las subestaciones y las líneas eléctricas. La calidad visual se verá afectada principalmente por la construcción y desmantelamiento de la central. |

Fuente: Elaboración propia con datos de la Manifestación de Impacto Ambiental del proyecto (Ithaca Environmental, 2016)



Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Figura IV.11. Tipo de vegetación (a) y zonas ya fragmentadas (b) en el predio

Impactos positivos del proyecto

Pudiera parecer que los impactos que tendrá el proyecto en la región de Villa Ahumada serán sólo negativos, si se consideran los mencionados anteriormente, sin embargo, los beneficios que se asocian a la construcción y puesta en marcha de este tipo de proyectos van desde la mitigación del cambio climático hasta la promoción del desarrollo económico en comunidades rurales.

El proyecto de construcción de una central eléctrica solar fotovoltaica en Villa Ahumada no sólo contribuirá con la mitigación del cambio climático e impulsará la sustentabilidad en Chihuahua, sino que, además, generará empleos temporales y permanentes en la región.

Dentro de los impactos positivos del proyecto pueden encontrarse los siguientes:

- ✓ Mitigación del cambio climático y promoción de la sustentabilidad.
- ✓ A diferencia de las centrales termoeléctricas que requieren de agua para su operación, las centrales solares no requieren de otros recursos naturales, lo que reduce las afectaciones ambientales y los costos de inversión.

- ✓ Aprovechamiento de terrenos deteriorados.
- ✓ Disminución de la dependencia a los combustibles fósiles para la generación de electricidad y, por ende, de las emisiones GEI.
- ✓ Ventajas técnicas. La construcción y mantenimiento de la central solar es relativamente sencilla ya que los equipos no exigen condiciones especiales para su funcionamiento y su instalación no presenta dificultad alguna.
- ✓ Creación de empleos. Se estima que el proyecto genere 320 empleos temporales y 15 permanentes.

El impacto ambiental a largo plazo es menor a pesar de los impactos en la vegetación y en el suelo ya que se aprovechará un terreno que ya está deteriorado.

IV.3 Mitigación de los impactos del proyecto

Considerando los impactos potenciales del proyecto y la normatividad ambiental municipal, estatal y federal, se definieron una serie de medidas de mitigación y prevención, por medio de las cuales se busca reducir los daños ambientales y sociales que pudiera producir la construcción y operación de la central.

Con base en los impactos identificados en cada etapa del proyecto, en la Manifestación de Impacto Ambiental (Ithaca Environmental, 2016) se describen las medidas de mitigación para cada uno de ellos, así como los programas ambientales en los que éstas se consolidarán. Los programas ambientales que serán implementados a lo largo del proyecto son 14 y están enfocados en la conservación y preservación de algunas especies de flora y vegetación, monitoreo y protección de fauna local, mantenimiento de equipos, maquinaria y obras temporales, capacitación de personal, así como la prevención de ciertos eventos como incendios.

Algunas de las medidas de mitigación para cada impacto identificado contempladas en los programas ambientales se describen en la tabla IV.4.

Tabla IV.4. Medidas de mitigación del proyecto

| Impacto | Medidas de mitigación |
|--|--|
| Pérdida de vegetación y erosión del suelo | <ul style="list-style-type: none"> • Recuperación de las superficies de pastizal halófilo dentro de las áreas de desplante. • Protección de 80 hectáreas de la vegetación. • Manejo de los pastizales halófilos para el control de la erosión. • La composta de los residuos vegetales se esparcirá en las áreas de conservación. |
| Fragmentación del hábitat/Desplazamiento de fauna | <ul style="list-style-type: none"> • Reubicación y ahuyentamiento de algunas especies de fauna silvestre, específicamente de la víbora de cascabel y la lechuza llanera. • Establecimiento de una cerca perimetral con espacios pequeños para permitir el tránsito de mamíferos pequeños. |
| Deterioro de la calidad del aire | <ul style="list-style-type: none"> • Serán aplicados los programas de mantenimiento preventivo y correctivo en la maquinaria y vehículos utilizados. • Empleo de agua tratada para contener el polvo que se genere en las obras de excavación y nivelación. • Se determinarán las rutas para el transporte de materiales y material residual considerando distancias y tiempos. |
| Emisión de ruido | <ul style="list-style-type: none"> • Se mantendrán bajos los niveles de ruido aplicando los programas de mantenimiento preventivo en maquinaria y vehículos pesados. |
| Pérdida del suelo superficial | <ul style="list-style-type: none"> • El suelo de buena calidad será esparcido en las áreas de conservación. |
| Contaminación de agua y del suelo | <ul style="list-style-type: none"> • Se contará con un plan de manejo de residuos que abarque la generación, almacenamiento y disposición final de los mismos. • Estará prohibido realizar acciones de mantenimiento sobre terracerías, en caso de hacerlo, el suelo será cubierto con material impermeable |

| Impacto | Medidas de mitigación |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Los residuos peligrosos serán depositados en un recipiente hermético etiquetado y entregado a las autoridades ambientales correspondientes. |
| Compactación del suelo | <ul style="list-style-type: none"> • Se contará con la máquina necesaria para revertir la compactación del suelo causada por las actividades de construcción del proyecto. |
| Generación de aguas residuales domésticas | <ul style="list-style-type: none"> • Los baños químicos utilizados por el personal durante el proceso de construcción, estarán bajo un estricto plan de mantenimiento y limpieza. |
| Generación de residuos | <ul style="list-style-type: none"> • Se implementará un plan de manejo de residuos sólidos urbanos, peligrosos y de manejo especial. • Se establecerán obras temporales de almacenamiento, las cuales estarán clasificadas de acuerdo al tipo de residuo. • Se realizará una separación básica de los residuos orgánicos. • Los contenedores en los que se depositen los residuos serán herméticos y contarán con las dimensiones adecuadas. • Los residuos peligrosos y de manejo especial serán manejados por empresas autorizadas. |
| Deterioro del paisaje | <ul style="list-style-type: none"> • Se llevará a cabo una disposición ordenada de obras temporales como bodegas, oficinas, estacionamientos, zonas de almacenamiento, entre otras. • Se evitará la acumulación de materiales y residuos durante la construcción del proyecto. |
| Riesgo de provocar incendios | <ul style="list-style-type: none"> • Se establecerán corta fuegos dentro del predio para evitar algún incendio. • Se elaborará un protocolo de emergencia para la prevención y control de incendios. • El personal de la central fotovoltaica será capacitado para prevenir incendios. |

Fuente: (Ithaca Environmental, 2016)

Conclusiones y recomendaciones

- El cambio climático es una consecuencia de las actividades que exige el sistema de producción actual. Las evidencias científicas demuestran que el ser humano es el principal responsable de los impactos que sufren los ecosistemas y las sociedades, algunos de estos impactos son irreversibles, pero otros aún pueden prevenirse si es que se cuentan con las medidas de mitigación y procesos de planeación adecuados. El proceso de planeación de acciones e iniciativas para mermar los efectos del cambio climático debe ser incluyente y multidisciplinario, enfocándose en el desarrollo sostenible y en la seguridad de los grupos humanos.
- En México, el sector hídrico es uno de los más vulnerables al cambio climático por lo que debe contar con las medidas de mitigación y adaptación adecuadas que garanticen el suministro de agua en todas las regiones del país, ya que, en la actualidad, algunas comunidades no cuentan con acceso al servicio. Por otra parte, el sector energético, uno de los mayores emisores a nivel nacional, requiere de un mayor impulso para disminuir su dependencia a los combustibles fósiles.
- La Reforma Energética representa un cambio muy importante para lograr la transición energética en nuestro país y cumplir con los objetivos de reducción de emisiones, sin embargo, sigue dando mayor importancia a la producción de energía a partir de combustibles fósiles y pone de manifiesto la escasa capacidad técnica de México en el uso de nuevas tecnologías para su extracción. El uso de energías renovables pasa a un segundo plano y se le resta importancia, ignorando el alto potencial con el que contamos para su desarrollo, por lo que puede afirmarse que la Reforma Energética persigue objetivos políticos y económicos antes que ambientales.
- Los beneficios asociados a las energías renovables son diversos, entre los más importantes y conocidos se encuentran los ambientales, no obstante, la creación de empleos, la diversificación de la matriz energética y el impulso al desarrollo económico y social de las comunidades, son otros de los beneficios que justifican el auge de estas energías en varias regiones del mundo y que no puede pasar desapercibido en el país.

- El desarrollo de proyectos de energías renovables en nuestro país presenta una gran oportunidad para reducir las emisiones contaminantes provenientes del sector energético, específicamente, de las actividades relacionadas con la generación de electricidad, y para lograr el crecimiento económico. El crecimiento económico se ve favorecido por la inversión extranjera en este tipo de proyectos principalmente en los eólicos y solares.
- México cuentan con un amplio recurso solar que facilita el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos. La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como una de las más importantes en el país y su crecimiento inminente atraerá a grandes inversionistas interesados, de ahí la importancia de contar con las capacidades necesarias para su desarrollo.
- Los estudios ambientales son claves en el desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos ya que permiten conocer las características del medio en el cual serán ejecutados y evaluar los impactos potenciales para actuar en consecuencia. Para el estudio de los posibles impactos y la definición de medidas de mitigación es necesario conocer las políticas ambientales del país y de la región en las que se desarrollan los proyectos, así como el empleo de nuevas tecnologías para la identificación de riesgos y oportunidades.
- La consulta de comunidades es un aspecto que debe tomarse en cuenta antes de la ejecución de cualquier proyecto de energías renovables con el fin de conocer el modo de vida y las costumbres de los habitantes de la región en la que se llevará a cabo, con el fin de evitar problemas futuros y retrasar su construcción. Las comunidades rurales pueden ver afectado su territorio, el cual, en la mayoría de las veces, está unido a sus ideologías y tradiciones.
- La participación de la ingeniería civil para hacer frente a los impactos del cambio climático debe estar incluida en todo el proceso del desarrollo de proyectos: desde la planeación hasta la implementación de medidas de mitigación y adaptación. El sector energético presenta un campo de oportunidades para los ingenieros civiles ya sean en la integración de medidas de eficiencia energética en edificios hasta la construcción de grandes centrales eléctricas solares

fotovoltaicas, lo que no pueden considerarse como campos de conocimiento apartados y sin relación alguna.

Recomendaciones

- Llevar cabo procesos de planeación que fortalezcan la participación de entidades gubernamentales, sociedades, sector privado y de la comunidad científica y académica para crear capacidades que permitan hacer frente a los impactos del cambio climático.
- Los estudios de impacto ambiental y social de los proyectos solares fotovoltaicos, y de cualquier proyecto de energías renovables, deben realizarse de manera profesional y responsable y no sólo para cumplir con los trámites para la obtención de los permisos correspondientes.
- En el caso de los proyectos solares fotovoltaicos, hay que tomar en cuenta las facilidades técnicas y naturales de las regiones en las que se planea construir el proyecto. Hay que realizar los análisis económicos y financieros correspondientes para garantizar la viabilidad del proyecto así como, evitar en la mayor medida posible, cualquier afectación ambiental y social que pudiera obstaculizar la realización del proyecto.
- Dar difusión a las energías renovables y a los beneficios que se derivan de ellas para que la sociedad tenga un mayor conocimiento y comprenda su importancia.
- Impulsar la investigación y estudio de las energías renovables en los centros de educación profesional con el fin de desarrollar proyectos de esta naturaleza y hacer de México un referente a nivel mundial, además de fortalecer las capacidades locales.

Bibliografía

- ALLPE Medio Ambiente, 2016. *Energía solar Fotovoltaica y Medio Ambiente*. [En línea] Available at: http://www.allpe.com/seccion_detalle.php?idseccion=274 [Último acceso: junio 2017].
- Avalos Corona, L. M., 2010. *Energía Solar: Una propuesta para la generación de electricidad en el estado de Colima, México. Tesis de Especialidad*. Colima: Universidad de Colima.
- BBC, 2015. *¿Por qué se derrite el Ártico mientras aumenta el hielo de la Antártica?*. [En línea] Available at: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151109_hielo_antartica_artico_lp [Último acceso: 17 Febrero 2017].
- Bureau Veritas , 2008. *Manual para la formación en medio ambiente*. s.l.:Lex Nova.
- Carriles, L., 2017. *Conflictos sociales amenazan proyectos de energía*. [En línea] Available at: <http://eleconomista.com.mx/industrias/2017/02/19/conflictos-sociales-amenazan-proyectos-energia> [Último acceso: Junio 2017].
- CONABIO, 2014. *La biodiversidad en Chihuahua: Estudio de Estado*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONEVAL, 2010. *Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social*. s.l.:s.n.
- Fernández, J. M., 2009. *Tecnología de las Energías Renovables*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Fernández, J. M., 2010. *Compendio de Energía Solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Frankfurt School-UNEP Centre, 2016. *Global Trends in Renewable Energy Investment 2016*, s.l.: s.n.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2012. *Guía técnica de la energía Solar Termoeléctrica*. Madrid: s.n.
- Glynn Henry, J. & W.Heinke, G., 1999. *Ingeniería Ambiental*. Segunda ed. México: Prentice Hall.
- Gobierno de la República, 2014. *Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables 2014-2018*, México: s.n.
- González, F., 2004. *Las Comunidades Vegetales de México: propuesta para la unificación de la clasificación y nomenclatura de la vegetación de México*. México: Instituto Nacional de Ecología.

INECC, SEMARNAT, 2012. *México. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: s.n.

INECC, SEMARNAT, 2006. *México. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: s.n.

INEGI, 2003. *Síntesis de Información geográfica del estado de Chihuahua*. México: s.n.

IPCC, 2013. Resumen para responsables de políticas. En: T. Stocker, y otros edits. *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.

IPCC, 2014. Resumen para responsables de políticas. En: *Cambio climático 2014. Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.

Ithaca Environmental, 2016. *Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Particular*. Chihuahua: s.n.

Jutglar, L., 2004. *Energía Solar*. Barcelona: Ediciones Ceac.

Klugmann Radziemska, E., 2014. Environmental Impacts of Renewable Energy Technologies. *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering (IPCBE)*, LXIX(21), pp. 104-109.

Labouret, A. & Viloz, M., 2008. *Energía solar fotovoltaica. Manual Práctico*. Madrid: Mundi-Prensa.

Lazo, B., Castro, J., Hatch, J. & Vega, L., 2015. *Estrategia Estatal de Energía Sustentable del Estado de Yucatán*. Ciudad de México: s.n.

Méndez, J. M. & Cuervo, R., 2007. *Energía Solar Fotovoltaica*. Segunda ed. Madrid: FC Editorial.

Muciño, F., 2015. ¿Se aproxima el ‘boom’ de la energía solar?. *Forbes México*.

NASA, 2016. *Solar System Exploration*. [En línea] Available at: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/sun/facts> [Último acceso: 26 Abril 2017].

ONU, 2017. *Objetivos de Desarrollo Sostenible. 17 objetivos para mejorar nuestro mundo*. [En línea] Available at: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/> [Último acceso: 1 Abril 2017].

Presidencia de la República, 2013. *Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40*. Ciudad de México: s.n.

Presidencia de la República, 2013. *Programa Especial de Cambio Climático 2013-2018*. Ciudad de México: s.n.

PwC, 2015. *Reforma energética de México. Implicaciones y oportunidades en el sistema eléctrico nacional*. s.l.:s.n.

Ramírez López, M. P., 2009. *Causas, evidencias e impactos del cambio climático..* s.l.:s.n.

REN21, 2016. *Energías Renovables 2016. Reporte de la situación mundial*. París: s.n.

Ruiz Rincón, P., 2015. Los Pros y Contras de la Reforma Energética de acuerdo con el paradigma del Desarrollo Sustentable. *Revista Digital Universitaria*, XVI(1).

Secretaría deDesarrollo Rural , 2010. *Programa Sectorial 2010-2016*. s.l.:s.n.

SEGOB, 2014. *Ley de la Industria Eléctrica*. México: s.n.

SEMARNAT, 2009. *Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones..* México: s.n.

SEMARNAT, 2012. *Adaptación al Cambio Climático en México: Visión, elementos y criterios para la toma de decisiones..* México: s.n.

SEMARNAT, 2013. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero1990-2010*. México: s.n.

SENER, 2014. *Prospectiva de Energías Renovables 2014-2028*. México: s.n.

SENER, 2015. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2015-2029*. México: s.n.

Tejeda Martínez, A. & Gómez Azpeitia, G., 2015. *Prontuario Solar de México*. México: Enfoque Académico.

Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N. & Gekas, V., 2005. Environmental impacts from the solar energy technologies. *Elsevier*, Issue 33, pp. 289-296.

Universidad de Cambridge; World Energy Council, 2014. *Hallazgos Clave del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, s.l.: s.n.