



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
CAMPO DE CONOCIMIENTO EN ENERGÍA
CAMPO DISCIPLINARIO SOLAR FOTOVOLTAICA

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UNA PLANTA SOLAR
FOTOVOLTAICA EN MÉXICO**

TESIS:

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. ELISA MARTÍNEZ GÓMEZ

Director de tesis:

Dr. Edgar Santoyo Castelazo
Secretaría de Energía

Codirectora de tesis:

Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez
Facultad de Ingeniería

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dra. Cecilia Martín Del Campo Márquez

Secretario: Dr. Aarón Sánchez Juárez

Vocal: Dr. Octavio García Valladares

1er Vocal: Dr. Edgar Santoyo Castelazo

2er Vocal: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017.

Tutor de tesis:

Dr. Edgar Santoyo Castelazo

Firma

Agradecimientos

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo y patrocinio, que a través de la beca proporcionada me permitieron realizar estos estudios de maestría.

Quiero agradecer a mis profesores que me apoyaron todo el tiempo en mis estudios, quienes compartieron sus conocimientos y contribuyeron a mi formación profesional. Especialmente agradezco a mis asesores Dr. Edgar Santoyo Castelazo y Dra. Cecilia Martín Del Campo Márquez por su infinita paciencia y ayuda en todo momento. A la Dra. Claudia Tomasini por su apoyo para la comprensión del software GaBi que sin él no se hubiera podido concluir este proyecto, de la misma forma agradezco al Dr. Edgar Rolando Santoyo Gutiérrez por brindarme el uso de las instalaciones del Instituto de Energías Renovables.

Resumen

La mitigación del cambio climático ha suscitado preocupaciones de organizaciones internacionales centrándose en reducir el uso de combustibles fósiles con el fin de disminuir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Actualmente los avances tecnológicos y de investigación en energías renovables van ganando importancia en el mercado energético, llegando a tener una gran variedad de alternativas energéticas como la energía solar, hídrica, geotérmica, eólica, entre otras.

Al igual que otros países, México está contribuyendo para disminuir los GEI para ello modificó sus políticas energéticas dando mayor oportunidad para que las energías limpias (energías renovables, gas y nuclear) contribuyan en mayor cantidad y así reducir la contribución de las fuentes fósiles como energía primaria. Uno de los grandes consumidores de energía es el sector eléctrico y por ello uno de los principales contribuyentes de GEI al nivel mundial, simplemente en México durante 2013-2014 la generación eléctrica con combustibles fósiles aportó el 19% de las emisiones totales de GEI, siendo la segunda actividad con mayores emisiones en el país. Uno de los compromisos (de manera no condicionada ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) del país, para disminuir la contribución de GEI del sector eléctrico se encuentra en la Ley General del Cambio Climático (LGCC) donde se considera alcanzar un 35% de generación eléctrica con fuentes de energía limpias para el año 2024. Además, en el año 2014 se aprobó la “Reforma Energética” junto con leyes secundarias que brindan oportunidades de inversión en energías limpias y una mayor diversificación de la matriz eléctrica con menos dependencia de los combustibles fósiles.

Entre las energías limpias se encuentra la energía solar y en particular su uso en paneles fotovoltaicos. La capacidad que tiene México de genera energía eléctrica con energía solar es extensa, ya que el país cuenta con una ubicación geográfica privilegiada que le permite aprovechar este recurso a lo largo de todo su territorio. Sin embargo, esta energía no está siendo aprovechada en las cantidades que se demandan para cumplir con las metas que tiene el país para disminuir los GEI; simplemente en la generación eléctrica con energía solar fotovoltaica no se han tenido grandes cambios. Al año 2016 se tiene una participación en la matriz de generación eléctrica nacional de menos del 1% en la capacidad instalada. Se espera que con

estudios de evaluaciones de impacto ambiental como el que se desarrolló en este estudio se avance a una velocidad mayor con la energía solar hacia un futuro energético sustentable y diversificado que ayude a mitigar el cambio climático.

En el presente estudio, se ha llevado a cabo el análisis del ciclo de vida (ACV) de un sistema fotovoltaico conectado a la red, es una instalación en azotea tecnología fotovoltaica policristalina con una inclinación hacia el sur de 20 grados ubicada en México (caso Base). El objetivo principal es evaluar al sistema FV con la metodología del ACV y conocer los impactos ambientales potenciales para el Caso Base. Los resultados obtenidos fueron 57.33 [g de CO₂-eq./kWh] de emisiones de GEI para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global (GWP). Este valor se encuentra dentro del rango de valores publicados en otros estudios hechos con anterioridad. Gerbinet et al., (2014) concluyó que la cantidad de GEI regularmente es menor de 150 g de CO₂-eq/kWh para un sistema FV incluyendo sus componentes (inversor, estructura de montaje y equipo eléctrico), instalación y operación. De la misma forma, en los resultados se observó que los paneles FV son los que aportan mayor cantidad de impactos ambientales potenciales al sistema.

Se hicieron dos análisis de sensibilidad Caso A y Caso B. En el análisis de sensibilidad se realizaron modificaciones de dos parámetros para el Caso A se modificó la eficiencia del inversor de 93.5% al 96.5%, mientras que para el caso B se modificaron las dimensiones del sistema ocupado de 23.5 m² con una eficiencia del 13.6% del módulo a una superficie de 22.68 m² con una eficiencia de 14.3% del módulo. La modificación de las dimensiones se vio reflejada en la disminución de los impactos ambientales potenciales de los procesos pertenecientes al panel FV y a la estructura de montaje.

En la última parte se realizó la comparación del Caso Base (policristalina, mc-Si) con tres tecnologías de generación fotovoltaica diferentes (película delgada CIS, silicio amorfo, monocristalina). Las tecnologías con menores impactos en GWP son los sistemas FV de película delgada CIS con 52.21 gCO₂/kWh y de silicio policristalino (Caso Base) con 57.32 gCO₂/kWh.

Entre las recomendaciones que se proponen están cambiar el suministro de electricidad hacia una mayor proporción de energía renovable en algunos de los procesos y revisar a detalle

los materiales ocupados para la fabricación de la celda FV, ya que tendrán un efecto significativo en la disminución del GWP. Para disminuir los impactos ambientales también se recomienda incluir el reciclaje de paneles solares debido a que no se ha considerado completamente en el inventario del sistema.

Índice

1.Introducción	1
2.Análisis de la generación eléctrica.....	4
2.1 Cambio climático	4
2.1.1 Cambio climático en México	6
2.2 Inversión tecnológica	6
2.3 Energías Renovables (ER)	7
2.4 Sistemas solares fotovoltaicos	11
3.La energía solar fotovoltaica.....	17
3.1 Efecto fotovoltaico.....	17
3.2 Funcionamiento de una celda fotovoltaica de silicio	17
3.3 Construcción y estructura de la celda fotovoltaica	19
3.3.1 Celdas de silicio	20
3.3.2 Celdas de película delgada.....	21
3.3.3 Diferencias de la tecnología de silicio y película delgada	23
3.4 Sistemas solares fotovoltaicos	24
3.5 Parámetros del sistema fotovoltaico	25
3.5.1 La radiación solar.....	25

3.5.2	Eficiencia de la celda FV	26
3.5.3	Factor Forma de la celda FV	27
3.5.4	Tiempo de vida útil	27
3.5.5	Rendimiento Global	28
3.5.6	Tiempo de generación de energía eléctrica.....	29
3.6	Modelos de sistemas solares fotovoltaicos	30
3.7	Tipos de instalación	31
4.	Análisis del Ciclo de Vida (ACV)	33
4.1	Antecedentes históricos del análisis del ciclo de vida	33
4.2	Concepto de Análisis del Ciclo de Vida	35
4.3	Fases del ACV	37
4.3.1	Definición de objetivos y alcance	37
4.3.2	Análisis de Inventario	39
4.3.3	Evaluación de impacto.....	40
4.3.4	Interpretación de resultados	43
4.4	Metodologías de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.....	43
4.5	Aplicaciones del ACV	44
4.6	Herramientas para la elaboración de un ACV	44

4.6.1	Bases de datos	44
4.6.2	Software	46
4.6.3	Metodología CML 2001	46
4.7	ACV en las energías renovables	48
4.7.1	ACV en los sistemas solares fotovoltaicos	48
5. Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de un Sistema Fotovoltaico (SFV) instalado para la generación eléctrica en México.....		53
5.1	Objetivo del estudio	53
5.1.1	Alcance	54
5.1.2	Unidad Funcional.....	54
5.1.3	Vida útil	54
5.1.4	Límites del sistema	55
5.1.5	Hipótesis y limitaciones	57
5.1.6	Consideraciones	57
5.2	Descripción del Análisis de Inventario	58
5.2.1	Inventario del caso de estudio.....	65
5.3	Evaluación de Impactos Ambientales	68
6. Análisis de resultados		69

6.1	Caso Base.....	69
6.2	Interpretación de resultados del Caso Base	74
6.2.1	Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos de Elementos (ADP elements) 74	
6.2.2	Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos Fósiles (ADP fossil)	74
6.2.3	Potencial de Acidificación (AP)	75
6.2.4	Potencial de Eutrofización (PE).....	75
6.2.5	Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP).....	75
6.2.6	Potencial de Calentamiento Global (GWP)	75
6.2.7	Potencia de Toxicidad Humana (HTP).....	76
6.2.8	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP).....	76
6.2.9	Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP).....	76
6.2.10	Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP)	76
6.2.11	Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP).....	77
6.3	Comparación Caso Base y Caso de Referencia	77
6.4	Análisis de sensibilidad.....	80
6.4.1	Caso A.....	80
6.4.2	Caso B.....	82

6.5	Comparación de la tecnología policristalina (Caso Base) con otras tecnologías fotovoltaicas	83
7.	Conclusiones	87
7.1	Caso Base	87
7.2	Análisis de sensibilidad.....	91
7.3	Comparación de las tecnologías fotovoltaicas	92
7.4	Reciclaje.....	93
7.5	Otros sistemas fotovoltaicos	94
7.6	Comparación de diferentes sistemas de generación eléctrica con el sistema FV (Caso Base)	95
	Anexo A	96
	Anexo B	99
	Bibliografía	102

Acrónimos

ACV	Análisis del Ciclo de Vida
ADP	Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos: Abiotic Resource Depletion Potential
AP	Potencial de Acidificación: Acidification Potential
BD	Base de Datos
CF	Combustibles Fósiles
CML	Instituto de Ciencias Ambientales de Leiden: del holandés Centrum Voor Milieuwetenschappen Leiden
CONACyT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
EICV	Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida
EP	Potencial de Eutrofización: Eutrophication Potential
EPIA	Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica: European Photovoltaic Industry Association
ER	Energías Renovables
ETP	Potencial de Eco Toxicidad: Eco-Toxicity Potential
FAETP	Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce: Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential
GaBi	Ciclo de Vida de Ingeniería: del alemán Ganzheitlichen Bilanzierung
GEI	Gases Efecto Invernadero
GWP	Potencial de Calentamiento Global: Global Warming Potential
HTP	Potencial de Toxicidad Humana: Human Toxicity Potential
IA	Impactos Ambientales
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
IEA	Agencia Internacional de Energía: International Energy Agency

INERE	Inventario Nacional de Energías Renovables
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático: Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables: International Renewable Energy Agency
ISO	Organización Internacional para la Estandarización: International Organization for Standardization
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
LAERFTE	Ley de Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética
LCA	Análisis del Ciclo de Vida: Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
LCI	Análisis de Inventario del Ciclo de Vida: Life Inventory Analysis
LCIA	Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida: Life Cycle Impact Assessment
LGCC	Ley General del Cambio Climático
MAETP	Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina: Marine Aquatic Ecotoxicity Potential
NREL	Laboratorio Nacional de Energía Renovable: National Renewable Energy Laboratory
ODP	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono: Ozone Depletion Potential
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PEAER	Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energía Renovables
POCP	Potencial de Creación de Oxidantes Fotoquímicos: Photochemical Oxidants Creation Potential
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional

RE	Reforma Energética
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales
SENER	Secretaria de Energía
SETAC	Sociedad de Toxicología y Química Ambiental: Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SFV	Sistema Fotovoltaico
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente: United Nations Environment Programme
WEC	Consejo Mundial de Energía: World Energy Council

Lista de tablas

Tabla 1.0 Estudios de ACV de sistemas fotovoltaicos con celdas de silicio, incluye parámetros y características de evaluación. Fuente: Modificado de (Hsu et al., 2012).	50
Tabla. 3.0 Descripción de los procesos del SFV. Los procesos incluidos son: la reducción del cuarzo, purificación del silicio, fabricación de la oblea, producción de módulos y paneles, componentes eléctricos, estructura de montaje, instalación y operación. Fuente: Propia.	60
Tabla. 5.2 Características del módulo policristalino para el Caso Base. Información obtenida del fabricante SHARP (2012).	66
Tabla. 5.3. Características del Inversor. Información obtenida del fabricante Fronius (2010).	66
Tabla. 5.4. Características del Transporte. Cálculos realizados considerando la ubicación de las fábricas de los equipos.	67
Tabla. 6.1 Impactos Ambientales potenciales de los componentes del SFV en el Caso Base. Fuente: Propia con resultados del ACV.	71
Tabla. 6.2 Comparación de impactos ambientales potenciales para el caso de referencia y el caso base. Fuente: Propia con resultados de ACV.	79
Tabla. 6.3 Relación de cambio de eficiencia del inversor. Las eficiencias del inversor se tomaron de las características del inversor (ver Tabla 6.3). El cambio en el inversor fue en el caso de referencia. Fuente: Propia con resultados de ACV.	81

Tabla. 6.4 Modificación de las dimensiones del caso de referencia (CR). El porcentaje de impacto al modificar las dimensiones del CR se ven reflejadas en el Caso B para la categoría de impacto GWP. Fuente: Propia con resultados de ACV.....	83
Tabla. 6.5 Tipos de tecnologías fotovoltaicas: eficiencia y dimensiones. Fuente: Propia y de Jungbluth et al. (2012).....	84
Tabla A.1. Materia prima requerida en cada uno de los procesos de fabricación del panel. ...	96
Tabla A.2. Inventario de los elementos predominantes de los procesos del panel policristalino (mc-Si).....	96
Tabla A.3. Inventario de los materiales para el embalaje de un inversor de 2.5 kW.	97
Tabla A.4 Cantidad de cable que se requiere para un Sistema Fotovoltaico de 3 kWp con tecnología policristalina.	97
Tabla A.5. Material requerido para la estructura de montaje de un Sistema Fotovoltaico de 3 kWp con tecnología policristalina.....	97
Tabla A.6. Consumo de Energía en los procesos del sistema fotovoltaico.....	98
Tabla B.1. Impactos ambientales potenciales del Sistema Fotovoltaico Caso Base, incluyendo la operación del sistema por 30 años.....	99
Tabla B.2. Diferencia de los impactos ambientales potenciales obtenidos en el Caso de referencia y en el Caso B.	100
Tabla B.3. Aportación de impactos ambientales potenciales en cada una de las categorías de impacto de las cuatro tecnologías fotovoltaicas: película delgada CIS, silicio amorfo a-Si,	

monocristalina y policristalina. En 6 de las 11 categoria la tecnología monocristalina tiene la mayor aportación..... 101

Lista de figuras

Figura 2.1 Porcentaje estimado de energía renovable en el consumo mundial de energía eléctrica (REN21, 2017a).....	8
Figura 2.2 Plan del sistema eléctrico México para el año 2030. En la capacidad total por tipo de tecnología se proyecta tener el 50% de instalaciones con tecnologías convencionales y el otro 50% con tecnologías limpias (SENER, 2016)	11
Figura 2.3 Capacidad instalada acumulativa de sistemas fotovoltaicos 2000-2016 (SolarPowerEurope, 2017).....	12
Figura 2.4 Costo ajustado del sistema fotovoltaico en gran escala (IEA, 2016).....	13
Figura 2.5 Radiación solar diaria promedio anual (INERE, 2017).....	14
Figura 2.6 Centrales de Generación Solar operando en México en el año 2016 (SENER, 2017).....	15
Figura 3.1 Efecto fotovoltaico: al incidir la luz solar en la unión, se genera una corriente que se transmite por la carga, los electrones circulan en dirección a los huecos (CIEMAT, 2008).	18
Figura 3.2 Funcionamiento de una celda fotovoltaica. Modificado de Homepower (2009). ..	19
Figura 3.3 Estructura de una celda de silicio. Fuente: Propia.....	21
Figura 3.4 Estructura de una celda de película delgada. Modificado de Jungbluth (2012).	22
Figura 3.5 Sistema autónomo. Fuente: Propia	30

Figura 3.6 Sistema interconectado a la red. Fuente: Propia.....	31
Figura 4.1. Análisis del ciclo de vida de un producto. Fuente: (ISO, 2006; IHOBE, 2009)....	36
Figura 4.2. Fases y estructura del ACV de acuerdo con ISO 14040:2006. Fuente: (ISO, 2006).	
37	
Figura 4.3. Elementos de la Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV). Fuente: (ISO, 2006).	41
Figura 4.4. Relación entre las bases de datos y el análisis de ciclo de vida. Fuente: Modificado de IHOBE (2009).	45
Figura. 5.2. Modelo del Sistema Fotovoltaico para el desarrollo del ACV. El diagrama fue desarrollado considerando los límites, entradas y salidas del sistema.	56
Figura. 5.3 Procesos que integran un sistema fotovoltaico basado en la tecnología de silicio policristalino. Nota: El diagrama original se encuentra en Jungbluth et al. (2012). Sin embargo, para el presente estudio se le hicieron algunas modificaciones. Fuente: Modificado de (Jungbluth et al., 2012).	59
Figura. 6.2 Resultados del ACV obtenidos para cada una de las categorías de impacto del Sistema Fotovoltaico (SFV) para el Caso Base. Fuente: Propia con resultados del ACV.....	73
Figura. 6.3 Relación de cambio de la eficiencia del inversor. Fuente: Propia con resultados de ACV.	81
Figura. 6.4 Potencial de Calentamiento Global para las tecnologías de CIS, a-Si, single-Si y multi-Si. Fuente: Propia con resultados de ACV.	85

1. Introducción

A nivel mundial, el aumento de la población y la demanda de energía, están incrementando los gases efecto invernadero (GEI) causantes del cambio climático y otros impactos al medio ambiente. Por ese motivo y para satisfacer la demanda de energía varios países han estado modificando sus políticas energéticas, desarrollando "reformas energéticas" que pretenden beneficiarse de los recursos de energías alternativas con bajas emisiones de carbono y fomentar el ahorro de energía, además de aumentar las inversiones en energías renovables (REN21, 2017). Por otro lado, la mitigación del cambio climático ha suscitado preocupaciones de organizaciones internacionales centrándose en reducir el uso de combustibles fósiles con el fin de disminuir las emisiones de dióxido de carbono y otros gases nocivos a la atmósfera. Actualmente los avances tecnológicos y de investigación en energías renovables van ganando importancia en el mercado energético, llegando a tener una gran variedad de alternativas energéticas como la energía solar, hídrica, geotérmica, eólica, entre otras.

Al igual que otros países, México está contribuyendo para disminuir los GEI, para ello modificó sus políticas energéticas dando mayor oportunidad para que las energías con bajas emisiones de carbono contribuyan en mayor cantidad y así reducir el consumo de fuentes fósiles que existe en el país. Dentro de estas políticas se encuentra el sector eléctrico uno de los principales contribuyentes de GEI al nivel mundial, simplemente en México durante 2013-2014 la generación eléctrica con combustibles fósiles aportó el 19% de las emisiones totales de GEI, siendo la segunda actividad con mayor impacto al medio ambiente en el país (SENER, 2017). Uno de los compromisos (de manera no condicionada) del país, para disminuir la contribución de GEI del sector eléctrico se encuentra en la Ley General del Cambio Climático (LGCC) donde se considera alcanzar un 35% de generación eléctrica con fuentes de energía limpias (energías bajas en carbono) para el año 2024. Además, en el año 2014 se aprobó la "Reforma Energética" junto con leyes secundarias que brindan oportunidades de inversión en energías limpias y una mayor diversificación de la matriz eléctrica con menos dependencia de los combustibles fósiles.

Entre las energías limpias se encuentra la energía solar fotovoltaica, su generación se concentra en países de la Unión Europea, China, Estados Unidos y Japón. Aunado a esto en los últimos años se ha incrementado su participación en el sector eléctrico mundial debido a su mejoramiento tecnológico y la disminución de costos. Sin embargo, en México esta fuente de energía representa menos del 1% de la capacidad total de generación eléctrica del país (SENER, 2017). Con los cambios de la reforma energética en el sector eléctrico, se espera una mayor participación de esta tecnología en la matriz de generación para los siguientes años.

La oportunidad que ofrece México a los sistemas de generación con fuentes limpias, nos lleva al análisis de sustentabilidad de los sistemas a implementarse. Para ello existen herramientas y métodos para evaluar impactos ambientales, sociales y económicos.

El presente estudio, tiene la intención de contribuir con la evaluación del impacto ambiental que causa un sistema de generación eléctrica solar fotovoltaico utilizando la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), con la finalidad de cuantificar las emisiones y los efectos que se tienen al generar con un sistema fotovoltaico específicamente en México. Se eligió un sistema fotovoltaico por ser de las tecnologías que contribuyen en menor porcentaje en la generación eléctrica del sector eléctrico mexicano y son sistemas que tienen la facilidad de instalarse en hogares, conectados en paralelo con la red eléctrica. Cabe destacar que la metodología del ACV considera los impactos ambientales desde la extracción de la materia prima hasta el fin de la vida útil del producto considerando si existe algún tipo de gestión de residuos.

La tesis se estructura de la siguiente manera. El capítulo 2 proporciona información general del sector eléctrico a nivel mundial y en México, trata temas como Cambio Climático, inversión en el sector energético y energías renovables. En el capítulo 3 se describirá el funcionamiento de la celda fotovoltaica para la generación de energía eléctrica, a su vez se verán las diferentes tecnologías fotovoltaicas. Del mismo modo se especificarán los parámetros y la clasificación de los sistemas fotovoltaicos. Una vez que ha sido detallada la información del funcionamiento de un sistema fotovoltaico en el capítulo 4 se dará una introducción a la metodología del análisis del ciclo de vida, mencionando sus antecedentes, fases del análisis, normatividad y aplicaciones; igualmente se incluirá la revisión

bibliográfica que hace referencia al tema. Relacionando la información del capítulo anterior con los casos de estudio propuestos, el capítulo 5 describe la aplicación de la metodología del ACV al sistema fotovoltaico instalado en México. De forma que al obtener los resultados se analicen y discutan en el capítulo 6. Las conclusiones y recomendaciones se presentan en el capítulo 7, incluyendo las limitaciones que se tuvieron y lo que se espera para un futuro cercano.

2. Análisis de la generación eléctrica

El panorama internacional de la generación de energía eléctrica está cambiando, las energías renovables están desplazando a las energías basadas en combustibles fósiles. En parte se debe a los acuerdos internacionales del cambio climático, políticas de oportunidad para las energías renovables, la inversión en nuevas tecnologías y la volatilidad en los precios de los combustibles fósiles (REN21, 2017b).

Este capítulo proporciona información del panorama internacional del problema ambiental que se ha suscitado por la generación de energía, la posición de las energías renovables en la transición energética y el camino que está tomando México ante los cambios que se presentan, se pondrá mayor interés en la energía solar por ser la considerada para el presente estudio.

2.1 Cambio climático

Cuando un clima es estable, la cantidad de energía que el sistema Tierra absorbe del Sol se equilibra por la cantidad de energía que la Tierra emite al espacio en forma de radiación infrarrojo térmica, no obstante, el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero ha generado un desequilibrio al reducir la radiación emitida y acumularla en el sistema Tierra con el paso del tiempo; el desequilibrio energético de la Tierra constituye el parámetro más importante que define el ritmo del cambio climático mundial (OMM, 2016).

La sociedad actual enfrenta uno de los mayores retos en la historia de la humanidad, el desarrollo global que inicia en la revolución industrial a mediados del siglo XVIII, ha llevado al planeta a un proceso de desarrollo económico y social sin precedentes, acompañado de un deterioro del medio ambiente que ha repercutido afectando al clima, generando el proceso del cambio climático (Vijayan et al., 2012). Tema que lleva varios años discutiéndose desde el Protocolo de Kioto en 1997 donde por primera vez se habló del problema hasta la última reunión que se realizó en la cumbre del clima de París en 2015.

Las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la quema de combustibles fósiles, los procesos industriales, entre otras actividades humanas, han aumentado desde la era preindustrial como resultado del crecimiento económico y demográfico. Entre las consecuencias, se han alcanzado altas concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, como los principales GEI. Estas emisiones dependen principalmente del tamaño de la población, la actividad económica, estilo de vida, el uso de la energía, los patrones del uso del suelo, la tecnología y la política climática (IPCC, 2016). Los incrementos de GEI corresponden de forma directa a los sectores de uso final del suministro de energía 47%; la industria 30%, el transporte 11% y los edificios 3%, (IPCC, 2014).

En la Cumbre del Clima de París 2015 (COP21) en donde por primera vez se lograron reunir 195 países con diferentes intereses, lo que se buscó fue llegar a un acuerdo en donde todos aportaran sin perjudicarse, esto se refiere a no limitar completamente a países que dependen económicamente de los combustibles fósiles como ejemplo se tiene a Arabia Saudita. Por lo cual el objetivo principal del acuerdo ha sido “mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5°C”. De manera que el cambio climático se puede observar como una “tormenta moral perfecta” ya que las condiciones particulares que dan origen al fenómeno, asociado a las actividades de producción, transporte y consumo de bienes y servicios en el presente, y sus efectos sobre futuras generaciones, retan a la capacidad del ser humano para enfrentarlo; resulta sumamente complejo concretar acciones que puedan garantizar la justicia, el derecho al desarrollo, la equidad y la responsabilidad de todas las partes involucradas (Gardiner, 2006).

Con los problemas que involucra el tema del cambio climático nos lleva a la cooperación generalizada del ser humano para desarrollar concientización del desempeño económico y social, logrando de esta forma seguir un camino donde se busque la sustentabilidad de todos los factores que involucran al cuidado del medio ambiente.

2.1.1 Cambio climático en México

En el caso de México, los impactos producto del cambio climático que están sucediendo son principalmente aumento de temperaturas y cambio en los patrones hidrometeorológicos, alertándonos sobre la urgencia de contribuir a la mitigación del cambio climático, cambiando el modelo energético, basado principalmente en fuentes de combustibles fósiles. Las emisiones de dióxido de carbono en México representaron en 2012 el 1.37% de las emisiones globales, lo cual ubica al país en el lugar 13 de los países con mayores emisiones de CO₂ (IEA, 2016a). De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en México, el sector energético representa 67.3% de las emisiones de GEI; siguiendo la agricultura 12.3%; procesos industriales 8.2%; Uso del suelo, cambio del suelo y silvicultura 6.3%; desechos 5.9%, (SEMARNAT, INECC, 2013, p. 21).

Con el propósito de enfrentar este problema, se han hecho modificaciones y compromisos entre los que destacan: la aprobación de la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que entró en vigor en octubre de 2012. Con esta ley se crearon reglamentos, instituciones y sistemas que conjuntamente trabajan para la reducción de las emisiones a nivel nacional. En el sector energético e industrial se pretende generar para el año 2030 el 35% de energía con fuentes limpias (fuentes renovables, cogeneración eficiente con gas natural y termoeléctricas con captura de CO₂; sustituir en la industria nacional los combustibles pesados por gas natural, energías limpias y biomasa; reducir en 25% las fugas, venteo y quemas controladas de metano; y controlar las partículas negras de hollín en equipos e instalaciones industriales (Gobierno de la República, 2014). Con la propuestas y compromisos del gobierno mexicano lo que se espera es un país con responsabilidad ambiental y concientización social, que se preocupa por su población y todos los ecosistemas.

2.2 Inversión tecnológica

Los avances tecnológicos están reduciendo el costo de las energías renovables. Por quinto año consecutivo, la inversión en nueva capacidad de energía renovable (incluyendo la energía hidráulica) aproximadamente duplicó aquellas en combustibles fósiles a nivel

mundial; actualmente en el mundo se añade más capacidad de energía renovable al año que la capacidad neta que añade para los combustibles fósiles combinados (REN21, 2017).

La combinación de la innovación tecnológica y las inversiones están destinando un despliegue rápido a gran escala de las tecnologías de bajo carbono (energías renovables y nuclear) y será lo que llegué a transformar el sistema energético mundial cumpliendo los objetivos de seguridad climática y energética. Con el objetivo de mantener la transformación del sistema energético en algunos países se están beneficiando a las plantas de generación de energía renovable con contratos a largo plazo, ayudando de esta forma a movilizar las inversiones en energías renovables (IEA,2016).

En México con la apertura del mercado energético se brinda la oportunidad de invertir en energías limpias como consecuencia de las reformas estructurales y las leyes impuestas desde el año 2014. Las modificaciones del mercado interno están ayudando a disminuir la utilización de fuentes de energías fósiles y dando prioridad a proyectos de tecnologías limpias, atrayendo inversión y proyectos a largo plazo en generación eléctrica principalmente con energía eólica y solar.

2.3 Energías Renovables (ER)

La mitigación del cambio climático ha sido la razón principal detrás de los llamados para buscar un futuro 100% movido por energías renovables; sin embargo, el beneficio que atraen las ER al reducir el CO₂, no es la única razón para impulsar su implementación; en algunos países las ER son un impulsor para: reducir problemas de contaminación del aire local, la seguridad energética y los costos de algunas tecnologías renovables se han vuelto competitivos (REN21, 2017).

El rápido crecimiento de las energías renovables en el sector eléctrico contribuye a reducir la utilización de combustibles fósiles. En el año 2016 las energías renovables representaron el 24.5% del consumo mundial de energía eléctrica (ver figura 2.1) y entre el año 2015-2016 la energía eólica y solar fotovoltaica registraron un incremento del 12.4% y 33% de la capacidad instalada respectivamente, aunque su contribución combinada con la producción mundial de electricidad es de alrededor del 5.5% (REN21, 2017b).

Porcentaje estimado de energía renovable en el consumo mundial de energía eléctrica

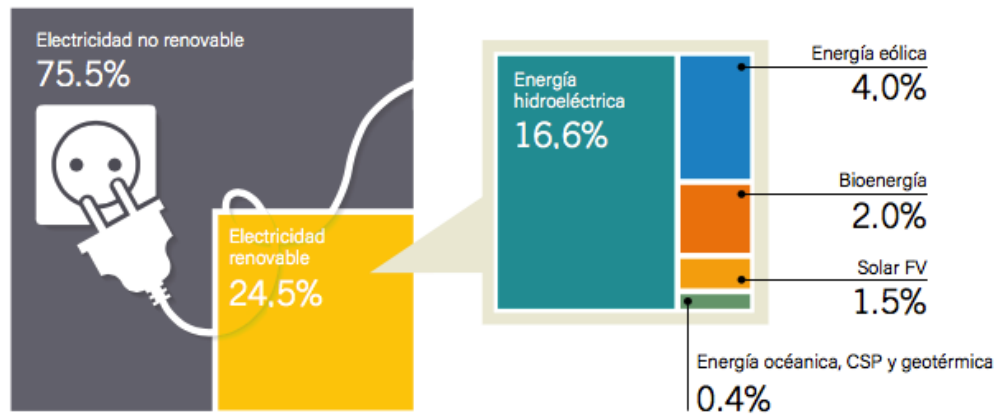


Figura 2.1 Porcentaje estimado de energía renovable en el consumo mundial de energía eléctrica (REN21, 2017a).

A pesar de que la energía eólica y solar representan solamente el 5.5%, se estima que en los siguientes años se incremente la capacidad de instalación. Como se vio anteriormente, las inversiones están aumentando, el desarrollo tecnológico está siendo impulsado y los costos se han reducido, lo que nos lleva de una fase de aprendizaje de tecnología y disminución de costos a una fase de tecnologías maduras. Con la madurez tecnológica y los costos bajos, las energías renovables variables se han vuelto más atractivas mejorando la seguridad energética mediante la diversificación de la oferta, reduciendo los niveles de contaminación locales y de emisiones de CO₂ (IEA, 2016). Sin embargo, se aproximan los desafíos de gestionar rápidamente sus implicaciones de naturaleza variable (WEC, 2016). Por lo que, se buscará integrar a los sistemas de energías renovables variables de forma que no afecten la confiabilidad del sistema eléctrico.

Se sabe que la energía solar y eólica son por naturaleza variables, ya que dependen del lugar geográfico de ubicación y de las características que se tengan en el sitio (la velocidad del viento y niveles de irradiación solar). En consecuencia, se busca innovar en tecnología de almacenamiento y de previsión energética, esperando una mejor programación y control de las centrales eléctricas de energías renovables variables. Aunado a esto, se ha comprobado la falsedad del mito de que la energía nuclear y fósil son necesarias para proporcionar el abasto de una carga base cuando el Sol o el viento no son suficientemente

intensos; en el 2016, Dinamarca y Alemania lograron manejar con éxito picos de 140% y 86.3%, respectivamente, de generación de electricidad a partir de fuentes renovables (REN21, 2017b).

Con el fin de atraer inversionistas en energías renovables, se necesita que los mecanismos políticos implementados en los diferentes países como apoyo a las energías renovables, ayuden a su rápida integración en los sistemas eléctricos de cada uno de los países. En el año 2016, 176 países tuvieron políticas energéticas de apoyo a energías renovables en sus territorios (REN21, 2017b). Una de las normativas que están facilitando la expansión de las energías renovables en el sector eléctrico son las subastas de proyectos a largo plazo.

El apoyo a las energías renovables intenta equilibrar el sistema eléctrico mundial, con la finalidad de conseguir hacer energía segura, asequible y respetuosa con el medio ambiente, evitando riesgos futuros de escasez y problemas ambientales. Una de las formas de mantener la seguridad energética para abastecer las necesidades de la demanda actual y futura es que los proveedores energéticos den el suministro necesario. Por esa razón, debería haber mayor apoyo a la tecnología de energía renovable distribuida, que permita a las personas que no cuentan con el servicio eléctrico tener el acceso a él.

Con el avance de las energías renovables en el mercado eléctrico mundial se cuestiona su futuro. Para el año 2040 se prevé que en muchos países las energías renovables se incrementarán y proporcionarán un tercio de la generación eléctrica mundial (IEA,2014). De manera que, habrá una gran disminución de emisiones contaminantes y un futuro sustentable en el uso de los recursos energéticos.

Las energías renovables en el sector eléctrico mexicano tienen una participación pequeña hasta el momento, pero desde la aprobación de la reforma energética en el año 2014, el país enfrenta diversos cambios en su sector, permitiendo mayor competitividad para las diferentes fuentes de generación eléctrica y tratando de disminuir la participación de fuentes de energías fósiles.

La reforma energética en el país brinda oportunidades de inversión a las energías limpias (energías renovables, gas y nuclear). Sus principales objetivos para el sector eléctrico

son diversificar la matriz de generación eléctrica, impulsando proyectos de energías limpias y ampliando su porcentaje de participación. Aunado a ello y para darles más oportunidad a los proyectos de generación con energías limpias, se ofrecen Certificados de Energías Limpias (CEL). Los CEL son reconocidos a nivel mundial por su contribución a la estabilidad de precios de la energía y la reducción del impacto ambiental de la generación eléctrica (SENER, 2016). También se apoya a los proyectos de energías limpias con la compra de energía a largo plazo, lo que representa un beneficio para la industria y los inversionistas ya que tienen asegurada la venta de la energía por un largo tiempo.

La aplicación correcta de la reforma energética tiene leyes secundarias (Ley de la Industria Energética, Ley de Transición Energética, mencionando a las principales) que indican la reestructuración del sector, los objetivos a cumplir en los siguientes años, el marco jurídico, la integración de las energías limpias, las instituciones participantes y sus funciones dentro del sector, entre otros estatutos.

En el desarrollo de los planes del sistema eléctrico nacional para los siguientes años se muestran la evolución y los cambios que se esperan, incluyendo las adiciones y retiros de sistemas de generación. Asimismo, para el año 2030 se tiene proyectada una capacidad instalada del 50% de generación con tecnologías convencionales y 50% con tecnologías limpias (ver Figura 2.2). Predominando la participación de la generación con Ciclos combinados, sistemas eólicos e hidroeléctricas.

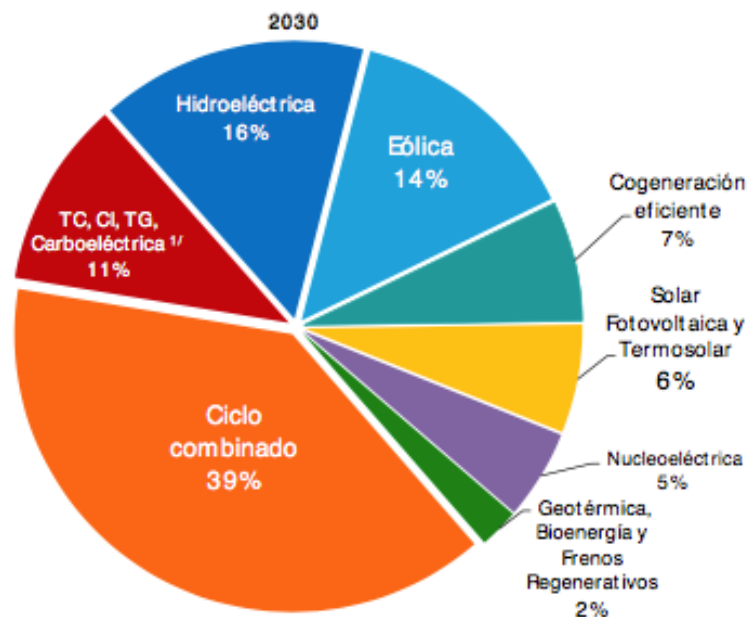


Figura 2.2 Plan del sistema eléctrico México para el año 2030. En la capacidad total por tipo de tecnología se proyecta tener el 50% de instalaciones con tecnologías convencionales y el otro 50% con tecnologías limpias (SENER, 2016)

Una de las grandes ventajas de México son su localización geográfica y climática, ya que le permite tener una matriz eléctrica diversificada donde las energías renovables con el tiempo pueden llegar a aportar hasta el 75% de la capacidad de generación del país.

2.4 Sistemas solares fotovoltaicos

En la última década la energía solar fotovoltaica ha tenido un crecimiento acelerado y está a punto de convertirse en una fuente de generación importante para el mundo. Se encuentra entre una de las energías más sustentables y para el año 2100 se espera que el gas, carbón, petróleo y nuclear sólo proporcionen el 15% de la energía mundial, mientras que la energía fotovoltaica suministrará el 70% (WEC, 2013).

Durante el año 2016, la capacidad instalada de sistemas solares fotovoltaicos fue de 306.5 GW a nivel mundial, un incremento del 33% con respecto al año 2015 (SolarPowerEurope, 2017). De la capacidad fotovoltaica acumulada Asia-Pacífico ha llegado a convertirse en la región solar más grande del mundo con el 48% de la instalación total,

mientras que Europa paso al segundo lugar con el 34%, seguido por países en el continente americano con el 15% (ver Figura 2.3).

La gran sorpresa continúa siendo China, después de ganar el primer lugar en el mercado mundial de energía solar con la mayor capacidad fotovoltaica instalada en el 2015, amplio su liderazgo con la instalación de 34.5 GW en el 2016 llevándolo a un total de 77.9 GW (SolarPowerEurope, 2017).

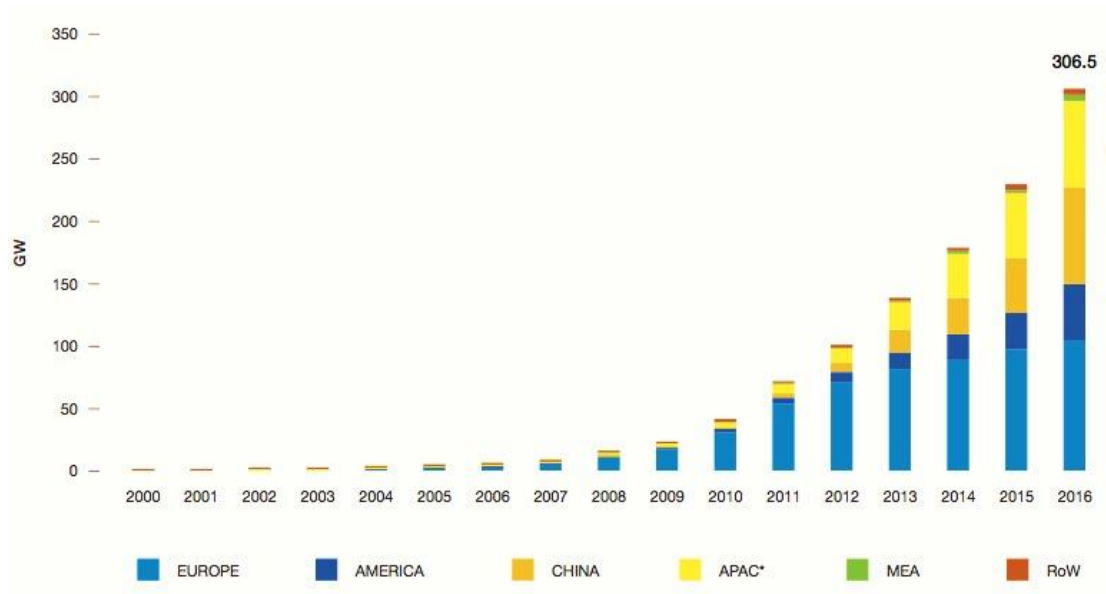
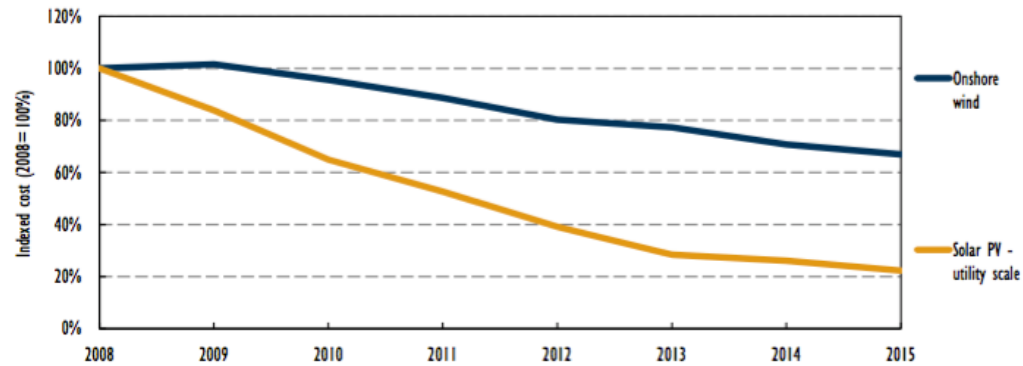


Figura 2.3 Capacidad instalada acumulativa internacional de sistemas fotovoltaicos 2000-2016 (SolarPowerEurope, 2017).

*Excl China, RoW: Rest of the World, MEA: Middle East and Africa, APAC: Asia Pacific

El despliegue de la energía solar fotovoltaica se debe a los bajos costos que se han tenido en los últimos años y a la inversión tecnológica logrando mejores eficiencias. Entre el 2008 y 2015 los costos promedios de los sistemas fotovoltaicos disminuyeron hasta en un 80% (ver Figura 2.4) y las eficiencias han llegado al 46% (NREL, 2017).



Note: Costs refer to global average of levelised cost of electricity (LCOE) with country specific assumptions on investment costs (declining over time) and cost of financing (fixed over time). Different costs per country are averaged weighted by annual capacity additions.

Figura 2.4 Costo ajustado del sistema fotovoltaico en gran escala (IEA, 2016).

Los sistemas fotovoltaicos (SFV) tienen la propiedad de producir energías desde micro-volts hasta mega-volts, utilizándolos en accesorios como calculadoras hasta grandes parques fotovoltaicos, se pueden colocar en edificios, techos, paredes y en cualquier lugar donde no se obstruya la radiación solar. Las principales características de la generación con sistemas solares fotovoltaicos en el mercado eléctrico son su fácil instalación y que suelen ser de menor escala que las de generación convencional. Su integración en la generación distribuida va en aumento, provocando la necesidad de planificar y operar las redes de media y baja tensión. Anteriormente, los consumidores no tenían la facilidad de acceder a fuentes de generación eléctrica propias, sin embargo, con los nuevos enfoques y la generación distribuida se está incentivando a la población para que accedan a sistemas de generación propia, logrando la reducción de costos de energía en sus hogares.

Otra de las ventajas de los SFV es que no requieren del uso de combustibles y su mantenimiento es mínimo durante la operación, es una tecnología que fácilmente puede abastecer lugares alejados e independientes de la red eléctrica.

La capacidad de energía solar en México tiene un amplio rango y es considerado como uno de los países con una ubicación privilegiada para la explotación de este recurso (ver Figura 2.5). La radiación solar promedio diario anual de 5.0 kWh/m² del país permitiría resolver los problemas energéticos que se tendrán en un futuro cercano derivado de la carencia de combustibles fósiles (Sánchez Juárez et al., 2017).

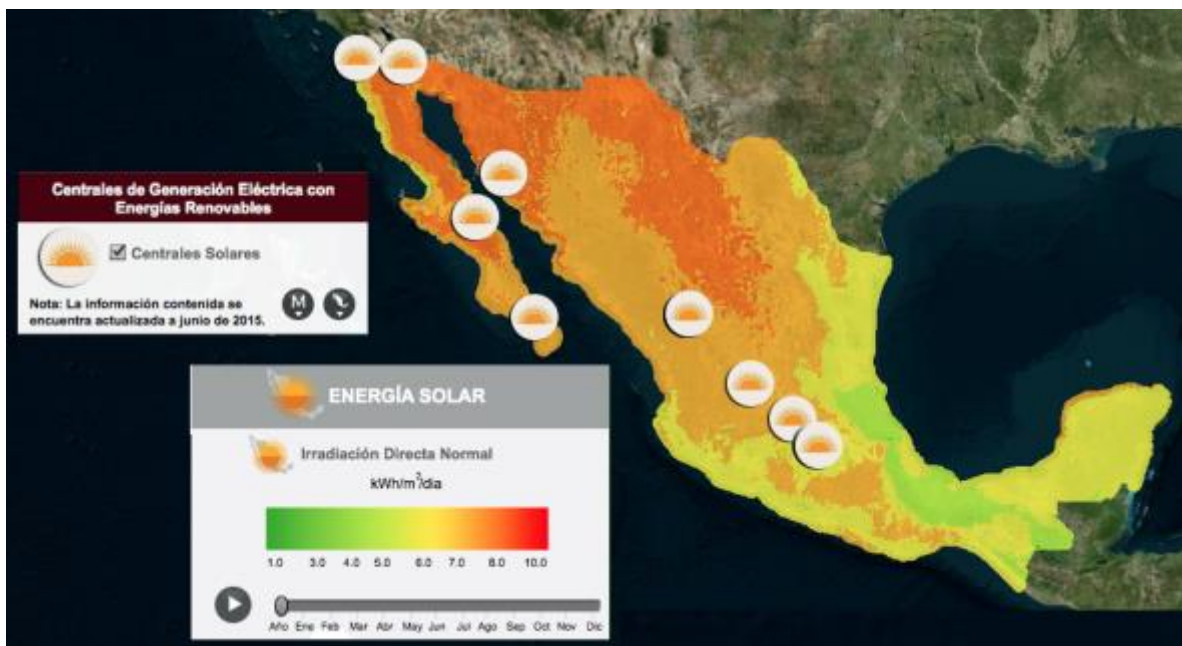


Figura 2.5 Radiación solar diaria promedio anual (INERE, 2017).

En la generación eléctrica mexicana los sistemas solares fotovoltaicos cuentan con 17 centrales en operación que representa menos del 1% de la capacidad total instalada en el año 2016 (ver figura 2.6), estas cifras indica que el recurso solar no se ha aprovechado en años anteriores debido principalmente a los altos costos que representaban y los precios excesivos que involucraban para el consumidor final. Sin embargo, con los avances tecnológicos, la disminución de costos, las reformas políticas aplicadas en el país y la apertura del mercado eléctrico a nuevas inversiones se espera en los siguientes años un incremento de sistemas solares fotovoltaicos.

CENTRALES DE GENERACIÓN SOLAR 2016
(Megawatt / Gigawatt-hora)

No.	Nombre	Entidad Federativa	Región de Control	Esquema ^{1/}	Capacidad Total (MW)	Generación Bruta ^{2/} (GWh)
1	Autoabastecimiento Renovable	AGS	03-Occidental	AUT	1	3
2	Coppel	SON	04-Noroeste	AUT	1	1
3	Generadora Solar Apaseo	GTO	03-Occidental	AUT	1	0
4	Iusasol 1	MEX	01-Central	AUT	18	39
5	Iusasol Base	MEX	01-Central	AUT	1	1
6	Oomapas Nogales	SON	04-Noroeste	AUT	1	0
7	Plamex	BC	08-Baja California	AUT	1	2
8	Los Santos Solar I	CHIH	05-Norte	AUT	20	-
9	Productora Yoreme	SON	04-Noroeste	GEN	1	0
10	Cerro Prieto	BC	08-Baja California	GEN-CFE	5	10
11	Sta. Rosalía (Tres Vírgenes)	BCS	10-Mulegé	GEN-CFE	1	2
12	Servicios Comerciales de Energía	BCS	09-Baja California Sur	P.P.	30	18
13	Tai Durango Cinco	DGO	05-Norte	P.P.	30	39
14	Tai Durango Cuatro	DGO	05-Norte	P.P.	6	8
15	Tai Durango Dos	DGO	05-Norte	P.P.	6	8
16	Tai Durango Tres	DGO	05-Norte	P.P.	6	5
17	Tai Durango Uno	DGO	05-Norte	P.P.	16	24
Total^{1/}					145	160

^{1/} AUT: Autoabastecimiento; GEN: Generación; GEN-CFE: Comisión Federal de Electricidad Generación; P.P: Pequeña Producción. ^{2/}Incluye la generación reportada por las centrales eléctricas en fase de pruebas. ^{3/} Los totales pueden no coincidir por redondeo. Información preliminar al cierre de 2016. Fuente: Elaborado por la SENER con información de la CFE, la CRE y el CENACE.

Figura 2.6 Centrales de Generación Solar operando en México en el año 2016 (SENER, 2017).

Parte del cambio observado en el país después de la reforma energética se dio con los nuevos proyectos de generación que entrarán al mercado en los siguientes años, los cuales siguen las reglas del mercado eléctrico nacional.

Una de las formas de ingresar al sistema eléctrico nacional es con las subastas de energía. Hasta el momento, se llevan aplicando dos subastas desde el año 2015, de las cuales la tecnología que más ha ganado proyectos es la energía solar fotovoltaica representando en la primera subasta un 74.38% de la capacidad asignada. El 25.6% restante lo ganó la generación eólica, estos proyectos deberán estar operando en el año 2018 (SENER, 2017). En la segunda subasta de energía eléctrica a largo plazo, participaron empresas que ofrecieron generación eléctrica con tecnologías convencionales. Los ganadores de la subasta quedaron de la siguiente manera, la tecnología de ciclo combinado represento el 72%, la energía solar fotovoltaica 15%, eólica 11% y geotérmica 2%.

Los primeros resultados de las subastas de generación eléctrica en el país muestran un futuro prometedor para las energías renovables, principalmente la energía solar predominó en los proyectos que se instalarán en los siguientes años. No obstante, para alcanzar las metas propuestas para el año 2024 en la Ley General del Cambio Climático (LGCC), es necesario que las energías renovables sigan teniendo mayores oportunidades para competir por los siguientes proyectos.

Hasta el momento se ha visto el panorama nacional e internacional de la generación eléctrica con energías renovables, pero para seguir con el enfoque planteado para el presente estudio en el siguiente capítulo se explicará la teoría del funcionamiento de la celda solar, de que equipos se conforma el sistema fotovoltaico y los parámetros para el rendimiento del sistema.

3. La energía solar fotovoltaica

El Sol es una estrella que emite energía electromagnética y la Tierra es un planeta que gira a su alrededor siguiendo una órbita aproximadamente elíptica que recibe una fracción pequeñísima del total de su radiación solar. Esta fracción viaja por el espacio, llega a la Tierra, atraviesa la atmósfera, incide sobre la superficie terrestre con una cierta inclinación e intensidad y finalmente puede llegar a ser percibida por un módulo fotovoltaico o cualquier otro dispositivo. La energía solar que incide en un módulo fotovoltaico es el comienzo de la generación eléctrica a partir de un sistema fotovoltaico.

En este capítulo se explicará el funcionamiento de un sistema fotovoltaico (SFV) desde el proceso para la obtención de la energía eléctrica, funcionamiento y estructura de una celda FV, equipos que componen al sistema FV y por último se describen los parámetros que afectan el rendimiento del sistema FV.

3.1 Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico se le conoce como la forma de convertir la energía solar que transportan los fotones de luz en energía eléctrica (Barrera, 2010). Las celdas solares funcionan con el efecto fotovoltaico, el cual fue observado por primera vez en 1839 por Alexandre-Edmond Becquerel, quien se dio cuenta de que el voltaje que aparecía entre dos electrodos inmersos en un electrolito dependía de la intensidad de luz que incidiese sobre ellos, este efecto también fue observado por Adams y Day en 1879 pero esta vez utilizando un elemento sólido; el selenio. Sin embargo, la primera celda solar fabricada fue de silicio en 1954 (Romero, 2010).

3.2 Funcionamiento de una celda fotovoltaica de silicio

El principio de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas se basa en la propiedad que tienen los semiconductores donde la energía que liga a los electrones de valencia al núcleo es similar a la energía que poseen los fotones de la luz solar. Entonces, cuando la luz solar incide sobre el material semiconductor, sus fotones proporcionan la energía necesaria a los electrones de valencia para romper sus enlaces y queden libres y así propagarse por el

material (ver Figura 3.1). Una forma de explicar el funcionamiento de la celda FV es tomando como ejemplo el silicio, por ser el elemento utilizado en la fabricación de la mayor parte de las celdas existentes en el mercado.

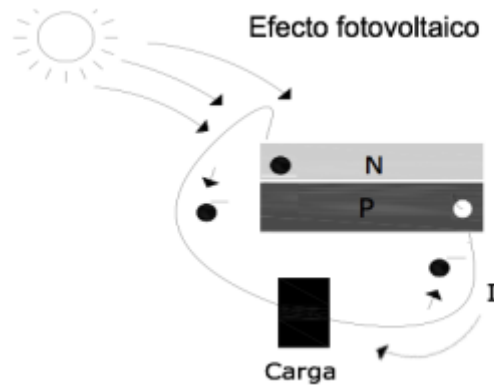


Figura 3.1 Efecto fotovoltaico: al incidir la luz solar en la unión, se genera una corriente que se transmite por la carga, los electrones circulan en dirección a los huecos (CIEMAT, 2008).

Una celda FV es fabricada con un semiconductor tipo p y uno tipo n. La región p actúa como contacto selectivo para los huecos impidiendo el paso de los electrones. De forma similar, la región n actúa como contacto selectivo para los electrones, esto hace posible el mantenimiento de una corriente eléctrica por el circuito exterior y en definitiva el funcionamiento de la celda como generador fotovoltaico (ver Figura 3.1). Entonces para lograr hacer que el silicio forme un material tipo “p” y “n” es agregándole impurezas al material (dopaje). En el caso del semiconductor tipo “p” al silicio se le agregan impurezas de boro (por ejemplo), donde el boro cuenta con únicamente tres electrones de modo que le faltará un electrón en su banda de valencia¹ (hueco); Este hueco actúa como una partícula positivamente cargada, creando una corriente positiva (ver Figura 3.2); en el caso del semiconductor tipo “n” el silicio es dopado con fósforo (por ejemplo), donde los átomos tienen cinco electrones en su capa exterior, cuatro electrones quedarán en la banda de

¹ La banda de valencia es la órbita de un átomo que contiene los electrones con mayor energía, mejor dicho, los electrones de valencia. La banda de conducción es la banda de energía siguiente, la cual a menudo está vacía de electrones.

valencia y uno quedará libre para unirse a la banda de conducción, el electrón libre en la banda de conducción da como resultados una corriente negativa (Bekkelund, 2013).

Cuando los fotones emitidos por la luz solar son absorbidos por los semiconductores; se generan pares de portadores de carga eléctrica (electrones y huecos), los cuales deben ser separados para usar la energía que cada uno representa. Estos portadores son generados por la energía de los fotones, y viajan bajo un gradiente de concentración donde son separados por efecto del campo eléctrico (Romero, 2010). El campo eléctrico se acumula hasta que no es posible que las partículas cargadas se muevan en las superficies del dispositivo dando como resultado un voltaje eléctrico que se puede medir externamente (ver Figura 3.2).

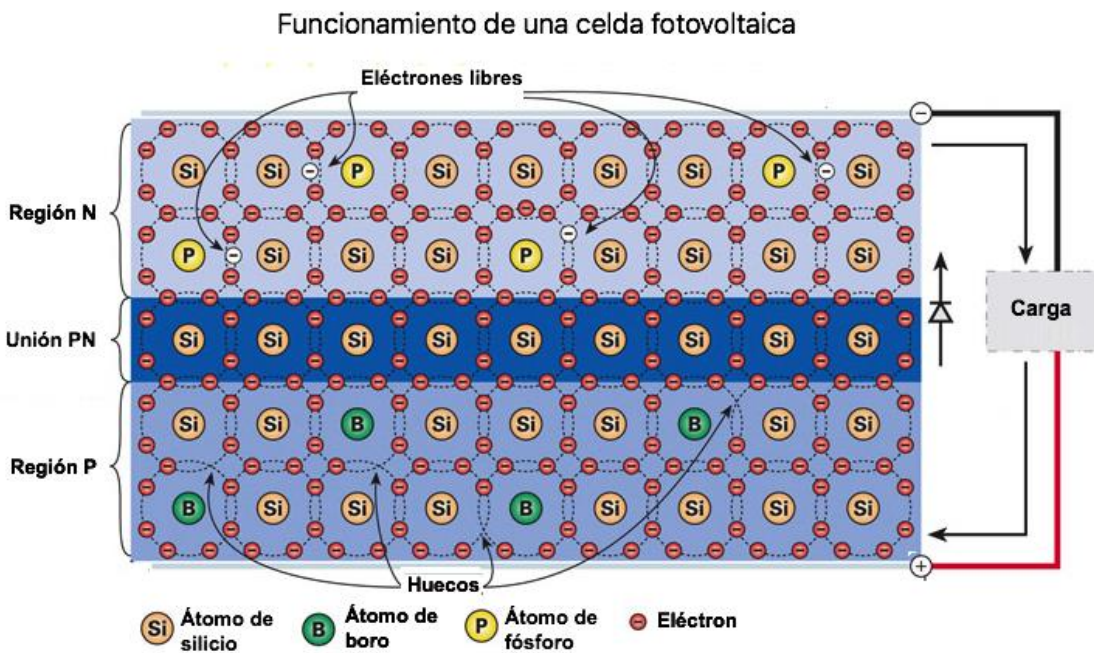


Figura 3.2 Funcionamiento de una celda fotovoltaica. Modificado de Homepower (2009).

3.3 Construcción y estructura de la celda fotovoltaica

Físicamente, la celda fotovoltaica es una superficie plana que funcionan con la incidencia de la radiación solar, comúnmente se fabrican de silicio, no obstante en los últimos años se han descubierto nuevos materiales para su fabricación llamadas celdas de película delgada multiunión. Las celdas fotovoltaicas tienen características que las definen

particularmente dependiendo del tipo de tecnología utilizada para su fabricación. Se clasifican en dos tipos: celdas de silicio y celdas de película delgada.

3.3.1 Celdas de silicio

Las celdas de silicio se dividen en tecnología monocristalina, policristalina y bandas de silicio. La diferencia radica en la eficiencia a la salida y método de fabricación.

-Celdas de silicio monocristalino (sc-Si): La celda es crecida o procesada como un único cristal. Las celdas con estructura monocristalina presentan elevados costos de fabricación y gastos de energía. Son las celdas más eficientes del mercado llegan a eficiencias del 26.3% (Green et al., 2016).

-Celdas de silicio policristalino (mc-Si): Están basadas también en pequeños cristales o granos, el tamaño de grano en estos materiales es inferior al del silicio monocristalino. Su composición a partir de pequeños cristales elementales hace que su color no sea uniforme, sino que presente diferentes tonalidades de azul. Las celdas de mc-Si llegan a eficiencias de 21.3% (Green et al., 2016).

-Bandas de silicio (ribbon-Si): Estas celdas ocupan el silicio sobrante de las otras dos tecnologías anteriores de manera eficiente. En un molde se cristalizan las obleas sin tener que pasar por el proceso de corte. No obstante son las menos eficientes de las tecnologías de silicio llegando a valores del 10-14%.

Una celda de silicio por lo general se compone de capas, primero hay una capa de contacto posterior que se logra evaporando o pintando con metal se plancha y suele cubrir totalmente, luego van dos capas de silicio (unión p-n). En la parte superior se encuentran los contactos de metal frontales con una capa de anti reflexión que da a la celda solar su típico color azul o negro, estos forman un patrón en forma de reja (ver Figura 3.3). El enrejado es diseñado con la finalidad de recolectar la mayor cantidad de fotones y ambos lados de la celda solar están eléctricamente conectados por un cable donde circulará la corriente cuando la luz incida.

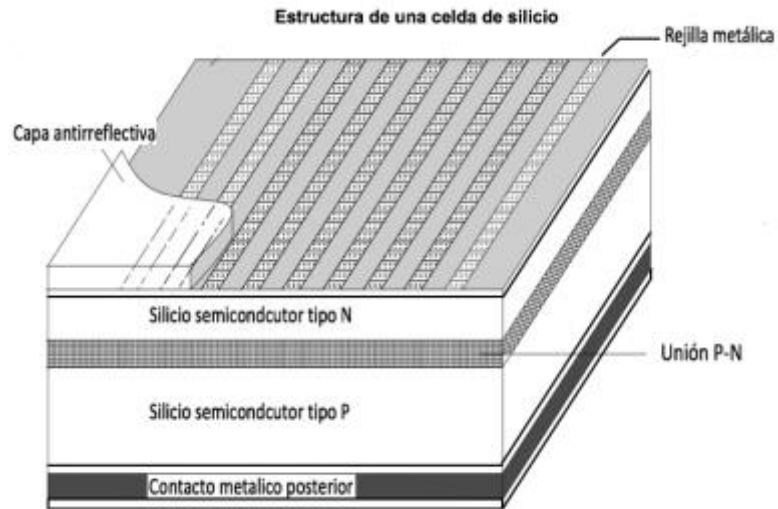


Figura 3.3 Estructura de una celda de silicio. Fuente: Propia.

Las celdas de silicio más ocupadas en el mercado tienen medidas de $156 \times 156 \text{ mm}^2$ y en un módulo FV suelen ocuparse entre 60-72 celdas en serie para su funcionamiento (ITRPV, 2017).

3.3.2 Celdas de película delgada

Las celdas de película delgada se fabrican mediante el depósito de una o más capas delgadas de diferentes materiales fotovoltaicos. El espesor de una capa de película delgada puede variar de unos nanómetros a decenas de micrómetros (Chopra et al., 2004). Las celdas suelen clasificarse por el material fotovoltaico utilizado.

-Celdas de silicio amorfo (a-Si): Es silicio en una forma no cristalina, con defectos en sus enlaces atómicos, sin embargo el silicio amorfo se deposita de tal manera que contenga una pequeña cantidad de hidrógeno, estos átomos de hidrógeno saturan muchos de los huecos de la red cristalina, permitiendo así a los electrones moverse a través del silicio. Tiene dos desventajas, la primera es su baja eficiencia y la segunda es su período corto de vida útil. La eficiencia de la celda disminuye las primeras horas de funcionamiento, después llega a una eficiencia no mayor del 10.2% (Green et al., 2016).

-Celdas de Teluro de Cadmio (CdTe): Una de las propiedades físicas que hacen de CdTe la mejor de las tecnologías de película delgada es el intervalo de banda de energía de 1.45 eV, lo que le permite convertir más energía del espectro solar en energía eléctrica (Jungbluth, 2012). Otra de las características de CdTe es su facilidad de funcionamiento a temperaturas extremas, esto quiere decir que generan electricidad a altas y bajas temperaturas. La eficiencia de las celdas CdTe se encuentra en el rango 15.3-21.0% (FirstSolar, 2017).

-Celdas de Cobre, Indio, Galio y Selenio (CIS o CIGS): El nombre de esta tecnología se define por la primera letra del nombre de los elementos que la conforman, la celda CIS contiene Cobre-Indio-Selenio y se diferencia de CIGS por tener Galio. Su estructura cristalina y los compuestos con los que se fabrica absorben fácilmente la luz solar (tiene una apariencia de negro profundo). La eficiencia de las celdas CIS se encuentra alrededor del 21.0% (Green et al., 2016).

En general las celdas de película delgada están compuestas de sustrato, capa semiconductor tipo n y p, contacto eléctrico frontal y contacto eléctrico posterior (ver Figura 3.4). El sustrato tiene que ser lo mayormente transparente (vidrio ó lamina de polímero) para permitir que entre suficiente luz a la celda (Aliyu et al., 2012).

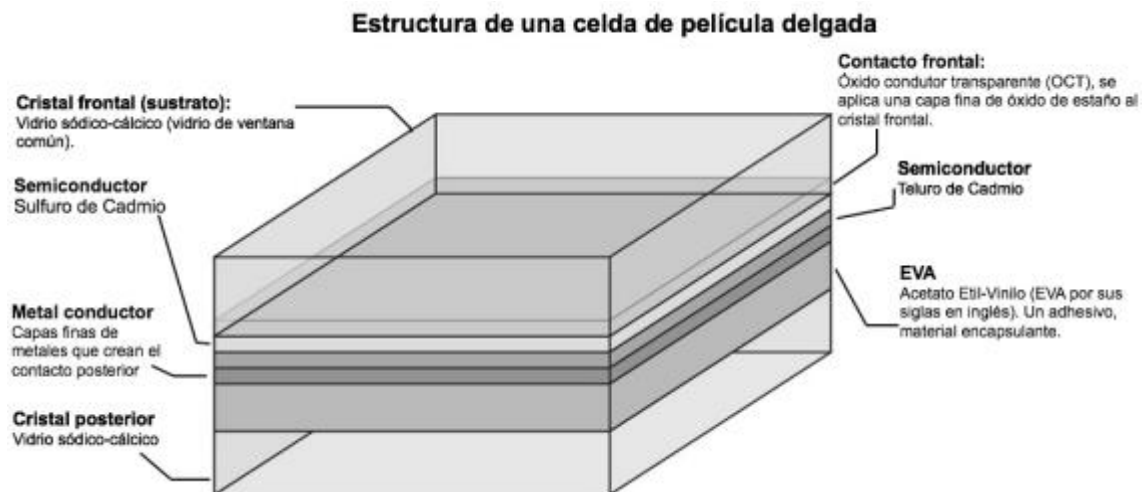


Figura 3.4 Estructura de una celda de película delgada. Modificado de Jungbluth (2012).

La tecnología de película delgada está tomando una participación mayor en el mercado fotovoltaico, actualmente compiten con las celdas de silicio en precios y eficiencias.

3.3.3 Diferencias de la tecnología de silicio y película delgada

La diferencia entre la tecnología de silicio y de película delgada tiene ventajas y desventajas para ambas, se mencionarán las más sobresalientes y con mayor importancia.

3.3.3.1 Ventajas de las celdas de silicio

El silicio es el segundo elemento más abundante del planeta, lo que significa que no se consume un recurso fácil de agotar. En cuando a las celdas de película delgada se fabrican con el uso de metales raros como lo son el telurio (Te), el indio (In) y el galio (Ga). El telurio es un subproducto de la extracción y procesamiento del cobre y níquel, también se produce una pequeña cantidad durante la extracción del zinc, oro y plomo (Marwede & Reller, 2012; Simon et al., 2013). El Indio es un subproducto de la producción del zinc; el galio se extrae de la bauxita y es un subproducto del aluminio, la extracción del galio es difícil de realizar (Zuser & Rechberger, 2011).

El aumento de utilización del Telurio, Indio y Galio para la fabricación de celdas FV podría aumentar el costo de las celdas de película delgada, en particular para aplicaciones de plantas solares de gran escala (Marwede et al., 2013). Al final del ciclo de vida de las celdas de silicio y película delgada deben tener un cuidado especial para su recuperación y almacenamiento. La causa principal es que se tienen elementos peligrosos y dañinos, tal es el caso del cadmio utilizado en las celdas FV de película delgada, ya que es altamente tóxico si se llegará a dispersar al medio ambiente (Biccari, 2012).

3.3.3.2 Desventaja de las celdas de silicio

La cantidad de material utilizado para la fabricación de una celda a base de silicio es mayor que la utilizada en una celda de película delgada. Las obleas para las celdas de silicio miden entre 100-300 μm (Jungbluth et al., 2012). Técnicamente se pueden producir obleas

de 100 μm , sin embargo, para evitar pérdidas de fragmentación se hacen de un mayor grosor. En caso contrario se tiene a la celda de película delgada que llega a tener un grosor inferior a 100 μm .

Las celdas de silicio tienen una cadena de procesos muy amplia comparada con los procesos para las celdas de película delgada (Jungbluth et al., 2012). Lo que vuelve a la celda de película delgada más eficiente en el consumo de energía durante la fabricación.

Las celdas de CdTe y CIGS son menos sensibles al aumento de la temperatura, esto quiere decir que su eficiencia no varía con altas temperaturas (Bekkelund, 2013).

3.4 Sistemas solares fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico se conforma de diferentes equipos dependiendo del modelo utilizado para abastecer las necesidades de los usuarios, los principales equipos de los que se conforma son:

-Celda fotovoltaica: Unidad básica de un sistema fotovoltaico.

-Módulo fotovoltaico: Es un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas en serie o serie-paralelo para generar voltajes, corrientes nominales y potencia deseada en el módulo.

-Panel fotovoltaico: Es un grupo de módulos fotovoltaicos interconectados para generar los voltajes y corrientes requeridos por el arreglo fotovoltaico.

-Arreglo fotovoltaico: Grupo de paneles fotovoltaicos interconectados en paralelo para generar los voltajes y corrientes que requiere el sistema fotovoltaico.

-Inversor: Convierte la corriente continua que proporcionan el arreglo fotovoltaico en corriente alterna.

-Banco de baterías: Un conjunto de baterías que se usa para almacenar parte o toda la energía generada por los paneles.

-Instalación eléctrica: entre los componentes que se utilizan para la instalación se encuentran el cableado, cajas de conexiones y accesorios para empalmar las conexiones.

3.5 Parámetros del sistema fotovoltaico

Anteriormente se ha mencionado que la generación eléctrica con recurso solar es intermitente, la cual depende de factores que se encuentran en la región geográfica donde se encuentra instalado el sistema y que pueden llegar a afectar la generación de energía. Sin embargo, estos factores no son los únicos, también se tienen los que dependen de las características propias del sistema. Los nombres de los factores del sistema se conocen como parámetros y se describen a continuación:

3.5.1 La radiación solar

La cantidad de energía de radiación solar por unidad de área por unidad de tiempo que atraviesa una superficie imaginaria de área se llama irradiancia (expresada en la ec.3.2). La irradiancia media terrestre o densidad de flujo a una distancia media tierra-sol y normal a los rayos solares se conoce como constante solar, y es de 1,366.1 W/m² (Entrena, 2014). La energía suministrada por el sol es intermitente, cambia durante el día y con las estaciones del año. Cuando la irradiancia se promedia en la superficie se reduce en un 170 W/m² aproximadamente (WEC, 2013). No obstante, el flujo de irradiancia cambia de un lugar a otro. Algunas partes del planeta tierra reciben mucho más del promedio anual. Se ha demostrado que las aplicaciones de la energía solar son económicamente atractivas y no se limitan únicamente a las regiones más soleadas. Los países del norte de Europa son el mejor ejemplo (ver capítulo 2).

$$G = E/St = P/S \quad (3.2)$$

Donde:

G: irradiancia solar [W/m²]; **S:** área [m²]; **t:** tiempo [s]; **P:** potencia [W] y **E:** energía [Ws], la energía se expresa de la siguiente manera **E=Pt** .

Otro concepto que se utiliza en los sistemas FV es la irradiación definida como la densidad de energía acumulada o recibida en la unidad de tiempo, es decir, es la irradiancia acumulada sobre la superficie en la unidad de tiempo.

$$H_s = Gt \quad (3.3)$$

Donde:

H_s : irradiación [Ws/m^2]; **G** : irradiancia solar [W/m^2] y **t** : tiempo [s].

Cabe mencionar que la radiación solar se clasifica en tres tipos (directa normal, difusa y global). Sin embargo, para las instalaciones FV la que interesa es la radiación global que es la suma de la radiación directa normal con la radiación difusa (refractada más la reflejada) y tiene mayor contribución la directa normal por ser la que incide sobre la superficie con un ángulo preciso, sin desviarse o absorberse por las moléculas en el aire.

Los datos de medición de radiación solar están disponibles en un gran número de lugares localizados en todo el mundo. Entre las organizaciones internacionales que proporcionan datos de radiación solar en todo el mundo están: la NASA (NASA, 2017), The World Radiation Data Center (WRDC, 2017) en San Petersburgo, Rusia. The World Meteorological Organization (WMO, 2017) y the National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2017). En el caso de México se tienen disponibles mapas de radiación solar en el Inventario Nacional de Energías Renovables de la Secretaría de Energía (INERE, 2017) y en el Laboratorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2017).

3.5.2 Eficiencia de la celda FV

La eficiencia de conversión de energía de la celda FV es la relación que tiene la cantidad de irradiación solar entrante que se convierte en electricidad. La fórmula que define la eficiencia de conversión del módulo FV es:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{V_m I_m}{G \times S} \quad (3.1)$$

Donde:

η : eficiencia [%]; P_{max} : es la potencia máxima producida por el módulo [W]; I_m : corriente máxima [A]; V_m : voltaje máximo [V] y P_i : es la potencia de la irradiación incidente [W], definida como el producto de la irradiancia G [W/m²] por la superficie S [m²] de la celda solar.

Las eficiencias máximas son mediciones que se efectúan en condiciones estándar, en el estudio realizado por Green et al. (2016), las eficiencias que se muestran están estandarizadas bajo los siguiente lineamientos espectro AM 1.5, irradiancia de 1000 W/m² y temperatura de 25°C.

3.5.3 Factor Forma de la celda FV

El Factor de Forma, es la relación de la potencia máxima generada en la celda con la corriente en cortocircuito y el voltaje en circuito abierto de la celda.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (3.4)$$

Donde:

FF : Factor de Forma; P_{max} : Potencia máxima [W]; I_{sc} : Corriente de cortocircuito [A] y V_{oc} : Voltaje de circuito abierto [V].

3.5.4 Tiempo de vida útil

El tiempo de vida útil del sistema depende de sus componentes principales. Los componentes que conforman un sistema FV de forma general son:

-Módulos FV: Es el componente principal de un sistema FV, a pesar de que existe una gran variedad de tecnologías y fabricantes, el rango de vida útil de los módulos se encuentra dentro de 20-30 años (Varun et al., 2009; Singh, Pant & Olsen, 2016).

-Inversor: En sistemas FV residenciales y de baja capacidad los años de vida de los inversores se encuentran entre 10-15 años dependiendo del fabricante, considerando estos años para un sistema de 30 años será necesario ocupar 2 o más equipos. En la literatura se consideran 15 años de vida para los inversores (Jungbluth et al., 2012).

-Estructura de montaje: En sistemas FV instalados en techo las estructuras ocupadas son fabricadas de acero y aluminio su tiempo de vida estimado es mayor a los 30 años considerando un adecuado mantenimiento.

-Instalación eléctrica: Una instalación eléctrica utiliza varios materiales, pero el cableado representa la mayor parte. La utilización del cable en un sistema FV debe de tener características específicas que ayuden a mantener la instalación en buen estado por un largo período, algunas empresas ya se dedican exclusivamente a esta tecnología y proporcionan años de duración del material por más de 30 años (TopCable, 2017).

La vida útil para el sistema FV se espera que sea de al menos 20 años y hasta 30 años. En la literatura se han encontrado estudios con diferentes rangos de vida, pero el valor más utilizado es de 30 años y es recomendado en el reporte IEA-PVPS Task 12 (Fthenakis et al., 2011).

3.5.5 Rendimiento Global

Los parámetros propios del SFV utilizados para caracterizar y comparar los sistemas fotovoltaicos independientemente de las condiciones ambientales son descritos a continuación:

Productividad Final (Y_F): Es el cociente entre la energía útil producida por la instalación durante un determinado período de tiempo ($E_{SFV,t}$) y la potencia nominal del sistema fotovoltaico ($P_{SFV,STC}$) en condiciones estándar de medida:

$$Y_F = \frac{E_{SFV,t}}{P_{SFV,STC}} \quad (3.5)$$

Productividad de Referencia (Y_R): Es el cociente entre la irradiación solar incidente sobre el SFV durante un determinado período de tiempo (H_{INC,t}) expresada en kWh/m² y la irradiancia solar en condiciones estándar de medida (G_{STC}= 1 kW/m²)

$$Y_F = H_{INC,t} / G_{STC} \quad (3.6)$$

Rendimiento Global (PR) o Performance Ratio (PR): Es un factor que representa el rendimiento energético de la instalación. Relaciona la energía útil generada por la instalación con la energía disponible teóricamente.

$$PR = Y_F / Y_R \quad (3.7)$$

El Rendimiento Global tiene en cuenta la dependencia de la eficiencia de los módulos FV con la temperatura, las pérdidas por efecto Joule en el cableado, las pérdidas por dispersión de parámetros de los módulos FV, las pérdidas por errores en el seguimiento de máxima potencia, el rendimiento del inversor, por mencionar algunos.

El PR está situado entre 0.7-0.86 para celdas de silicio y para celdas de silicio amorfo el valor está entre 0.5-0.7 (Moro, 2010; Green et al., 2016). En los estudios de ACV existentes el PR más utilizado es del 0.75 para sistemas fotovoltaicos instalados en techo y de 0.8 para sistemas fotovoltaicos instalados en suelo (Mason et al., 2006; Fthenakis et al. 2008; Pfatischer 2008).

3.5.6 Tiempo de generación de energía eléctrica

Los parámetros que se vieron anteriormente son los que definirán la electricidad generada por el sistema FV durante su tiempo de vida útil (Bekkelund, 2013). La cual se describe mediante la siguiente ecuación:

$$G = H_S \times \eta \times PR \times L \quad (3.8)$$

Donde:

G: Generación eléctrica a lo largo de la vida útil del sistema FV; **H_s :** es la irradiación directa normal [kWh/m² /año]; **E:** Eficiencia del módulo FV [%]; **PR:** Factor Rendimiento [%]; y **L:** Tiempo de vida útil del sistema FV [años].

3.6 Modelos de sistemas solares fotovoltaicos

La facilidad de conectar un sistema solar FV en cualquier lugar donde se tenga acceso a la radiación solar ha hecho que los sistemas FV sean de fácil acceso y tengan diferentes modelos de instalación. Aquí únicamente se mencionan los sistemas autónomos y sistemas interconectados con la red eléctrica por ser los comúnmente utilizados en estudios de análisis de ciclo de vida (Hsu et al., 2012).

-Sistema autónomo también llamado modo isla. No tiene ninguna conexión con la red eléctrica y en consecuencia necesita suministrar toda la energía que requiere la carga del sistema. Normalmente son instalaciones dedicadas al sector doméstico, señalización terrestre, marítima, telecomunicaciones y puntos de demanda de electricidad alejados de zonas electrificadas. Una de las características principales de un sistema aislado es que requieren de baterías para almacenar energía cuando las celdas no pueden proporcionarla.

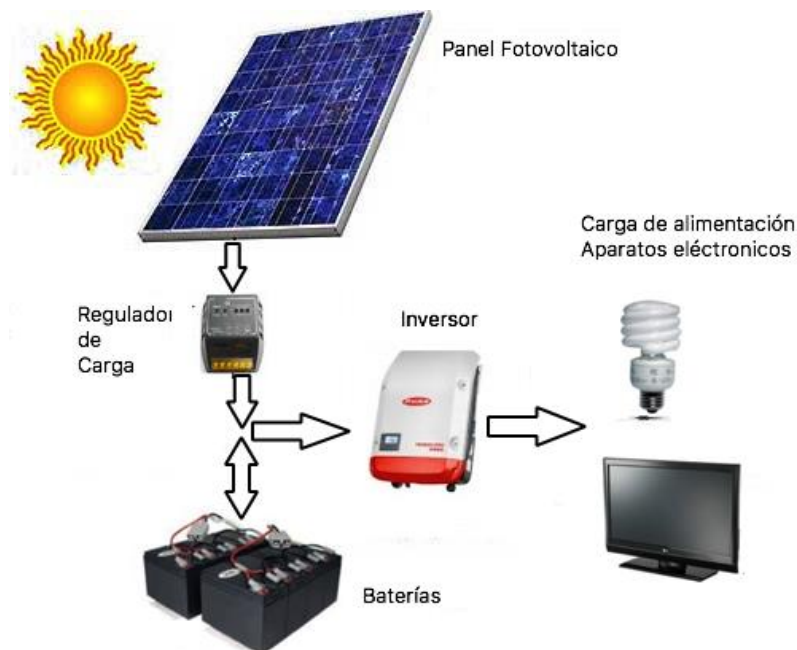


Figura 3.5 Sistema autónomo. Fuente: Propia

-Sistema interconectado a la red: se encuentran conectados a una red eléctrica, tienen la capacidad de abastecer su propio consumo. Ahora bien, cuando la energía generada es mayor que la de consumo, se entrega el sobrante a una central eléctrica por medio de la red de distribución eléctrica, recíprocamente cuando el consumo es mayor que la generación se recurre a la red eléctrica para que suministre el restante.

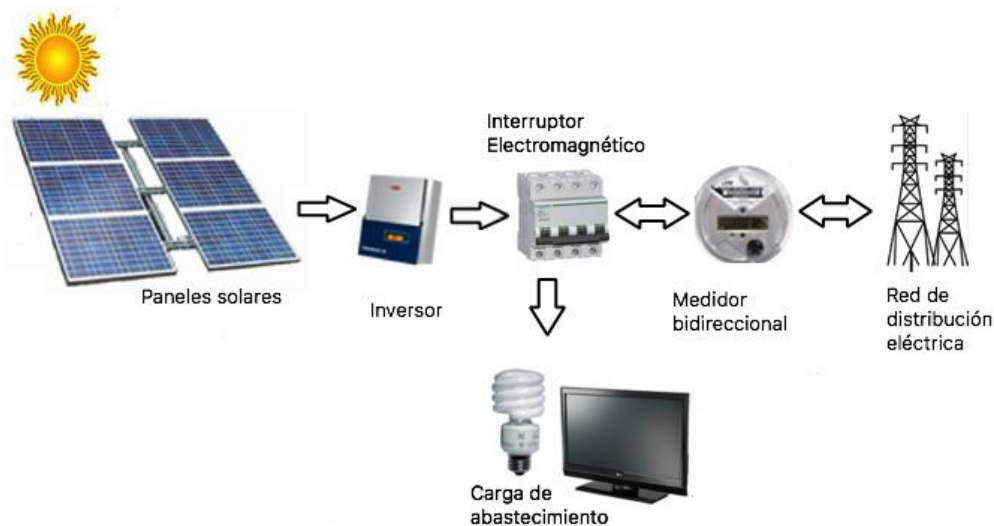


Figura 3.6 Sistema interconectado a la red. Fuente: Propia

3.7 Tipos de instalación

Hay diferentes formas de instalar un sistema solar FV, entre las más usuales se encuentra la instalación en azotea, fachada de construcción y campo abierto en suelo.

Instalación en azotea: este tipo de instalación comúnmente se ocupa en instalaciones residenciales y su capacidad no es más de 3 kWp. Las instalaciones en azotea se diferencian por el tipo de montaje debido a que en ocasiones la construcción ya tiene una cierta inclinación o son azoteas planas y requerirán estructuras para la inclinación de los paneles.

Instalación en fachada: su característica principal es que son utilizados en construcciones de edificios industriales o de negocios, su instalación se diferencia entre montaje superficial en la construcción o integración en la construcción.

Instalación en campo abierto: regularmente son instalaciones de grandes dimensiones y capacidades superiores a los 3 kWp, éstas pueden ser de montaje fijo o de movimiento. Cuando son construidas para movimiento es para aumentar su rendimiento. Sin embargo, son instalaciones con altos costos que no se justifican con el aumento en su rendimiento (Jungbluth et al., 2012).

Al realizar estudios de análisis de ciclo de vida, debe diferenciarse el tipo de instalación del sistema FV, dado que la distinción entre una instalación de azotea, fachada o campo abierto varía en las características del material utilizado para su montaje.

En este capítulo se describieron las características y el funcionamiento de un sistema fotovoltaico, esto con la finalidad de familiarizar al lector con los términos utilizados en el documento. En el siguiente capítulo se hablará de la metodología que se escogió para la evaluación de los impactos ambientales potenciales propuesto para el presente estudio.

4. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

Los impactos ambientales causados por la generación eléctrica con combustibles fósiles son muy superiores a los de la generación con energías renovables, a lo largo de los años se han hecho estudios que demuestran una estimación cuantitativa del nivel de contaminantes emitidos por las diferentes fuentes en la generación eléctrica (Singh, 2013). Entre los estudios realizados varios han sido con la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV), por ser una de las herramientas que considera todos los impactos potenciales ocasionados por un producto desde la extracción de la materia prima hasta el fin de su vida útil, en ocasiones al final de la cadena se hace una valoración del residuo para ser gestionado adecuadamente.

La metodología del análisis del ciclo de vida es la herramienta utilizada en este estudio para determinar los impactos ambientales potenciales que ocasionaría una planta de generación solar fotovoltaica. Con la finalidad de comprender el funcionamiento de la metodología en este capítulo se describe parte de su historia, los principios básicos por los cuales se rige el ACV, la evolución que ha transcurrido desde sus inicios y las herramientas que existen para la realización de un estudio de este tipo. También se incluye una introducción al ACV aplicado a sistemas fotovoltaicos (SFV), con el objetivo de fundamentar la información existente hasta el momento sobre ACV de SFV.

4.1 Antecedentes históricos del análisis del ciclo de vida

Los primeros estudios del ACV reconocidos fueron a finales de 1960 y principios de 1970, hechos con el fin de cuantificar las necesidades de recursos, flujos de residuos de diferentes bebidas y emisiones contaminantes, el estudio se desarrollo por el Midwest Research Institute (MRI) para la Coca-Cola Company en 1969; cerca de los mismo años, en Europa se desarrollaron estudios de ACV por Sundström (1971) y Baslr & Hofman (1974) en Suiza (Guinée, 1995). Nuevamente en el año 1974 en Estados Unidos el Instituto de la Agencia Internacional de Protección Ambiental desarrollo un estudio de ACV como lo conocemos hoy (Bauman and Tillman, 2004; Guinée et al., 2011).

En el período 1970-1990 la metodología del ACV se incrementó pero sin tener discusiones científicas internacionales y plataformas de intercambio de información, no se tenía un marco teórico en común pero se convirtió en una herramienta utilizada comúnmente en áreas de producción de productos y mercadotecnia. Los resultados obtenidos diferían en gran medida, incluso cuando los objetos del estudio eran los mismos, lo que impidió que el ACV se convirtiera en una herramienta analítica más aceptada y aplicada (Guinée et al., 1993). Aunado a esto, los primeros estudios de ACV le dieron mayor importancia a los consumos de energía en todo el proceso sin importar la generación de residuos y emisiones contaminantes. Lo que hace suponer que la crisis mundial del petróleo en la misma época tuvo participación para buscar metodologías que proporcionaran información del consumo de energía en las etapas de producción de los productos (Cámbara, 2012).

En la década de los noventa varias organizaciones científicas tuvieron interés en realizar actividades, talleres y foros para discutir acerca de la metodología del ACV fueron liderados por la SETAC (por sus siglas en inglés “Society of Environmental Toxicology and Chemistry”). Incluso aparecieron las primeras publicaciones del ACV en revistas científicas. En 1993 se formuló el código internacional: Código de prácticas para el ACV con el que se intentó que todos los estudios siguieran una misma metodología, fue en esta década donde en todo el mundo se desarrollaron manuales y guías para el ACV (ILV et al., 1991; Grieshammer et al., 1991; Lindfors, 1992; Heijungs et al., 1992; Vigon et al 1993; Lindfors et al., 1995; Curran 1996; Hauschild y Wenzel 1998).

La coordinación para establecer la estructura y lineamientos que seguiría el ACV se desarrollaron en conjunto con la SETAC y la ISO (International Standard Organization por sus siglas en inglés), logrando de esta forma estandarizar los términos del ACV (Guinée et al., 1993). No obstante, aún con la normalización, no se evitó que las metodologías para construir un ACV fueran variadas, ocasionando un avance impresionante en diferentes aplicaciones.

En el año 2002, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) y la SETAC pusieron en marcha una Asociación Internacional del Ciclo de Vida, conocida como Iniciativa de Ciclo de Vida (UNEP & SETAC, 2004). Los primeros libros de cómo elaborar un ACV comenzaron a publicarse (por ejemplo, Guinée et

al., 2002; Baumann & Tillman, 2004). En la misma década la metodología tuvo discrepancias en sus opciones y resultados, puesto que se empezaron a extender estudios tratando de abarcar más enfoques relacionados con repercusiones económicas y sociales (Clift & Druckman, 2016).

Actualmente se tiene el problema de cómo integrar los nuevos enfoques en la metodología, es un desafío hacer una herramienta que involucre las necesidades más recientes en campos económicos y sociales; para ello se requieren acciones y toma de decisiones para plantear cómo considerar las causas y consecuencias económicas y sociales en un estudio (Curran, 2012). En la literatura ya se encuentran estudios donde se involucran las tres repercusiones (ambiental, económica y social) llamado Análisis de Sustentabilidad del Ciclo de Vida (Guinée et al., 2011). Se prevé un aumento que promoverá al ACV como una herramienta absoluta que contribuya a la solución de problemas en el marco de desarrollo (UNEP & SETAC, 2004). Es así como después de más de treinta años la metodología del ACV se volvió en una de las más extendidas y utilizadas a nivel mundial. Logrando estudios más detallados y con aplicaciones en varios sectores industriales, gubernamentales, regionales y de servicio (Hellweg and Milà i Canals, 2014).

4.2 Concepto de Análisis del Ciclo de Vida

Las primeras definiciones del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) aparecieron durante los años noventa, cuando se buscó homogeneizar una estructura de trabajo.

La SETAC definió al ACV como “un proceso para evaluar las descargas ambientales asociadas con un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando los materiales y la energía utilizada y los últimos residuos liberados al ambiente; para evaluar el impacto del uso de esos materiales, energía y descargas al ambiente; para identificar y evaluar oportunidades de realizar mejoras ambientales” (Azapagic, 1999).

La norma ISO 14040:1997 refiere a la metodología del “ACV como una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas,

interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

Los conceptos en los que se fundamenta el ACV ayudan a entender que su principal función es conocer y cuantificar los impactos ambientales potenciales producidos por un producto a lo largo de todo su ciclo de vida es decir “desde la cuna hasta la tumba”, para brindar soporte en la toma de decisiones. Entre sus características están que abarca todas las entradas y salidas de materia y energía asociadas a cada una de las etapas del ciclo de vida del producto como consecuencia del uso de los recursos consumidos y los desechos arrojados al medio ambiente (ver Figura 4.1). Con la intención de que se evalúen los impactos ambientales potenciales y de esta forma buscar posibles soluciones para reducir el consumo de recursos y los posibles impactos ambientales ocasionados. Lo que diferencia a la metodología del ACV de otros métodos es que considera todas las etapas de un producto desde la extracción de la materia prima hasta su disposición final, en contraste con los demás métodos que se enfocan solamente en los efectos inmediatos que tiene el producto sobre sus alrededores.

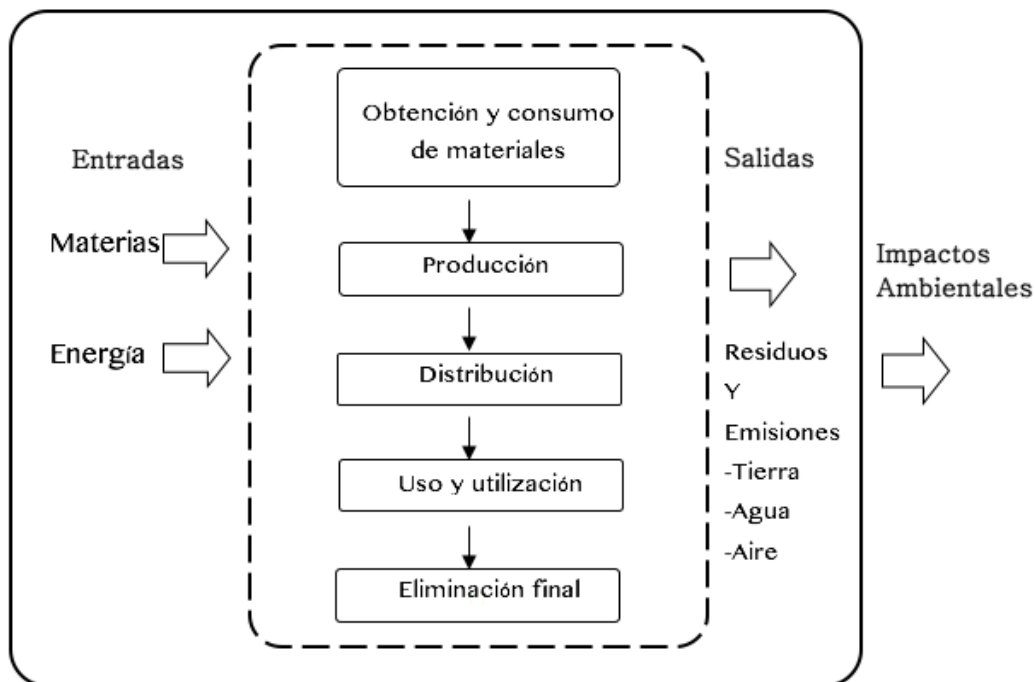


Figura 4.1. Análisis del ciclo de vida de un producto. Fuente: (ISO, 2006; IHOBE, 2009).

4.3 Fases del ACV

Los estudios de ACV se componen de cuatro fases principales ISO 14040:2006 como lo muestra la Figura 4.2.

1. Definición de objetivos y alcance
2. Análisis de inventario
3. Evaluación de impactos
4. Interpretación

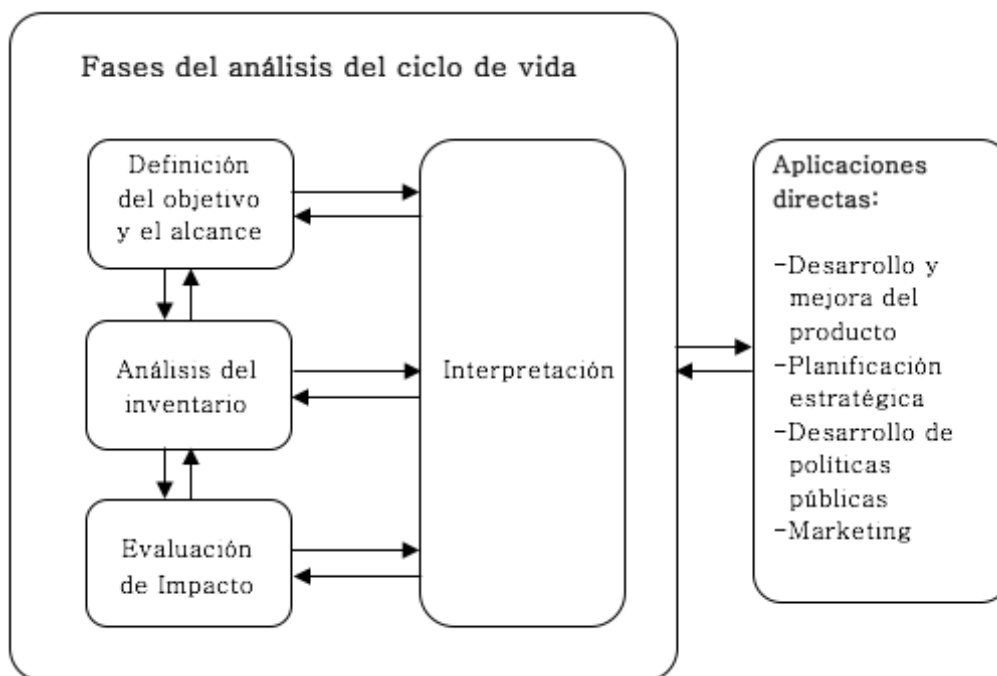


Figura 4.2. Fases y estructura del ACV de acuerdo con ISO 14040:2006. Fuente: (ISO, 2006).

4.3.1 Definición de objetivos y alcance

La primera etapa del ACV es definir un objetivo que identifique las razones por las que se quiere realizar el estudio. Además de establecerse de forma adecuada el contexto del sistema a estudiar; por eso la importancia de definir los límites, la información y calidad de datos a ocupar, la hipótesis inicial y otros puntos importantes que se describen a continuación:

El sistema del producto: conjunto de elementos y procesos unitarios relacionados que permitirán realizar una función. En esta sección se describe el tipo de producto.

La unidad funcional (UF): el propósito fundamental de la unidad funcional es proporcionar una referencia a la cual se relacionan las entradas y salidas (ISO, 2006). La unidad funcional desempeña un papel importante ya que sirve para comparar diferentes sistemas que tengan la misma unidad funcional y normalmente se considera una unidad de tipo físico.

Límites del sistema: el sistema de estudio está conformado por procesos unitarios y para el ACV deben establecerse las fronteras del sistema. Es decir que se tendrán que definir los procesos que se considerarán dentro del estudio. Los límites del sistema también deben contemplar otros factores como son límites geográficos, límites económicos y la disponibilidad de información.

Las reglas de asignación de las cargas ambientales: la mayoría de los sistemas producen más de un producto al final de su ciclo, por lo cuál es necesario hacer una asignación de las cargas ambientales totales del sistema entre los productos derivados.

Las categorías de impacto y metodología de evaluación de impacto: la norma ISO define de forma implícita tres áreas de protección. Como categorías de impactos finales (salud humana, entorno natural y recursos renovables). Entre las categorías de impacto se encuentran: cambio climático, efecto invernadero, agotamiento de ozono troposférico, lluvia ácida, eutrofización, toxicidad, agotamiento de recursos, consumo de energía, y otras más. Dependiendo de la metodología de caracterización de categorías de impacto que se ocupe (Eco-indicador 99, CML2001, Traci, Recipe2008, IMPACT2002, por mencionar algunos) serán las categorías de impacto e indicadores que se consideraran.

La calidad de los datos: La calidad e incertidumbre de los datos utilizados en el ACV influirán en la interpretación de los resultados. Diferencias en los datos de entrada pueden causar diferencias en el alcance, límites geográficos e

interpretación de los resultados. Por eso es necesaria la transparencia en los datos utilizados y los que por alguna razón no se tengan hay que justificar e indicar por la falta de información.

Las hipótesis consideradas: La hipótesis se formulará desde un inicio, guiando el estudio hasta conseguir los resultados. Al final del estudio se comprobará su certeza.

La norma ISO 14040:2006 establece que el alcance debe de estar suficientemente bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido. Asimismo, se puede describir al ACV como un proceso iterativo que permite redefinir los alcances a lo largo de todo el análisis con base en los conflictos que se tengan al conseguir la información.

4.3.2 Análisis de Inventario

El análisis de inventario es una lista cuantificada de todos los flujos entrantes (materia y energía) y salientes (emisiones y residuos) del sistema durante toda su vida útil. Es la parte más laboriosa del ACV, debido a la cantidad de datos a considerar.

En esta fase se recopilan los datos de las entradas y las salidas del sistema por unidad funcional y se calculan los balances de materia y energía del sistema estudiado. Las limitaciones prácticas en la recopilación de los datos y los límites del sistema deben tenerse en cuenta en el alcance y documentarse en el informe del estudio. Conforme a la norma ISO 14040:2006 hay tres tipos de datos que se pueden recopilar:

- Los datos obtenidos por mediciones directas, realizadas por el analista o proporcionadas directamente por el fabricante.
- Datos de estudios anteriores que se encuentren disponibles en la literatura científica y en bases de datos. Este tipo de datos tienen la seguridad de haber sido revisados con anterioridad y puede ser que ya estén siendo utilizados en varios procesos similares al de estudio.

–Datos estimados con base a análisis anteriores. Este tipo de datos serán los que presentarán mayor incertidumbre, sin embargo en ocasiones será necesario aplicarlo por falta de información.

La parte complicada es cuando se tienen subproductos o reciclaje en algunos de los procesos, ya que se tienen que dividir y asignar los flujos principales de materia, energía y residuos; ya sea por proporción de carga, masa o económico (Cámbara, 2012).

Los límites del sistema dependen del alcance del estudio, pero a medida que se recopilan los datos y se aprende más del sistema, se identifican nuevos requisitos o limitaciones, lo que causará cambios en el objetivo y alcance del sistema. Estos cambios tienen que analizarse de forma que no se pierda la orientación del estudio.

4.3.3 Evaluación de impacto

Los resultados del análisis de inventario son analizados para identificar y caracterizar los impactos ambientales potenciales que el sistema estudiado tiene sobre el medio ambiente. Esta fase del ACV conforme a lo explicado en la norma ISO14040:2006 asocia los datos del inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías. Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados obtenidos por el inventario; la fase de evaluación tiene diferentes pasos a seguir en la Figura 4.3. se muestran cuales son obligatorios y opcionales.

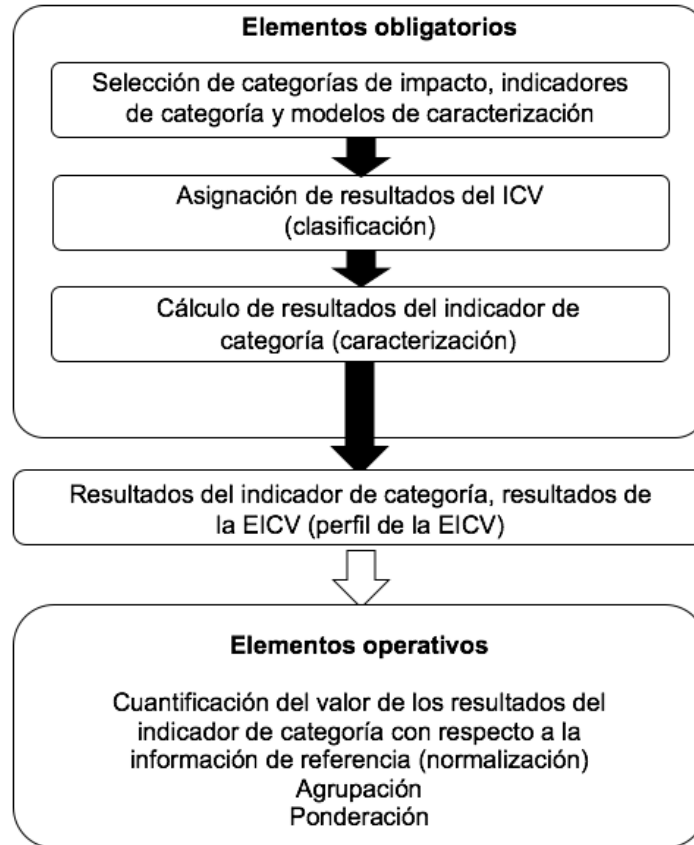


Figura 4.3. Elementos de la Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV). Fuente: (ISO, 2006).

Los elementos de la evaluación de impactos se agrupan en dos bloques los obligatorios y los opcionales. En los obligatorios se encuentran la selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización, la clasificación y la caracterización.

Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización. Existe una amplia variedad de categorías de impacto y cada metodología (entre las más utilizadas están: Eco-indicador99, CML2001, Traci y Recipe2008) tiene sus propias categorías y sus indicadores asociados, hasta el momento ninguna metodología ha sido aceptada como la mejor para asociar de forma coherente y exacta los datos de inventario con los impactos ambientales potenciales específicos (Hauschild and Huijbregts, 2016). Una de las limitaciones de la fase de evaluación de impactos es la calidad de los datos

proporcionados por el análisis de inventario, para evitar incongruencia de los resultados con los indicadores de categoría se tienen que mencionar correctamente los límites que se tuvieron al recaudar los datos en el inventario, así como los procesos unitarios incluidos y excluidos.

Clasificación: Los datos resultantes del análisis de inventario se asignan en diversas categorías en función de los impactos ambientales seleccionados.

Caracterización: Se establece la relación directa entre el inventario ambiental y las categorías de impacto.

Los elementos opcionales establecidos en la ISO14040:2006 son: la normalización, agrupación, ponderación y análisis de la calidad de datos. Se identifican como opcionales por tratar de poner los resultados en contexto, es decir conocer las proporciones para cada categoría de impacto de un sistema bajo estudio

Normalización: El principal objetivo de la normalización es relacionar las cargas ambientales de un producto con las cargas ambientales de su entorno (Lindeijer, 1996). La normalización ayuda a que los valores obtenidos en la caracterización, que están expresados en diferentes unidades se trasladen a una magnitud adimensional que permitan su interpretación y comparación con otros sistemas.

Agrupación: Clasifica las categorías de impacto en grupos de impacto similar o por categorías.

Ponderación: Presenta indicadores que sirvan para la comparación con otros sistemas. Para obtener un indicador global de impacto se requiere del factor de ponderación, que expresa la contribución de la categoría de impacto escogida al impacto total.

Análisis de la calidad de datos: Lo que se pretende lograr es tener resultados fiables y con menor incertidumbre. Al comparar sistemas es necesario cumplir con esta etapa.

4.3.4 Interpretación de resultados

La fase de interpretación compila toda la información obtenida en las fases anteriores del ACV y proporciona resultados que sean coherentes con el objetivo y alcance definido para el estudio, con la finalidad de plantear las conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones.

En esta fase se detectan los puntos críticos del sistema estudiado, percibiendo los puntos de mayor impacto ambiental y haciendo las recomendaciones pertinentes para la mejora del sistema. También se describen las limitaciones que se tuvieron durante el desarrollo del sistema y las recomendaciones para futuros estudios. En esta fase se realizan verificaciones y calidad de datos para obtener una evaluación concisa y si es necesario aplicar estudios de sensibilidad y coherencia para comprobar la fiabilidad de las respuestas dadas.

4.4 Metodologías de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

Los métodos de evaluación se dividen en dos grupos: enfoque orientado al problema y enfoque orientado al daño. Los enfoques orientados al problema también conocidos como enfoques de punto medio (midpoint) se encuentran cercanos a la intervención ambiental. Es decir ofrecen como resultado indicadores informativos más detallados con los que se sabe en que punto es afectado el medio ambiente. Las categorías de impacto para este enfoque son diversos pero podemos mencionar algunos como son la acidificación, potencial de calentamiento global, eutrofización, destrucción de la capa de ozono y otros más. Por otro lado, los enfoques orientados al daño o enfoques de punto final (endpoint) modelan el daño último causado por los impactos ambientales a las áreas de protección. Las categorías de impacto para esta fase no se encuentran bien definidas pero tiene indicadores para la salud humana, entorno natural, entorno socio-cultural y recursos naturales (Hauschild & Huijbregts, 2016).

4.5 Aplicaciones del ACV

La metodología del ACV se puede aplicar a cualquier tipo de producto, servicio y proceso donde se deseen conocer los impactos ambientales causados por el producto o actividad realizada y así tomar decisiones conforme a los intereses de los involucrados, considerando el objetivo principal del estudio (Hellweg & Milà i Canals, 2014).

Entre los actores involucrados en el ACV, es posible encontrar desde organizaciones gubernamentales, empresas, instituciones públicas o privadas, investigadores, consultores y una gran variedad de personas interesadas en aplicar la metodología (UNEP & SETAC, 2004).

Diversas personas interesadas han utilizado esta herramienta del ACV dándole cada quien un uso estratégico para la toma de decisiones relacionados con sus productos o servicios. En algunas empresas se ha vuelto una herramienta que ha ayudado a reducir costos y optimizado productos en el mercado. Asimismo, resulta ser una metodología que ayuda a comparar y a competir, proporcionando información de los impactos ambientales potenciales causados en diferentes partes del proceso y de esta manera conseguir disminuirlos, recibiendo reconocimientos, certificaciones y sellos ambientales o etiquetas ecológicas (Hellweg & Milà i Canals, 2014).

4.6 Herramientas para la elaboración de un ACV

Existe una gran variedad de herramientas para realizar un ACV. Las cuales se han ido perfeccionando a lo largo de los años. Sin embargo, hasta el momento en la norma ISO 14044:2006 no se especifica que herramienta es la mejor para conocer los impactos ambientales, ni tampoco menciona que bases de datos de inventario podrían presentar la mejor información. Lo que significa que deja la decisión en quien realice un estudio de ACV.

4.6.1 Bases de datos

Las bases de datos (BD) son de gran utilidad para desarrollar un ACV, ya que no siempre se encontrarán disponibles todos los datos de un sistema. Por esa razón las bases de datos proporcionan información complementaria que facilitan la evaluación.

Las bases de datos contienen información organizada, dependiendo del contexto para su uso y del sector. En el caso del ACV las BD se dividen en dos tipos: la base de datos de inventario del ciclo de vida (ICV), y la base de datos de metodologías para la evaluación de impactos (ver Figura 4.4).

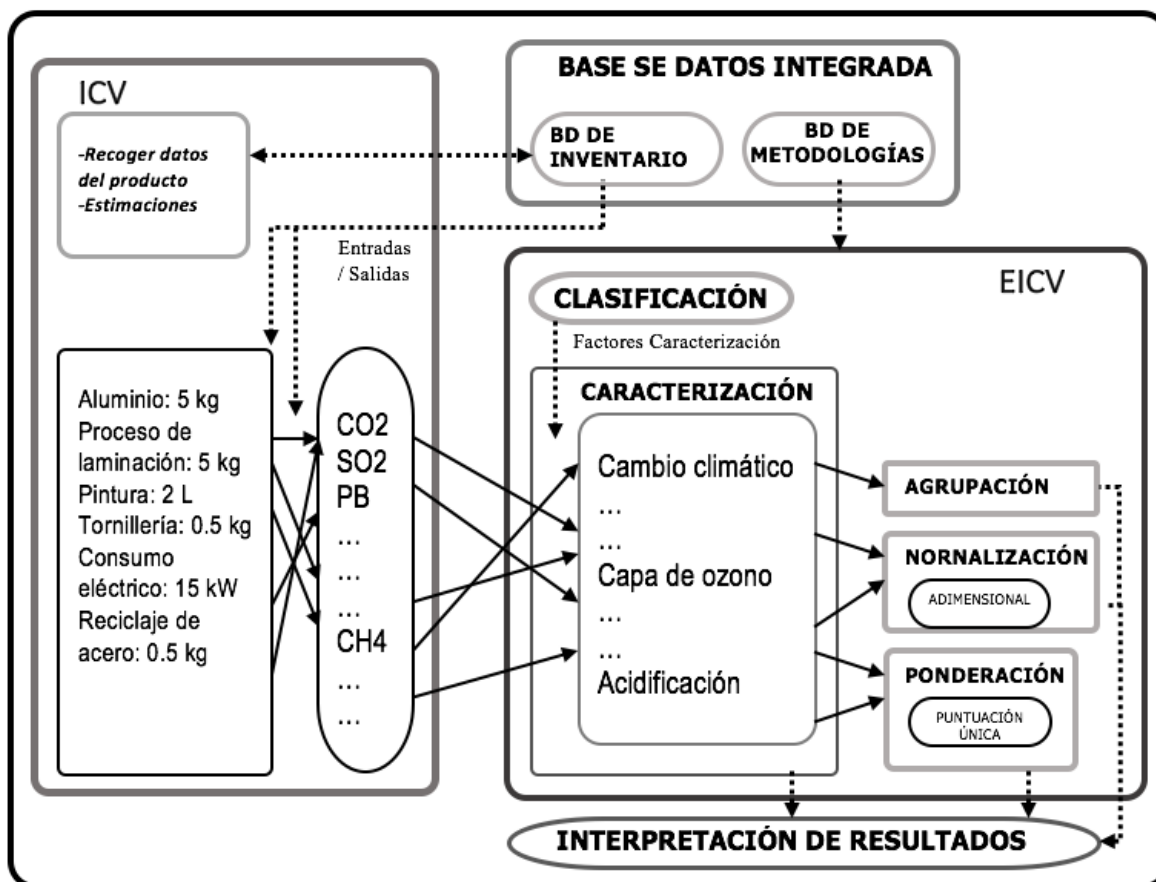


Figura 4.4. Relación entre las bases de datos y el análisis de ciclo de vida. Fuente: Modificado de IHOBE (2009).

La BD de ICV son bases con información de productos, incluyen entradas y salidas para realizar la modelización del sistema de análisis. Las entradas y salidas que incluyen estas BD son materiales, energía, características de materiales específicos para algunas industrias, información general de procesos, entre otros contenidos. Estas BD son utilizadas a nivel mundial y son actualizadas continuamente. Algunas de los BD más comunes en ACV son Ecoinvent, DEAM, GEMIS, IDEMAT y Umberto.

La BD de metodologías: están diseñadas para llevar a cabo la obtención de resultados, en general estos métodos se utilizan en la fase de Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV), contiene factores de caracterización, clasificación, ponderación y normalización para dar enfoque a los resultados. Entre las bases de datos más relevantes se encuentran CML 2001, Eco-Indicador99, EPS 2000, EDIP, TRACI, IMPACT 2002+ y SimaPro.

4.6.2 Software

El estudio presentado en el siguiente capítulo se lleva a cabo con el software GaBi. El software tiene la facilidad de modelar cualquier tipo de producto, por ejemplo, un teléfono o la construcción de un aeropuerto; se encuentra entre las plataformas más completas para realizar estudios de ACV con más de 20 años de experiencia (GaBi, 2017). La plataforma de GaBi facilita agregar otros datos como costo económico (Life Cycle Costing) o información de impacto social a un modelo, lo que le permite estar a la vanguardia con la evolución de la metodología ACV.

Las bases de datos de inventario incluidas en el software son Ecoinvent, GaBi y U.S. LCI, entre las más conocidas. En el presente estudio consideraremos la información que se encuentra en la BD Ecoinvent, en donde se encuentra una gran variedad de procesos y datos de toda clase de producto y sistema. La BD de Ecoinvent ha llegado a conformar un inventario de sistemas solares fotovoltaicos muy extenso y brinda la facilidad de desagregar procesos para modificarlos conforme a las necesidades del sistema a elaborar (Jungbluth et al., 2012; de Wild-Scholten, 2013).

Los métodos con los que la plataforma cuenta para realizar la evaluación de impactos son TRACI, CML.

4.6.3 Metodología CML 2001

La metodología del Center of Environmental Science of Leiden University (CML) es considerada entre los primeros métodos de evaluación de los impactos ambientales en ACV desde principios de los años 90 (Hauschild & Huijbregts, 2016). El método propone una lista de categorías de impacto (mid-point) clasificados en tres grupos según el tipo y finalidad de acuerdo la norma ISO 14040:2006; para los elementos opcionales del EICV propone la

normalización dando valores de referencia para la normalización de indicadores de las categorías de impacto. Las categorías de medio punto que se encuentran en la base de datos son:

Acidificación: (Acidification Potential-AP). Es el proceso de introducción de sustancias ácidas en el medio ambiente provocado por las emisiones a la atmósfera de dióxido de azufre (SO₂), óxidos nitrosos (NO_x) y amoníaco (NH₃) causadas principalmente por la quema de combustibles fósiles.

Cambio Climático: Para el cambio climático se representan con el potencial de calentamiento global (Global Warming Potential-GWP), proceso de aumento gradual de la temperatura del planeta como consecuencia de la alta concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera; el rápido incremento se debe a procesos de la actividad humana como son: la combustión de carburantes fósiles y la deforestación, entre otros. Dentro de la clasificación de los GEI se consideran: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y ácido nitroso (N₂O).

Consumo de recursos abióticos: (Abiotic Resource Depletion Potential-ADP). Son aquellos elementos inertes, sin vida. Lo que implica que no tienen la capacidad de reproducirse. Tampoco pueden reponerse en un tiempo previsible para el humano. Son considerados no renovables debido a que se agotan en la medida que se extraen de la naturaleza. Por lo tanto el ADP representa a los minerales y combustibles fósiles.

Disminución de la capa de ozono: (Ozone Depletion Potential-ODP). Se refiere a la reducción de la capa de partículas de ozono presente en la estratosfera. La importancia del ozono es por su capacidad de absorber parte de la radiación ultravioleta evitando la exposición de los seres humanos. Las emisiones de clorofluorocarbonos son los principales responsables de la disminución

Toxicidad y Ecotoxicidad: (Eco-Toxicity Potential-ETP). Se refiere a los efectos tóxicos producidos por agentes físicos y químicos en el ambiente.

Eutrofización: (Eutrophication Potential-EP). Es el proceso de acumulación de nutrientes en el agua, consiguiendo el crecimiento masivo de organismos como las algas y la disminución de la concentración de oxígeno.

Oxidación fotoquímica: (Photochemical Oxidant Formation Potential-POCP). Provocada por altas concentraciones de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV) acompañados de una fuerte radiación solar. En estas circunstancias se generan concentraciones de ozono superficial.

4.7 ACV en las energías renovables

La producción de energía sustentable basada en fuentes renovables es una tarea desafiante, para reemplazar los combustibles fósiles y conseguir un ambiente más limpio, también para reducir la dependencia de otros países y la incertidumbre del precio del combustible (Singh & Olsen, 2012).

Las energías renovables son reconocidas por sus bajas emisiones contaminantes, aunque no siempre son la opción más factible, ya que aparte de ser amigables con el medio ambiente son intermitentes y varían conforme a las características de la región geográfica, el clima y la disponibilidad del recurso. Por eso la necesidad de realizar estudios de análisis del ciclo de vida (ACV) de los diferentes tipos de sistemas de energía renovable en función de sus condiciones locales, regionales y globales (Singh, 2013). El ACV se ha vuelto una herramienta eficaz para evaluar los impactos ambientales de los sistemas. Donde la preocupación por la seguridad energética, el medio ambiente y el agotamiento de los recursos a nivel mundial buscan un cambio en la forma de generación de energía. En todos los ACV de las energías renovables se ha tratado de incluir cada uno de los pasos de producción de materiales, extracción, procesamiento, transporte, fabricación y utilización; para conseguir gestionar la información de los sistemas y tener un inventario completo. Una de las razones de este trabajo se centra en el ACV de sistemas solares fotovoltaicos por ser una tecnología que tiene poca aportación en la matriz energética de generación eléctrica en México y se considera que puede ser una alternativa recomendable para desplazar a las fuentes fósiles de la generación eléctrica (como se explica en el capítulo 2).

4.7.1 ACV en los sistemas solares fotovoltaicos

La energía solar fotovoltaica se encuentra entre las fuentes de energías renovables con un crecimiento acelerado a nivel mundial en los últimos años (REN21, 2017). No solamente se incrementó su producción, sino también su tecnología ha evolucionado a lo

largo del tiempo, causando una disminución en los costos de producción explicado previamente en el capítulo 2.

Los estudios de ACV en energía fotovoltaica llevan una larga trayectoria de más de 20 años (por ejemplo: Palz & Zibetta, 1991; Phylipsen y Alsema, 1995; P. Frankl 1998; Tsuo et al. 1998; Kato, 1999; Fthenakis et al., 1999; Alsema, 2000a; Knapp & Jester 2000a; Pehnt et al. 2002; Jungbluth et al., 2004; Jungbluth, 2005; Frischknecht et al., 2007a; Jungbluth et al., 2012). En donde se han encontrado datos que han ayudado a estructurar el análisis de inventario desde la extracción de la materia prima hasta el fin de vida de las plantas fotovoltaicas. A pesar de esto, la cantidad de información, resultados y conclusiones han tenido rangos de estudio y objetivos variados. En artículos científicos como (Alsema et al., 1998; Jungbluth & Frischknecht, 2000; Hsu et al., 2012; Gerbinet, Belboom and Leonard, 2014) investigaron y resumieron las principales diferencias de resultados de ACV en sistemas fotovoltaicos.

Como resultado de la revisión de literatura, se observó que las celdas de silicio son las más estudiadas y las celdas de película delgada en menor medida. Los parámetros con mayor relevancia en los estudios son la irradiación, el tiempo de vida, la eficiencia, tipo de montaje y rendimiento de los sistemas como lo muestra la Tabla 4.1. Los demás componentes (inversor, estructura de montaje y equipo eléctrico) que conforman el sistema fotovoltaico (SFV) a pesar de ser influyentes se siguen omitiendo y en ocasiones no se proporcionan sus características. La Tabla 4.1 incluye en su mayoría estudios hechos en Europa presentando valores promedio anuales de irradiación mayores a los 1000 kWh/m² en su mayoría; mientras que el factor de rendimiento se encuentra por arriba del 0.75 (en el capítulo 3 del presente estudio se define el factor de rendimiento). Actualmente en las recomendaciones que ofrece la IEA-PVPS T12 se menciona que se debe de considerar de 30 años el tiempo de vida del sistema para estudios de ACV por ser un parámetro primordial para un SFV ya que entre más años de funcionamiento tenga la planta menos emisiones de GEI se reportan (Fthenakis et al., 2011). En el estudio realizado por Lenzen et al., (2006) que se muestra en la Tabla 4.1 reporta que para un tiempo de vida de 20 años se tiene una mayor cantidad de emisiones de GEI llegando a los 217 gCO₂e/kWh a pesar de que la irradiación solar sea de 2060 (kWh/m²/año) y un factor de rendimiento de 0.8. Asimismo, se observa en los estudios

reportados en la Tabla 4.1 que existen diferencias en emisiones de GEI reportadas debido a que los parámetros tomados para cada estudio son diferentes como ejemplo se tiene que el factor de rendimiento se encuentra en un rango de 0.75-0.93, la eficiencia de los módulos esta entre el 13-17%, el tipo de montaje varía entre instalación en suelo o azotea y la más importante la irradiación solar es diferente dependiendo de la región donde se instaló el sistema. Como conclusión de lo observado en la Tabla 4.1 se puede decir que no existe un caso ideal que sirva de referencia para comprobar que los resultados obtenidos con la metodología del ACV son exactos.

Aunado a la información presentada en la Tabla 4.1, hay estudios que se centran en indicadores relacionados con el sector energético, como el tiempo de recuperación de la energía (EPBT por sus siglas en inglés), indicadores del cambio climático y las emisiones de CO₂-eq (Gerbinet, Belboom & Léonard, 2014).

Hasta el momento varios autores de los presentados en esta sección siguen proporcionando información y trabajando en conjunto con el propósito de seguir actualizando la información de los sistemas FV (por ejemplo: Fthenakis et al., 2011; Jungbluth et al., 2012; Gerbinet & Léonard, 2014).

Tabla 1.0 Estudios de ACV de sistemas fotovoltaicos con celdas de silicio, incluye parámetros y características de evaluación. Fuente: Modificado de (Hsu et al., 2012).

Autor Unidad	Año (año)	Emisiones de GEI publicadas (gCO ₂ e/kWh)	Irradiación solar (kWh/m ² / año)	Eficiencia de Módulo (%)	Factor de rendimiento	Tiempo de vida (años)	Tipo de montaje (En suelo ó Azotea)	Región
Alsema and de Wild- Scholten	2000	60	1700	13	0.75	30	En suelo	Europa Occidental
		30	1700	15	0.75	30		
		20	1700	17	0.75	30		
Alsema	2006	35	1700	13.2	0.75	30	En suelo	Sur de Europa
Frankl et al.	2005	82	900	13	0.93	25	En suelo	Europa Central
		44	1800	13	0.87	25	En suelo	Sur de Europa
		93	900	13	0.86	25	Azotea	Europa Central
		50	1800	13	0.79	25	Azotea	Sur de Europa

		88	900	13	0.92	25	Azotea	Europa Central
		47	1800	13	0.86	25	Azotea	Sur de Europa
		85	900	13	0.88	25	Azotea	Europa Central
		46	1800	13	0.83	25	Azotea	Sur de Europa
Fthenakis and Alsema	2006	36	1700	13.2	0.75	30	Azotea	Europa
Hondo	2005	53 44	1314 1314	14 14	0.77 0.77	30 30	Azotea Azotea	Japón
Jungbluth et al.	2009	57 62	1117 1117	13.2 13.2	0.75 0.75	30 30	Azotea	Suiza
Lenzen et al.	2006	106 217 53	2060 2060 2060	13 12 14	0.85 0.8 0.9	25 20 30	Azotea	Australia
Pacca et al.	2006	72	1359	12.92	0.95	30	Azotea	Michigan, EUA
Pehnt et al.	2002	102 57	950 1700	13.4 13.4	0.85 0.85	25 25	Azotea Azotea	Europa central Norte de Africa
Pehnt	2006	104	1100	13.4	0.85	25	Azotea	Alemania
Stoppato	2008	20	1697	16	0.83	28	En suelo	Turquía
Tripanagn o-stopoulos	2006	55 51 62	1644 1644 1644	12.4 12.4 12.4	0.85 0.85 0.85	30 30 30	Azotea	Grecia

Los sistemas fotovoltaicos siguen teniendo cambios tecnológicos y aspectos que necesitan evaluarse con mayor profundidad, que involucra principalmente el panel FV, los componentes eléctricos del sistema, impactos económicos y sociales en la región de estudio. Estos cambios continuos que se presentan en los SFV deben de incluirse en el ACV para ayudar a la toma de decisiones a la hora de escoger las mejores tecnologías disponibles y a facilitar un diseño que minimice el impacto ambiental posible de los productos. Por eso se considera al ACV como una herramienta que permite realizar recomendaciones sobre el

diseño, los materiales y procesos involucrados en los sistemas fotovoltaicos, por medio de un análisis de sus principales impactos potenciales a lo largo de todos sus procesos en el ciclo de vida. La idea de realizar un estudio con el ACV para un sistema FV en México tiene que ver con las particularidades que tiene el sistema, ya que como se mencionó un estudio de ACV varía conforme a la región, clima y características propias del sistema.

En este capítulo se exponen los fundamentos de la metodología del ACV, al igual que los avances que se han tenido a lo largo de los últimos años y las herramientas necesarias para su realización. En el caso particular de la metodología del ACV aplicada a SFV se muestran estudios realizados alrededor del mundo principalmente en Europa, a su vez se presentan los parámetros más relevantes de un sistema y los resultados de emisiones de GEI posiblemente ocasionados a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema. Para el caso de México no se tienen estudios de ACV para SFV y de los estudios de ACV realizados para la generación eléctrica en México se tiene el desarrollado por (Santoyo-Castelazo, Gujba & Azapagic, 2011) titulado “ Life Cycle Assessment of Electricity Generation in Mexico” donde nos aproxima a los impactos ambientales posiblemente ocasionados con una matriz energética constituida con el 79% de generación eléctrica con fuentes fósiles, 16.5% fuentes renovables y 4.8% con energía nuclear; con este estudio se tiene un acercamiento a la metodología de ACV en sistemas energéticos para comprender la importancia de su aplicación y de esta forma hacer de la metodología del ACV una herramienta que apoye a la toma de decisiones en México para optar por sistemas de generación eléctrica amigables con el medio ambiente de una forma más integra al considerar los posibles impactos ambientales desde la extracción hasta el fin de vida útil del sistema.

5. Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de un Sistema Fotovoltaico (SFV) instalado para la generación eléctrica en México

En los capítulos anteriores se describió la importancia de realizar estudios de análisis de ciclo de vida para la generación eléctrica y particularmente para los sistemas fotovoltaicos. Asimismo, se expuso el crecimiento acelerado de la generación eléctrica con SFV a nivel mundial, lo cual está demandando estudios que proporcionen información de los posibles impactos ambientales que podrían evitarse o causarse con los sistemas de forma individual comparados con otras tecnologías.

En el caso particular de México y a la reforma energética (ver capítulo 2) que se implementó en el año 2014 para apoyar proyectos de energía sustentables, donde la generación eléctrica con SFV forma parte del crecimiento futuro. Se espera que el análisis y los resultados presentados a continuación ayuden a la toma de decisiones para que la energía solar fotovoltaica forme parte de las opciones más favorables para el crecimiento energético en el país considerando la parte del impacto ambiental, sin dejar de lado los beneficios que representa al ser un recurso que no depende de la volatilidad de precios de los combustibles comparado con la generación de energía con fuentes fósiles. Consiguiendo de este modo minimizar la dependencia de combustibles fósiles para la generación eléctrica de México.

Durante la investigación realizada en la literatura acerca de los estudios de ACV en SFV se encontraron datos que serán empleados para desarrollar un estudio óptimo. En el capítulo anterior se describieron las fases de las que se conforma la metodología del ACV bajo los lineamientos de la norma ISO 14040:2006. Estas fases son las que se seguirán para desarrollar el presente estudio.

5.1 Objetivo del estudio

El objetivo del presente estudio es aplicar la metodología del análisis del ciclo de vida para estimar los impactos ambientales potenciales asociados a un sistema fotovoltaico en México.

El sistema se encuentra instalado en una azotea con estructuras inclinadas, la tecnología de las celdas es policristalina (multi-Si) y la capacidad instalada es de 3 kWp. Una

de las razones por la que se decidió hacer dicho análisis es por su mínima participación en la generación eléctrica del sistema eléctrico mexicano (ver capítulo 2), por lo cual con los datos y resultados que se presenten a continuación se espera aportar argumentos suficientes que ayuden a la toma de decisiones de futuros proyectos que se desarrollen en México.

Por otro lado, el estudio dará a conocer los beneficios ambientales que se tienen al instalar un SFV con tecnología policristalina comparado con otras tecnologías de generación fotovoltaica como lo son las celdas de película delgada.

Además, cabe mencionar que la estructura del sistema empleado aquí servirá para futuros proyectos que con algunas modificaciones podrán obtenerse resultados sin perjudicar el presente estudio.

Por motivos de confidencialidad, la información utilizada en el siguiente proyecto no revelará su procedencia, sin embargo, se mencionan los datos más importantes para la realización del estudio.

5.1.1 Alcance

La investigación del sistema se adaptó conforme a la información recopilada. En el presente estudio se considera un producto “de la cuna a la tumba”, esto significa desde la extracción del material hasta el fin de vida útil de sistema con reciclaje de acero, cobre y aluminio.

5.1.2 Unidad Funcional

El estudio se basa en la unidad funcional de 1 kWh de electricidad, para permitir comparaciones con sistemas encontrados en la literatura y con otros tipos de tecnologías de generación solar fotovoltaica. Los impactos ambientales potenciales también están referenciados a la unidad de 1 kWh.

5.1.3 Vida útil

El sistema fotovoltaico se conforma de los siguientes equipos con tiempos de vida útil diferentes:

- Módulos fotovoltaicos: la tecnología del módulo tiene la capacidad de llegar a los 30 años.
- Inversor: 15 años, el inversor tiene una garantía de 10 años y una capacidad de funcionamiento de 15 años.
- Estructuras: de 30 a 60 años. Las estructuras empleadas en el sistema FV son de acero.
- Cableado: 30 años. Las características del cableado empleado son exclusivas para sistemas fotovoltaicos instalados en techos, a la intemperie y con cambios bruscos de clima.

Los demás accesorios ocupados para la instalación son sencillos de intercambiar y no causan un impacto mayor que los mencionados.

5.1.4 Límites del sistema

El sistema fotovoltaico (SFV) incluye las siguientes etapas, ver Figura 5.2:

- Suministro de las materias primas para cada uno de los procesos
- Transportación en cada una de las fases
- Fabricación de los equipos (celdas fotovoltaicas, inversor, estructura y cableado).
- Instalación del sistema y la transportación de los mismos
- Operación de la planta de generación por 30 años

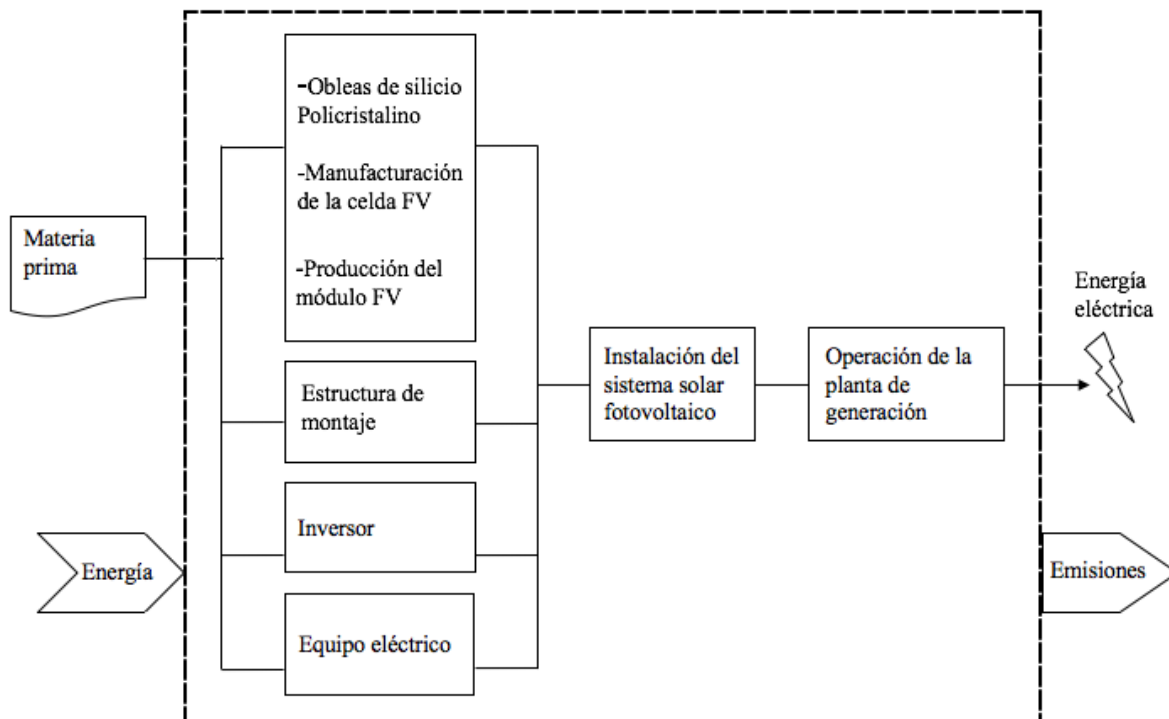


Figura. 5.2. Modelo del Sistema Fotovoltaico para el desarrollo del ACV. El diagrama fue desarrollado considerando los límites, entradas y salidas del sistema.

Anteriormente se mencionó que el alcance del estudio es “de la cuna a la tumba”, considerando que la tumba sea el desmantelamiento de la planta con el reciclaje de componentes de acero, cobre y aluminio. El reciclaje de los elementos internos del panel no se considera por la falta de información en la etapa de inventario; debido a que en estudios anteriores no se encuentra suficiente información y en las bases de datos no se ha considerado esta parte.

El estudio se centra en la generación de electricidad, por tal motivo no se considera la transmisión, distribución y consumo de la energía.

5.1.5 Hipótesis y limitaciones

La facilidad que tiene el ACV de un sistema fotovoltaico es la enorme cantidad de información existente. No obstante, sigue habiendo puntos críticos de análisis, como lo son la variabilidad de información de una región geográfica a otra, el tiempo de vida útil, la recuperación de módulos FV, los rangos de irradiación solar y las características propias del SFV. Aunado a esto, se tiene el rápido avance tecnológico de los módulos FV, donde la tendencia es reducir materiales críticos², proporcionar celdas con mejores eficiencias y componentes con mayor durabilidad. En este caso de estudio se analiza un sistema ubicado en el país de México con mejores eficiencias (14.3%) y diferentes dimensiones que las encontradas en la base de datos Ecoinvent 3.1 y en la literatura (Hsu et al., 2012; Jungbluth et al., 2012; Singh, 2013; Gerbinet, Belboom and Leonard, 2014). Se espera que los resultados proporcionados por este estudio sean una referencia para la aplicación de la metodología ACV en proyectos de generación eléctrica con SFV y por lo tanto sea una opción para conocer los impactos ambientales potenciales que se pueden llegar a generar con un SFV en México.

La base de datos de Ecoinvent 3.1, tiene valores que fueron tomados de la literatura desde la década pasada por ejemplo (Gaiddon and Jedliczka, 2006; de Wild-Scholten & Alsema, 2007) y siguen siendo considerados hasta el momento para estudios de ACV de SFV. Sin embargo, para adaptar la información del modelo contenido en el BD de Ecoinvent 3.1 a las características del modelo presentado en este estudio (Caso Base), se hicieron las modificaciones necesarias con la información existente del Caso Base.

5.1.6 Consideraciones

Para el estudio que se encuentra en la base de datos se hicieron algunas consideraciones en el inventario de SFV (Jungbluth et al., 2012).

² Se consideran materiales críticos aquellos elementos químicos que por sus propiedades físico-químicas están en creciente uso en aplicaciones relacionadas con las nuevas tecnologías y con el desarrollo del sector de las energías renovables; considerar que un material es crítico no es algo estático si no que puede variar con el tiempo en función de su demanda, de factores del mercado o por factores políticos.

- Los cálculos para la producción internacional de electricidad con plantas fotovoltaicas se basan en datos de producción anual publicados por la IEA (Gaiddon and Jedliczka, 2006).
- Se asumió el uso de 20 litros de agua por año y metro cuadrado para el lavado de los paneles (Frischknecht et al., 1996).
- Se consideró una vida de 30 años para todos los módulos fotovoltaicos (de Wild-Scholten & Alsema, 2007; Fthenakis et al., 2011).
- Se tiene en cuenta un reemplazo del 2% de módulos fotovoltaicos dañados durante la vida útil, más una pérdida de producción adicional durante la manipulación del 1% (Jungbluth et al., 2012).
- La vida útil del inversor se asume con 15 años. Por lo tanto, debe ser intercambiado una vez durante la vida de la planta.
- No se consideran cargas ambientales para el reciclaje debido a que no se cuenta con la información.
- Hasta el momento no se ha utilizado silicio reciclado de paneles fotovoltaicos (Frischknecht et al., 2015).
- Para las partes metálicas más grandes del sistema y del silicio durante el proceso de la oblea sí se asume un reciclaje (Jungbluth et al., 2012).
- El uso de energía para la instalación eléctrica sólo se considera la consumida en el proceso de estirado del alambre de cobre (Jungbluth et al., 2012).

5.2 Descripción del Análisis de Inventario

El análisis de inventario se desarrolló utilizando la base de datos Ecoinvent 3.1, la cual cuenta con una amplia variedad de datos sobre materiales y servicios a lo largo de toda la cadena de producción de los sistemas fotovoltaicos por eso es considerada para evaluar los impactos ambientales del siguiente proyecto. La base de datos contiene datos de un sistema que se apega a las características de nuestro sistema de estudio. En este caso el sistema se llama “MX: electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted”. Las iniciales MX indican que es el caso para México y se trata de la producción de electricidad con un SFV de 3kWp, instalado en azotea con montaje inclinado y paneles policristalinos.

Antes de presentar la información del caso base se describirá los procesos y etapas de todo el ciclo de vida del SFV con tecnología policristalina (multi-Si), no se describirán otros procesos de producción de SFV diferentes a la policristalina para no confundir y perder el enfoque del presente estudio.

El SFV que se encuentra en la BD de Ecoinvent 3.1 cuenta con información desde la extracción de la materia prima hasta la operación del sistema. El siguiente diagrama muestra el conjunto de procesos de los cuales se desprende el estudio (ver Figura 5.3), siguiendo cada uno de los procesos involucrados en el SFV se realiza una breve explicación para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos.

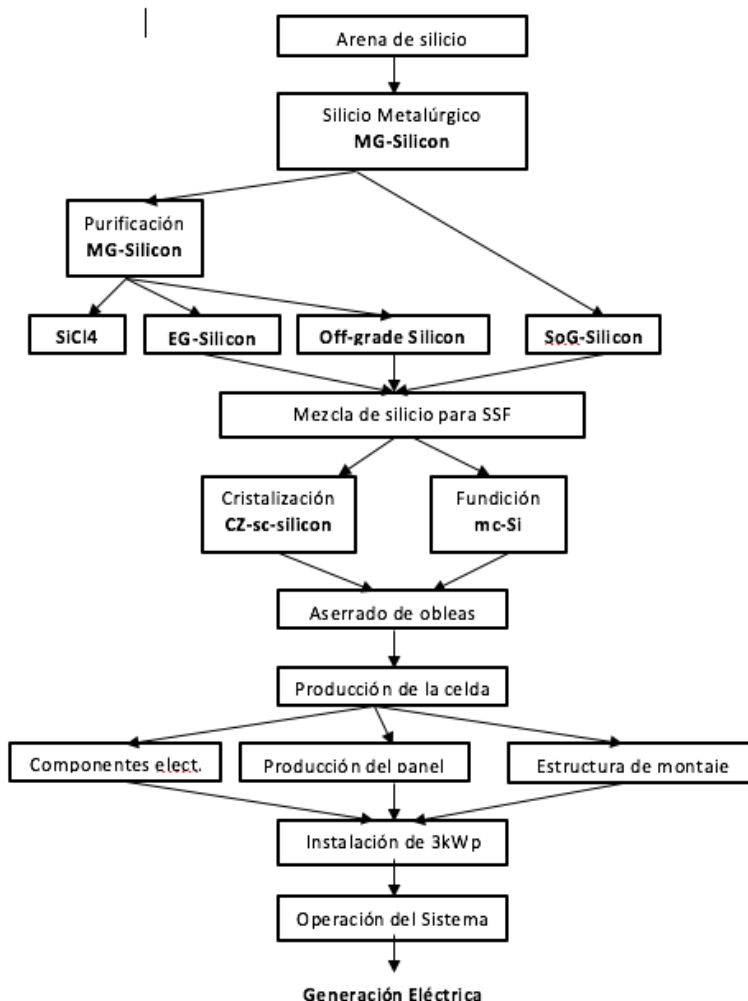


Figura. 5.3 Procesos que integran un sistema fotovoltaico basado en la tecnología de silicio policristalino. Nota: El diagrama original se encuentra en Jungbluth et al. (2012). Sin embargo, para

el presente estudio se le hicieron algunas modificaciones. Fuente: Modificado de (Jungbluth et al., 2012).

Los SFV basados con tecnología de silicio policristalino incluyen en sus procesos la reducción del cuarzo, purificación del silicio, fabricación de la oblea, la producción de módulos y paneles, fabricación del inversor, cableado, montaje de los paneles, infraestructura y tiempo de operación (ver Figura 5.3).

Tabla. 3.0 Descripción de los procesos del SFV. Los procesos incluidos son: la reducción del cuarzo, purificación del silicio, fabricación de la oblea, producción de módulos y paneles, componentes eléctricos, estructura de montaje, instalación y operación. Fuente: Propia.

PROCESOS	
<p>Arena de silicio, Silicio metalúrgico MG- Silicon</p>	<p>El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, y se presentan en forma de dióxido de silicio (SiO_2).</p> <p>La separación de los enlaces entre el silicio y el oxígeno se hace utilizando el proceso de reducción, en donde se agrega carbono en cantidades controladas a altas temperaturas en un horno eléctrico (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2012).</p> <p>Por medio del proceso de reducción se extrae el silicio llamado de grado metalúrgico, que tiene una pureza de más del 99% (Markvart, 2009).</p>
<p>Purificación MG-Silicon SoG-Silicon EG-Silicon Off-grade Silicon</p>	<p>El silicio obtenido en el proceso de reducción no tiene el grado de pureza necesario para la industria fotovoltaica, por lo cual es sometido a un proceso llamado purificación. La forma de obtener altas purezas es tratando el silicio de grado metalúrgico (MG-Silicon) en dos fases, primero mediante un proceso químico y después se extrae el gas del silicio triclorosilano (Jungbluth et al., 2012). Dependiendo de la concentración de impurezas, el material se clasifica como silicio de grado solar (SoG, 0.01 ppm por sus siglas partes por millón), silicio de grado electrónico (EG, 0.0001 ppm) y</p>

	<p>silicio fuera de grado (Off-grade). El nombre de este silicio purificado es “poli-silicio” y es el material con el que se fabrican las obleas de silicio cristalino (Jungbluth et al., 2012).</p>
<p>Mezcla de silicio para sistemas solares fotovoltaicos</p>	<p>Debido al crecimiento de la industria fotovoltaica (FV), se han desarrollado varios métodos para producir el poli-silicio (Proceso Modificado de Siemens, Proceso Unión Carbide, Proceso de Reactor de Lecho Fluidizado) exclusivamente para aplicaciones fotovoltaicas (Bekkelund, 2013). Por ejemplo, adaptaron el proceso EG-Silicon que antes era únicamente para la industria electrónica y lo llamaron “Siemens modificado”. Este proceso consiste en hacer que el silicio se deposite sobre la barra base de silicio dentro de un reactor que se encuentra a altas temperaturas, y en el que se introduce el triclorosilano con hidrógeno (Jungbluth et al., 2012). El material resultante se llama grado solar (SoG-Si).</p> <p>La mayoría del silicio usado en la industria FV se fabrica con el Proceso de Siemens Modificado y es el utilizado para el presente estudio. Sin embargo, cuenta con un inconveniente que durante la producción tiene un alto consumo de energía, exige aproximadamente 200 kWh/kg (Amendola, 2011).</p>
<p>Oblea Producción de la celda</p>	<p>El material de grado solar (obtenido de EG-Silicon, SoG-Silicon y off-grade Silicon) es tomado para la producción del silicio monocristalino (CZ-sc-Silicon) y policristalino (mc-Si).</p> <p>En el caso del silicio para la oblea policristalina, el material es fundido permitiéndole que se solidifique en forma de bloque de sección cuadrada (Méndez Muñoz & Cuervo García, 2012). La forma de obtener obleas de tipo “p” es agregando impurezas de boro, que se calienta a altas temperaturas para obtener la masa fundida. El</p>

	<p>silicio fundido se enfría lentamente hasta producir la cristalización y el silicio policristalino se vierte en bloques de lingotes (Rosenkilde, 2012). Los bordes de los bloques de lingotes tienen una baja calidad, debido a la contaminación del crisol, y por lo tanto son cortados. Por lo general, los lados, el fondo y la parte superior de los bloques de lingotes se vuelven a fundir para producir nuevos lingotes (Wild-Scholten & Alsema, 2004).</p> <p>Los lingotes después son cortados en obleas de 156x156 mm² con un peso de 100-90 mg (ITRPV, 2017). El corte de las obleas se hace con aserrado multi-hilo cortando de esta forma varias obleas simultáneamente. Nuevamente el material sobrante del corte se funde y se vuelve a utilizar (Rosenkilde, 2012). Las obleas finales tienen un espesor de 180-200 µm. El grosor más ocupado es de 180 µm para las celdas policristalinas (ITRPV, 2017). Las obleas con el corte se dañan sus capas superficiales y tienen que ser limpiadas con productos químicos por ejemplo hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, ácido acético y ácido clorhídrico, por mencionar algunos (Jungbluth et al., 2012).</p> <p>El paso siguiente consiste en formar la unión “p-n”. El frente de la oblea es dopado con fósforo. La difusión del fósforo requiere altas temperaturas entre 830-860°C (Luque & Hegedus, 2011). El dopaje se puede realizar de dos maneras, ya sea mediante un horno de difusión de cuarzo de tubo abierto o mediante un horno de cinta transportadora (Bekkelund, 2013). Las partes no deseadas donde se expuso la difusión del fosforo se retiran mediante un ataque químico (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2012).</p>
--	---

	<p>El siguiente proceso es la formación de los contactos metálicos en ambas caras de la oblea para permitir la conexión eléctrica, utilizando técnicas de serigrafía (Bekkelund, 2013). Mientras más contactos se pongan mayor cantidad de electrones serán capturados, pero menor iluminación llegará a la superficie activa (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2012). Las tiras finas (rejilla metálica horizontal) llamadas fingers suministran corriente eléctrica a las barras colectoras (tiras verticales). Actualmente en el mercado domina el diseño de 3 y 4 barras colectoras (ITRPV, 2017). El material utilizado para la metalización es la plata, por lo cual, una reducción en el ancho de la barra produce una ganancia en eficiencia y reducción de costos (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2012). Las dimensiones típicas de la rejilla metálica son fingers de 48 μm de ancho (ITRPV, 2017).</p> <p>Después la superficie frontal (dopaje de fósforo) de la oblea es pulida y puede llegar a reflejar una tercera parte de la luz incidente; para evitarlo se crea una superficie rugosa formada por pirámides microscópicas que hacen rebotar los rayos incidentes hacia el interior de la celda (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2012).</p>
Producción del módulo y del panel	<p>La celda FV fabricada, es el dispositivo semiconductor que aprovecha la radiación solar para producir electricidad. Para obtener los valores de voltaje y corriente necesarios, se hacen arreglos en serie de las celdas conocidos como módulos FV y a su vez el arreglo serie-paralelo de los módulos es llamado panel FV.</p> <p>Las celdas solares están interconectadas en serie con barras de cobre y encapsuladas para formar un módulo. Actualmente hay módulos</p>

	<p>de 60 y 72 celdas; dominando el mercado los módulos de 60 celdas (ITRPV, 2017).</p> <p>Un módulo está compuesto de los siguientes revestimientos:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Una cubierta frontal de vidrio templado o vidrio solar de bajo hierro. Esta capa tiene un revestimiento antireflexión que mejora la transmisión de la irradiación haciendo que el módulo maximice la eficiencia de conversión (Bekkelund, 2013). -Encapsulado: El material para encapsular que predomina en el mercado es el polímero termoplástico transparente, eléctricamente aislante llamado acetato de etileno y vinilo (Ethylene Vinyl Acetate-EVA). -Cubierta inferior suele ser opaca y tienen la función de proteger contra agentes externos como la radiación ultravioleta. Usualmente se utiliza tedlar³ o vidrio. -Soportes metálicos que permite anclarse o fijarse a otros módulos. <p>Finalmente, para proteger los bordes de los módulos se le coloca un marco de aluminio. El marco de aluminio seguirá dominando el mercado de SFV por los siguientes diez años (ITRPV, 2017).</p>
--	---

³ Mezcla de poliéster y fluoruro de polivinilo (PVF).

Componentes eléctricos	Los siguientes procesos del SFV son la unión de los módulos para hacer el panel, la instalación de los componentes eléctricos, inversor y el montaje de la estructura de soporte.
Estructura de montaje	Los componentes eléctricos están conformados por cables, conectores, cajas de conexiones, entre los más ocupados (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2012).
Instalación	
Operación	Una vez instalados todos los equipos, se pone en operación la planta.

En cada una de las etapas de producción se consideraron:

- Consumos de energía
- Materiales auxiliares
- Transporte de materiales, plantas de energía, productos semi-acabados
- Procesos de tratamiento de residuos de producción para el procesamiento del silicio
- Desmontaje de los componentes al final de su vida útil
- Infraestructura para todas las instalaciones de producción

La información contenida en la BD Ecoinvent 3.1 ayudó a reducir la cantidad de datos necesarios para el inventario. Los procesos en la BD fueron modificados conforme a la información del caso base que se analiza a continuación.

5.2.1 Inventario del caso de estudio

El estudio está realizado con información de un sistema existente que se encuentra en operación, a este sistema se le llama Caso Base. Además de la base de datos de Ecoinvent, se obtuvo información de la literatura, se realizaron cálculos y extrapolaciones. Las

limitaciones y consideraciones se describieron anteriormente. A continuación, se mencionan las características de los equipos para el Caso Base.

Características Generales

La instalación tiene una capacidad de 3 kWp, instalado en un techo existente con una inclinación de 20° orientados hacia el sur, tecnología de paneles policristalinos. Conformado de 12 módulos policristalinos y 1 inversor de 2.5 kW.

Irradiación promedio anual: 1282 kWh/ kWp

Factor de rendimiento: 0.75

Características del módulo fotovoltaico

Módulo policristalino, su diseño tiene la característica de aumentar la absorción de la luz solar mejorando de esta forma la eficiencia del módulo. Desarrollado para lugares con condiciones climatológicas extremas.

Tabla. 5.2 Características del módulo policristalino para el Caso Base. Información obtenida del fabricante SHARP (2012).

Características del módulo	
Marca	SHARP
Modelo	ND-240QCJ
Eficiencia del módulo	14.7%
Dimensiones	994 x 1640 x 46 mm
Peso	19 kg
Fabricado	Estados Unidos

Características del Inversor

Tabla. 5.3. Características del Inversor. Información obtenida del fabricante Fronius (2010).

Características del Inversor	
Marca	Fronius
Modelo	IG Plus 3.0-1
Recomendado para Sistemas FV	2.5-3.45 kWp
Potencia nominal de salida	3,000 W
Eficiencia max	96.2%

Eficiencia	95.5%
Peso	27 kg
Fabricado	Estados Unidos, Indiana.

Características del Transporte

En la sección del tipo de transporte ocupado para el sistema, se utilizaron los diferentes procesos de la BD de ecoinvent 3.1, que son:

- Transport, lorry 20-28t, fleet average
- Transport, lorry >16t, fleet average
- Transport, van<3.5t

Se hace la suposición de que el tipo de transporte utilizado por los fabricantes para la distribución del producto final son tipo camión (lorry). En el caso de estudio, se modeló el transporte en función de la cantidad de producto y distancia transportada. En este caso se considera a los módulos FV y al inversor como los productos finales que tienen mayor distancia de recorrido, en la Tabla 5.4 se indica la distancia de las fábricas y en las Tablas 5.2 y 5.3 se indica el peso y dimensiones de los productos. En el caso del cableado es un producto que se fabrica en el propio país y no es necesario que se transporte desde lugares alejados.

Tabla. 5.4. Características del Transporte. Cálculos realizados considerando la ubicación de las fábricas de los equipos.

Transporte			
Material	Unidad (pz)	Tipo Transporte	Distancia (km)
Panel Policristalino	12	Camión	2,540
Inversor	1	Camión	3,380
Cableado	-	Camión	40

El inventario de un SFV completo no se presentan aquí, ya que es demasiado extenso. Sin embargo, en el Anexo A se mencionan datos que son importantes para un sistema fotovoltaico de tecnología policristalina

En el capítulo 4 se mencionó que para el estudio de ACV utilizaremos el software GaBi, en donde se encuentra la información de la BD de inventario Ecoinvent 3.1 y el método de evaluación de impactos CML 2001.

5.3 Evaluación de Impactos Ambientales

La fase de evaluación de impactos tiene el propósito de asociar los datos obtenidos del inventario con la selección de categorías de impactos, indicadores de categoría y modelos de caracterización; asignación de resultados del ICV (clasificación); cálculo de resultados del indicador de categoría (caracterización).

El método seleccionado para realizar la evaluación de impactos ambientales fue el CML 2001. Cumple con los elementos obligatorios de clasificación y caracterización de la evaluación de impactos especificados en la norma internacional ISO 14040:2006 (Klöppfer and Grahl, 2014).

Las categorías de impacto seleccionadas para el análisis de resultados se encuentran en la metodología CML 2001 (ver capítulo 4).

- Cambio climático
- Disminución de la capa de ozono
- Acidificación
- Eutrofización
- Oxidación fotoquímica
- Consumo de recursos abióticos
- Ecotoxicidad

En el siguiente capítulo se discuten los resultados obtenidos para el ACV del SFV con la información presentada hasta el momento.

6. Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de impactos del ciclo de vida (EICV) obtenidos en el estudio. Los resultados están referenciados a la unidad funcional de 1 kWh.

La obtención de resultados se dividió en tres secciones: en la primera sección se tienen los resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto del Caso Base (CB), después se comparará el CB con el Caso de Referencia (CR) utilizando la categoría de impacto del potencial de calentamiento global GWP. El CR es el sistema que se encuentra en la BD de Ecoinvent 3.1 y cumple con características similares al CB.

Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en la segunda sección, se están considerando dos análisis de sensibilidad tomando como categoría de impacto al cambio climático. En el Caso A se modificó el parámetro de la eficiencia del inversor, este dato es importante ya que causa cambios que se vuelven muy sensibles al GWP. En el Caso B se hizo una variación de las dimensiones y la superficie que ocuparán los paneles.

En la última sección se presenta una comparación del CB (mc-Si) con otros sistemas de generación fotovoltaica como la tecnología monocristalina (sc-Si), silicio amorfo (a-Si) y de película delgada (CIS). La comparación se realiza con la categoría de impacto de GWP y de forma general se discuten las eficiencias y características físicas de los sistemas.

6.1 Caso Base

El SFV tiene un tiempo de vida de 30 años, durante la operación de la planta se cuenta con un porcentaje menor del 0.5% de emisiones totales (ver anexo B), debido al escaso mantenimiento que necesita el sistema durante su funcionamiento.

La siguiente Tabla 6.1 contiene los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) para cada una de las categorías de impacto utilizando la metodología del CML 2001 para el Caso Base. En la tabla se muestran los componentes que conforman el SFV con sus valores absolutos y porcentajes de aportación en cada una de las categorías de impacto. En total se

están considerando 11 categorías de impacto para la discusión de resultados. Al momento de interpretar los resultados se tratará de especificar la procedencia del impacto asociado.

La Tabla 6.1 muestra que el panel FV de tecnología policristalina es el de mayor aportación de impactos para las diferentes categorías de impacto. Esta tabla se ocupa para interpretar los resultados obtenidos en el Caso Base.

Tabla. 6.1 Impactos Ambientales potenciales de los componentes del SFV en el Caso Base. Fuente: Propia con resultados del ACV.

Categorías de Impacto Ambiental	Inversor 2.5 kW		Estructura de Montaje		Instalación Eléctrica		Panel FV Policristalino		Total	
	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP elements) [kg Sb-eq.]	8.728E-07	37.0	1.694E-08	0.7	3.143E-07	13.3	1.144E-06	48.5	2.358E-06	100
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP fossil) [MJ]	5.208E-02	8.2	8.993E-02	14.1	1.650E-02	2.6	4.767E-01	74.7	6.380E-01	100
Potencial de Acidificación (AP) [kg SO ₂ -eq.]	7.206E-05	15.0	8.652E-05	18.1	4.474E-05	9.3	2.739E-04	57.1	4.793E-04	100
Potencial de Eutrofización (EP) [kg PO ₄ -eq.]	5.353E-05	27.3	1.624E-05	8.3	3.458E-05	17.6	9.093E-05	46.3	1.962E-04	100
Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP inf.) [kg DCB-eq]	1.137E-02	27.9	7.337E-03	18.0	7.993E-03	19.6	1.394E-02	34.2	4.082E-02	100
Potencial de Calentamiento Global (GWP 100 years) [kg CO ₂ -eq.]	4.714E-03	8.2	9.564E-03	16.7	1.296E-03	2.3	4.150E-02	72.4	5.733E-02	100
Potencial de Toxicidad Humana (HTP inf.) [kg DCB-eq.]	4.292E-02	33.8	1.712E-02	13.5	3.426E-02	27.0	3.219E-02	25.3	1.270E-01	100
Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP inf.) [kg DCB-eq.]	4.007E+01	17.9	8.074E+01	36.1	2.516E+01	11.3	7.660E+01	34.3	2.235E+02	100
Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP, steady state) [kg R11-eq.]	3.622E-10	3.7	4.444E-10	4.6	5.362E-11	0.6	8.776E-09	90.7	9.679E-09	100
Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP) [kg C ₂ H ₄ -eq.]	6.929E-06	13.8	6.369E-06	12.7	2.553E-06	5.1	3.404E-05	67.9	5.011E-05	100
Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP inf.) [kg DCB-eq.]	1.876E-04	29.2	9.737E-05	15.2	1.133E-04	17.6	2.414E-04	37.6	6.426E-04	100

En la Figura. 6.2 están representados los resultados porcentuales en una gráfica de contribución de los componentes del SFV al total de impactos ambientales potenciales del Caso Base, en cada una de las categorías de impacto se observa el porcentaje de aportación de cada uno de los componentes del sistema (panel FV, inversor, instalación eléctrica y estructura de montaje). Los paneles fotovoltaicos tienen la mayor contribución en todas las categorías de impacto exceptuando el potencial de toxicidad humana (HTP) y el potencial de ecotoxicidad acuática marina (MAETP). En el potencial de acidificación (AP) se tiene una aportación del 57.14%, en eutrofización se tiene un aporte del 46.35% (EP), su atribución al potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP) es del 67.93% y de las categorías de impacto con mayor contribución se encuentran el potencial de calentamiento global (GWP) con un 72.39%, un 74.72% en el agotamiento de los recursos abióticos de fósiles (ADP) y el potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) con un 90.67%. Estos impactos ambientales potenciales se producen en los diferentes procesos de fabricación de los paneles fotovoltaicos y debido al consumo de energía en toda la cadena de valor del sistema.

**Contribución de los componentes del SFV al Total de Impactos Potenciales
Unidad Funcional (UF) 1 kWh**

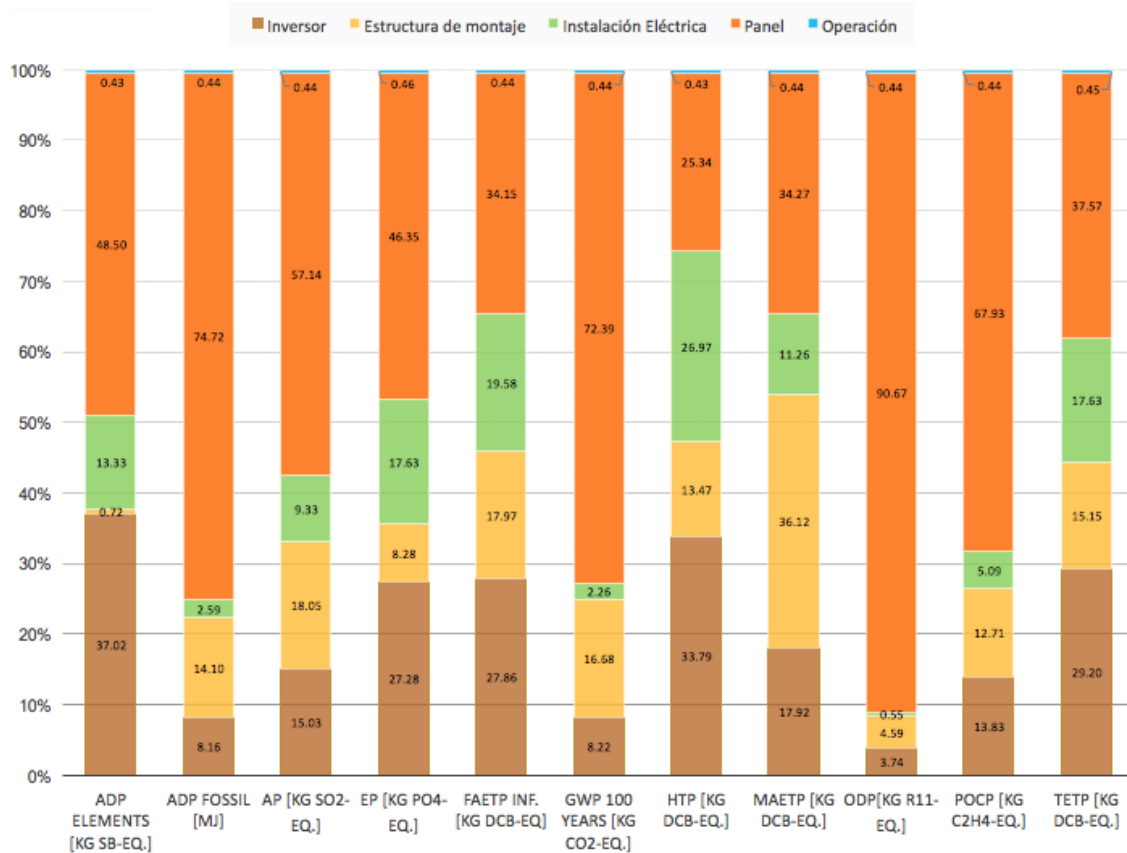


Figura. 6.2 Resultados del ACV obtenidos para cada una de las categorías de impacto del Sistema Fotovoltaico (SFV) para el Caso Base. Fuente: Propia con resultados del ACV. **ADP:** Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos; **AP:** Potencial de Acidificación; **EP:** Potencial de Eutrofización; **FAETP:** Potencial de Ecotoxicidad Acuática de agua dulce; **GWP:** Potencial de Calentamiento Global; **HTP:** Potencial de Toxicidad Humana; **MAETP:** Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina; **ODP:** Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono; **POCP:** Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico; **TETP:** Potencial de Ecotoxicidad Terrestre.

En el caso del inversor la Figura 6.2 muestra una contribución que es menor a la que representan los paneles fotovoltaicos, para el potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos se tiene un 37.02% este potencial se debe principalmente al uso de metales como son el cobre, oro y el acero que contiene el inversor, en el potencial de eutrofización (PE) se tiene un 27.28%, para el potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP) un 29.20% y en el potencial de toxicidad humana el inversor supera al panel (HTP) con un 33.79%.

6.2 Interpretación de resultados del Caso Base

En la interpretación de resultados la Norma ISO 14040:2006 menciona que es la fase donde los resultados del inventario y de la evaluación de impacto se consideran juntos. Por lo cual a continuación se dará la interpretación de los resultados.

6.2.1 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos de Elementos (ADP elements)

El potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema es $2.36E-06$ [kg Sb-eq.] ver detalles en la Tabla 6.1, el componente que afecta en mayor medida al agotamiento es el panel FV con $1.14E-06$ [kg Sb-eq.] (48.5%) del total, su contribución está dada por el agotamiento de recursos minerales como lo son el aluminio utilizado para el marco del módulo y la plata utilizada en las celdas. El segundo componente que contribuye en el agotamiento de recursos es el inversor con $8.73E-07$ [kg Sb-eq.] (37%) del total, esto es debido a la utilización de cobre, oro, estaño y acero en la fabricación del inversor. La instalación eléctrica es el tercer elemento con mayor aportación (13.3%), en donde el uso de cobre en la fabricación del cable es el elemento que afecta en el ADP.

6.2.2 Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos Fósiles (ADP fossil)

En el potencial de agotamiento de recursos abióticos fósiles se consideran el consumo de recursos fósiles como son el petróleo, gas y carbón. Las principales contribuciones se deben a la utilización de recursos para la generación de energía. El componente que contribuye más al agotamiento del recurso es el panel FV con $4.77E-01$ [MJ] (74.7%) del total ver detalles en la Tabla 6.1, causado por el alto consumo energético a lo largo de todos los procesos de producción del panel, principalmente la obtención de la materia prima, la fabricación de la oblea, la producción del marco de aluminio y el vidrio de protección.

El segundo componente que contribuye al ADP (14.1%) es la estructura de montaje donde el proceso del aluminio y el acero son los que consumen una gran cantidad de energía.

6.2.3 Potencial de Acidificación (AP)

El potencial de acidificación total es $4.79E-04$ [kg SO₂-eq/ kWh] ver detalle en la Tabla 6.1. El componente de mayor contribución es el panel FV con un porcentaje del (57.1%), los procesos que causan el mayor daño son durante la producción de la oblea con una cantidad de $7.46E-01$ [kG SO₂ eq/ m²] del total. En los procesos para la fabricación de la oblea hay un alto consumo de energía y uso de productos químicos para la limpieza de las obleas durante el corte. El segundo componente que aporta al AP es la estructura de montaje con el (18.05%) la principal causa es el alto consumo de energía generada con combustibles fósiles durante la producción del aluminio y acero.

6.2.4 Potencial de Eutrofización (PE)

El potencial de Eutrofización total es $1.962E-04$ [kg fósforo-eq/kWh] ver detalle en la Tabla 6.1. El (46.35%) del total es aportado por el panel FV durante el proceso de corte de la oblea hay un alto consumo de agua al limpiarlas. El inversor contribuye con el (27.28%) del total, el cual se debe a la extracción de los metales como el aluminio, cobre y acero.

6.2.5 Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP)

El potencial de ecotoxicidad acuática de agua dulce es $4.082E-02$ [kg DCB-eq/kWh] ver detalle en la Tabla 6.1. El FAETP es causado principalmente por la extracción de metales (eliminación de relaves sulfhídricos durante la minería) en todos los componentes del sistema. En el panel FV la contribución es del (34.15%), del inversor es el (27.86%) y de la instalación eléctrica del (19.58%).

6.2.6 Potencial de Calentamiento Global (GWP)

El potencial de calentamiento global a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema es de 57.33 [g CO₂-eq/kWh] ver detalle en la Tabla 6.1. La mayor contribución es dada por los paneles FV con el (72.39%), los procesos de fabricación del panel tienen el mayor gasto de energía principalmente la reducción, purificación y corte de la oblea. Durante la reducción del silicio se tiene un consumo de 11 [kWh/kg], en el proceso de purificación se utilizaron 114 [kWh/kg] de electricidad y 160 MJ/kg de calor (Jungbluth et al., 2012). El gasto indirecto

de energía en los procesos de fabricación de la oblea son los que causan el mayor impacto en esta categoría.

6.2.7 Potencia de Toxicidad Humana (HTP)

El potencial de toxicidad humana total es de 1.270E-01 [kg DCB-eq] ver detalle en la Tabla 6.1. El componente con mayor contribución es el inversor con el (33.79%), los impactos indirectos en la extracción de metales para la fabricación del inversor es el principal impacto en esta categoría, ya que no se considera el reciclaje del material ocupado dentro del inversor.

6.2.8 Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP)

El potencial de agotamiento de la capa de ozono a lo largo de todo el ciclo de vida es de 3.62E-10 [kg R11-eq] ver detalle en la Tabla 6.1. El componente que contribuye casi es su totalidad es el panel con el 8.776E-09 [kg R11-eq] (90.67%) del total. Entre los procesos que causan mayor impacto se encuentran la producción del módulo que utilizan polímeros para encapsular las celdas, en el documento de Krieger & Roekens-Guibert (2006) se explican los impactos ambientales en la producción de polímeros para la industria fotovoltaica.

6.2.9 Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP)

El potencial de creación de ozono fotoquímico a lo largo de todo el ciclo de vida es de 5.011E-05 [kg etano-eq]. El panel FV contribuye con el 3.404E-05 [kg etano-eq] (67.9%) de las emisiones totales. Nuevamente se tiene al proceso de fabricación de la oblea como las que aportan un mayor impacto por su alto consumo de energía tanto eléctrica como térmica.

6.2.10 Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP)

El potencial de ecotoxicidad terrestre total es de 6.426E-04 [kg DCB-eq]. El componente con mayor contribución es el panel FV con el 2.414E-04 [kg DCB-eq] (37.57%) del total. El impacto directo en esta categoría se encuentra en la obtención del silicio en el proceso de reducción, purificación y corte de la oblea, en estos procesos se tiene un alto

potencial de toxicidad que proviene de las emisiones de cloro a los ríos (ejemplo: triclorosilano, ácido clorhídrico).

6.2.11 Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP)

El potencial de ecotoxicidad acuática marina es de 223.5 [kg DCB-eq]. El componente con mayor contribución es la estructura de montaje con el 80.74 [kg DCB-eq] (36.12%) del total. El segundo componente con mayor impacto es el panel FV con el 76.60 [kg DCB-eq] (34.27%) del total. La causa del impacto en estos componentes se debe a la extracción de metales y uso de cloros para la limpieza de las obleas.

6.3 Comparación Caso Base y Caso de Referencia

Anteriormente en el capítulo 5 se describieron las características del Caso Base. Este sistema de forma general es una instalación con una capacidad de 3 kWp, colocado en un techo con una inclinación de 20°, tecnología de paneles policristalinos. Las características generales del caso base son similares a las del caso de referencia con algunas modificaciones que se describirán a continuación. La diferencia entre los dos casos radica en la superficie ocupada, inversor y transporte de cada uno de los sistemas; el caso de referencia tiene dimensiones de 23.5 m² de superficie ocupada, mientras que el caso base tiene 22.7 m² de superficie ocupada; la característica del inversor del caso de referencia es la eficiencia del 93.5% mientras que el caso base tiene un inversor con eficiencia del 95.5%, de forma general son las modificaciones más sobresalientes entre los dos casos para hacer la comparación (ver capítulo 5).

La Tabla 6.2 muestra la comparación entre el caso base y el caso de referencia. El caso base mantiene una disminución mínima de impactos ambientales en todas las categorías de impacto comparadas con el caso de referencia. El porcentaje de disminución de impactos ambientales para el CB en las diferentes categorías de impacto fue un promedio del 3% en general (incluyendo el transporte de los componentes finales). Aunado a esto, la categoría donde se dio un mayor cambio es en el Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP) con un (4.4%) de disminución del impacto para el caso base. La causa de la disminución se debe a la diferencia de dimensiones, al disminuir el área ocupada por el sistema se considera

que se ocupa menos material y por lo tanto el sistema es más eficiente al producir la misma energía en menos área ocupada.

Tabla. 6.2 Comparación de impactos ambientales potenciales para el caso de referencia y el caso base. Fuente: Propia con resultados de ACV.

Categorías de Impacto Ambiental	Caso de Referencia (23.5 m ²)	Caso Base (22.7 m ²)	Porcentaje de diferenciación	Porcentaje de aportación del transporte
	V. Absoluto	V. Absoluto	V. Porcentual	V. Porcentual
Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP elements) [kg Sb-eq.]	2.447E-06	2.358E-06	3.6%	0.1%
Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ADP fossil) [MJ]	6.589E-01	6.380E-01	3.2%	1.9%
Potencial de Acidificación (AP) [kg SO ₂ -eq.]	4.980E-04	4.793E-04	3.7%	0.9%
Potencial de Eutrofización (EP) [kg PO ₄ -eq.]	2.030E-04	1.962E-04	3.4%	0.6%
Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP inf.) [kg DCB-eq]	4.238E-02	4.082E-02	3.7%	0.2%
Potencial de Calentamiento Global (GWP 100 years) [kg CO ₂ -eq.]	5.952E-02	5.733E-02	3.7%	1.4%
Potencial de Toxicidad Humana (HTP inf.) [kg DCB-eq.]	1.312E-01	1.270E-01	3.1%	0.3%
Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP inf.) [kg DCB-eq.]	2.337E+02	2.235E+02	4.4%	0.1%
Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP, steady state) [kg R11-eq.]	1.006E-08	9.679E-09	3.8%	1.5%
Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP) [kg C ₂ H ₄ -eq.]	5.199E-05	5.011E-05	3.6%	1.2%
Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP inf.) [kg DCB-eq.]	6.654E-04	6.426E-04	3.4%	0.4%

La transportación de los componentes finales (ver capítulo 5) tiene una aportación a los impactos ambientales potenciales para el CB, es decir, al considerar la transportación de los componentes finales no se está teniendo un ahorro para el CB, al contrario, la aportación del uso de transporte está aumentando los impactos ambientales ver Tabla 6.2. En algunas

categorías como en el potencial de agotamiento de recursos abióticos fósiles (ADP fósil) con el 1.9%, el potencial de calentamiento global (GWP) con 1.4%, con el 1.5% en el potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) y el 1.2% en el potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP); estas categorías son las que tienen mayor afectación por el tipo de transporte utilizado para trasladar los productos finales que en este caso se considera es un camión que utiliza combustible fósil (gasolina o diésel).

6.4 Análisis de sensibilidad

Hasta el momento se revisaron los resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto del análisis de ciclo de vida del Caso Base y la comparación del Caso Base con el Caso de referencia. En el estudio ACV, se detectaron dos parámetros que generan un cambio en el sistema de estudio. La información obtenida aportó la facilidad de modificar parámetros que se vuelven sensibles al cambio en el SFV.

En el análisis de sensibilidad, se consideran dos parámetros del SFV. En el Caso A se modificará la eficiencia del inversor manteniendo las características generales del sistema Caso de Referencia iguales y para el Caso B se modificarán las dimensiones del sistema Caso de Referencia sin modificar las características generales del sistema, ambos casos utilizarán como categoría de impacto al Potencial de Calentamiento Global (GWP) para presentar sus resultados.

6.4.1 Caso A

Los cambios realizados para el Caso A (CA) son la modificación de la eficiencia del inversor del sistema Caso de Referencia, actualmente en el mercado existen inversores con eficiencias mayores al 93.5%, lo cual ayuda a tener una mejor conversión de energía a la salida del inversor. Al hacer la modificación de eficiencia se obtuvieron menores impactos ambientales en cada una de las categorías de impacto. La Tabla 6.3 muestra las eficiencias propuestas y la cantidad de [g CO₂-eq] en la categoría de impacto GWP.

Tabla. 6.3 Relación de cambio de eficiencia del inversor. Las eficiencias del inversor se tomaron de las características del inversor (ver Tabla 6.3). El cambio en el inversor fue en el caso de referencia. Fuente: Propia con resultados de ACV.

Número de Inversor	Eficiencia del inversor	Potencial del calentamiento global
	%	[g CO ₂ -eq]
1 (Caso de Referencia)	93.5	59.52
2	95.5	58.33
3	96.5	57.51

Al aumentar la eficiencia hay una reducción de los impactos ambientales en el caso del GWP la disminución de impactos ambientales fue de 1.19 [g CO₂-eq] entre el inversor 1 y 2, entre el inversor 2 y 3 la disminución fue de 0.82 [g CO₂-eq]. La curva de la Figura. 6.3 muestra que el cambio en la eficiencia del inversor no es completamente lineal y que los límites de reducción llegarán hasta que el inversor tenga una eficiencia de conversión cercana al 100%.

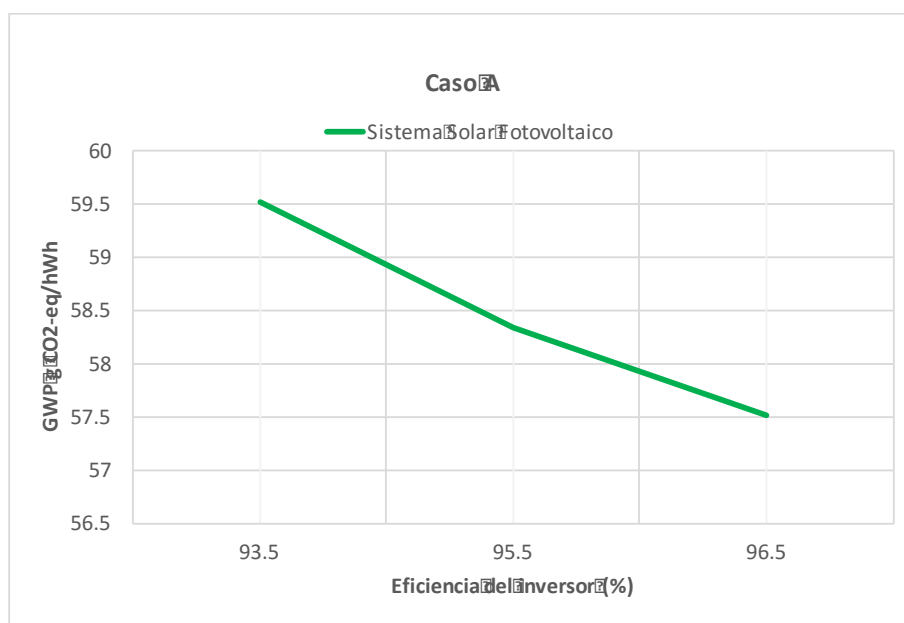


Figura. 6.3 Relación de cambio de la eficiencia del inversor. Fuente: Propia con resultados de ACV.

Actualmente las eficiencias que existe son las mejores y conseguir una eficiencia mayor involucraría una alta calidad en materiales conductores como son el cobre y el aluminio. Por lo tanto, se considera que el inversor está llegando a ser una tecnología madura que no tendrá grandes cambios en el futuro.

6.4.2 Caso B

En el Caso B se modificaron las dimensiones del sistema caso de referencia (CR), el área ocupada por el CR en la BD de Ecoinvent tiene una superficie de 23.5 m² con paneles FV con una eficiencia del 13.6% y para el Caso B se consideró una superficie del 22.68 m² con una eficiencia del 14.3%. Al hacer el cambio en las dimensiones se modificó la cantidad de materiales y los m² ocupados para la generación de 1 kWp. La modificación de las dimensiones se vio reflejada en los impactos ambientales potenciales de los procesos pertenecientes al panel FV y a la estructura de montaje (ver Tabla 6.4) en el Anexo B se encuentran la tabla completa de los valores de disminución directa de los impactos ambientales.

Aunado a esto es necesario mencionar que la utilización de marco de aluminio en el módulo, es uno de los mayores causantes de impactos ambientales potenciales en el proceso del módulo. Por lo cual, considerando la modificación de las dimensiones y la fabricación del módulo sin marco para una instalación en azotea se lograría una mayor disminución de los impactos ambientales en el sistema. No obstante, hasta el momento no se tiene considerado sustituir al marco de aluminio por los siguientes 10 años (ITRPV, 2017). Por lo tanto, sólo se considera la modificación directa en las dimensiones ocupadas por el sistema y el panel en la instalación.

Tabla. 6.4 Modificación de las dimensiones del caso de referencia (CR). El porcentaje de impacto al modificar las dimensiones del CR se ven reflejadas en el Caso B para la categoría de impacto GWP. Fuente: Propia con resultados de ACV.

CASO REF & CASO B					
Categorías de Impacto Ambiental	Caso	Inversor	Estructura de montaje	Instalación Eléctrica	Panel
Potencial de Calentamiento Global (GWP 100 years) [kg CO ₂ -eq.]	Referencia (23.5 m ²)	4.70E-03	1.01E-02	1.32E-03	4.31E-02
	B (22.68 m ²)	4.70E-03	9.77E-03	1.32E-03	4.17E-02
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34

En la categoría de impacto GWP, la estructura de montaje y el panel tienen una disminución del 3.42% y del 3.34% respectivamente de disminución de impactos para el Caso B. En todos los procesos del panel FV hay una disminución del material desde la extracción de la materia prima hasta la fabricación del módulo. Por lo tanto, este caso tiene la característica de modificar únicamente los impactos ambientales potenciales de dos componentes del sistema. En un futuro próximo se tiene la tendencia de aumentar las dimensiones de las obleas de 156x156 mm a 156.75x156.75 mm, y cambiar de 60 celdas a 72 celdas por módulo (ITRPV, 2017). Estos cambios reducirán el uso de materiales como la plata para las líneas de conexión, el marco de aluminio y el material para el encapsulado del módulo.

6.5 Comparación de la tecnología policristalina (Caso Base) con otras tecnologías fotovoltaicas

En capítulos anteriores se describió que existen diferentes tecnologías fotovoltaicas para la generación de energía eléctrica (ver capítulo 3). A continuación, se compararán tres tipos de tecnologías diferentes a la policristalina para la generación de 1 kWh de electricidad.

Las eficiencias de cada una de las tecnologías son diferentes al igual que sus dimensiones para la producción de 1 kWh. Fuera de esas dos diferencias, las cuatro tecnologías tienen características similares, el tipo de instalación es en azotea con una

inclinación, la capacidad instalada es de 3 kWp En la Tabla 6.5 se indican las características de cada una de las tecnologías empleadas en este estudio.

Tabla. 6.5 Tipos de tecnologías fotovoltaicas: eficiencia y dimensiones. Fuente: Propia y de Jungbluth et al. (2012).

Tipo de panel	Eficiencia	Dimensiones de la instalación 3 kWp
	%	m ²
Monocristalino (single-Si)	14.0%	22.8
Policristalino (multi-Si)	14.3%	22.68
Amorfo (a-Si)	6.5%	47.9
CIS	10.8%	29.1

En la Tabla 6.5 se observa que el panel de tecnología amorfa es la que tiene una mayor ocupación de área y una eficiencia menor. Con esta información no quiere decir que sea el de mayor aportación de impactos ambientales. Por eso al hacer la comparación de los resultados obtenidos para cada una de las tecnologías se comprueba que el mayor contribuyente en 6 de las 11 categorías de impacto es la tecnología de silicio monocristalino (single-Si). La mayor aportación del single-Si esta en: Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP elements), Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP fossil), Potencial de Acidificación (AP), Potencial de Calentamiento Global (GWP 100 years), Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP), Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP) ver información en Anexo B. El consumo de energía en todos los procesos de producción del panel monocristalino es el causante de los impactos ambientales potenciales, principalmente en el proceso de corte y limpieza donde se encuentra el mayor uso de recursos y emisiones.

La diferencia entre procesos de la tecnología monocristalina y policristalina no difieren demasiado, ya que su fabricación depende del silicio. La calidad del cristal y el corte de la oblea es donde estas tecnologías tienen sus diferencias, a las celdas monocristalinas se les fabrican con un único cristal mientras que las celdas policristalinas con diferentes cristales (Jungbluth et al., 2012). En el proceso de corte las celdas monocristalinas tienen mayores cortes y cuidados al limpiar el material.

En la Figura. 6.4 se muestran los valores obtenidos para la categoría de impacto GWP total de cada una de las tecnologías. La tecnología de película delgada CIS alcanza el valor de 52.21 gCO₂/kWh, mientras que en el caso del sistema FV amorfo se tiene 58.62 gCO₂/kWh, el sistema FV policristalino es de 57.32 gCO₂/kWh y el sistema de silicio monocristalino es el que tiene mayor aportación con el 69.06 gCO₂/kWh. Las tecnologías con menores impactos en GWP son los sistemas FV de película delgada CIS y de silicio policristalino (Caso Base), considerados como los que tienen procesos de fabricación con menor consumo de energía.

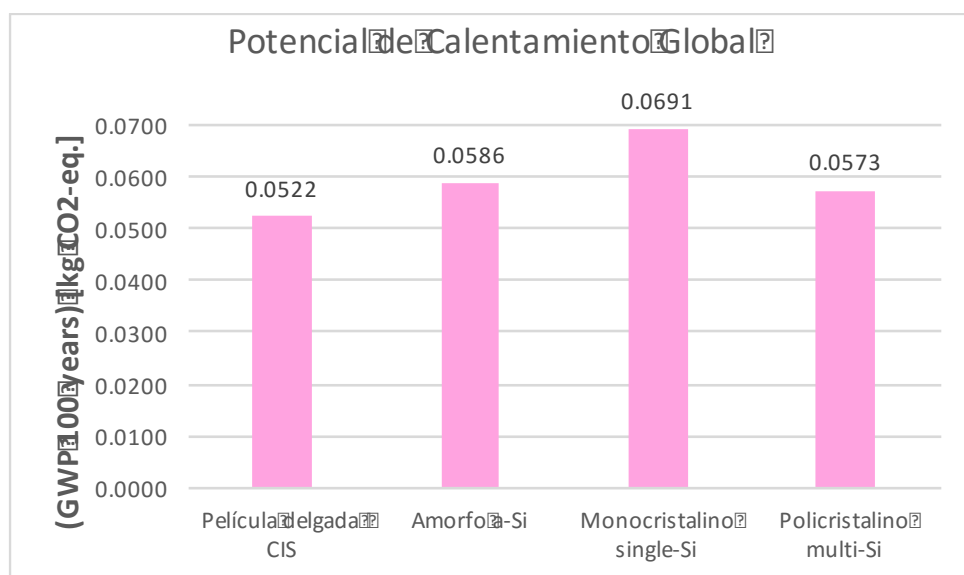


Figura. 6.4 Potencial de Calentamiento Global para las tecnologías de CIS, a-Si, single-Si y multi-Si. Fuente: Propia con resultados de ACV.

En los sistemas FV de tecnología monocristalina y policristalina se considera que los componentes como el inversor y la instalación eléctrica son similares, ya que tienen similitud en dimensiones de superficie ocupada (ver Tabla 6.5). Por lo cual, el impacto ambiental potencial causado por la tecnología monocristalina se adjudica a los procesos del panel FV monocristalino. A diferencia de las dos tecnologías, se tiene la tecnología de silicio amorfo que necesita cubrir grandes dimensiones para generar la misma cantidad de energía que multi-Si y single-Si. Por consiguiente, una mayor cantidad de material para la estructura de montaje y la instalación eléctrica dan como resultado un incremento en los impactos ambientales potenciales.

La diferencia entre la tecnología de silicio policristalino y la de película delgada CIS se encuentra en su proceso de fabricación del panel (ver capítulo 3). La tecnología CIS emplea metales como el telurio (Te), el indio (In) y el galio (Ga) los cuales son subproductos de otros materiales. El indio es un subproducto de la producción del Zinc. El galio se extrae de los minerales del zinc y es un subproducto del aluminio. El costo y la disponibilidad de estos materiales pueden ser una limitante para su crecimiento en el mercado FV. Sin embargo, la tecnología de película delgada CIS compite con la policristalina en cuando a la disminución de impactos ambientales potenciales, así que el futuro de la tecnología de película delgada CIS puede ser incierto.

Los resultados obtenidos de la comparación de las tecnologías FV pueden tener más disminuciones de impactos ambientales potenciales en todas las categorías de impactos para estudios futuros, ya que actualmente se tienen avances tecnológicos que ofrecen paneles FV con materiales más eficientes y con mejores características.

7. Conclusiones

La capacidad que tiene México de genera energía eléctrica con energía solar es extensa, ya que el país cuenta con una ubicación geográfica privilegiada que le permite aprovechar este recurso a lo largo de todo su territorio. Sin embargo, esta energía no está siendo aprovechada en las cantidades que se demandan para cumplir con las metas que tiene el país para generar energía eléctrica con el 35% a partir de fuentes limpias para el año 2024; simplemente en la generación eléctrica con energía solar fotovoltaica no se han tenido grandes cambios. Al año 2016 se tiene una participación en el mix eléctrico nacional de menos del 1% en la capacidad instalada (SENER, 2017). Se espera que con estudios de evaluaciones de impacto ambiental como el que se desarrolló en este estudio y las subastas que se han hecho entre el año 2015 y 2017 se avance a una velocidad mayor con la energía solar hacia un futuro energético sustentable y diversificado que ayude a cumplir con las metas que tiene el país en el sector eléctrico.

Los problemas ambientales que se están teniendo a nivel mundial están presionando a los países a tener mayor participación de energías renovables en sus sistemas energéticos y como consecuencia será importante conocer los impactos ambientales que se derivan de cada tecnología para mitigar el cambio climático.

El propósito que se tuvo al realizar este estudio fue mostrar los impactos ambientales que se tienen al instalar un sistema FV en México. El estudio presentado muestra resultados congruentes y fiables comparado con otros estudios que se han hecho en la materia de evaluación de impactos ambientales de sistemas fotovoltaicos con la herramienta de análisis de ciclo de vida.

7.1 Caso Base

Los resultados obtenidos para el Caso Base fueron 57.33 [g de CO₂- eq./kWh] de emisiones de GEI para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global. En los resultados se encontró que los paneles FV son los que aportan mayor cantidad de impactos ambientales potenciales al sistema y que el consumo de energía en los diferentes procesos sigue siendo un factor que contribuye a los impactos ambientales potenciales.

El resultado del Caso Base se comparó con la información existente en la literatura (ver capítulo 4) encontrándose que los estudios y datos proporcionados por la literatura han propiciado un rango de resultados variados. Como se vio en el capítulo 4 los estudios realizados hasta el momento presentan diferentes valores en los parámetros utilizados, por ejemplo, se vio que la irradiación solar varía dependiendo de la región geográfica, al igual el factor de rendimiento utilizado se encuentra entre 0.75-0.93. Sin embargo, para dar una idea del rango de valores con los que se comparó el Caso Base del presente estudio, se examinaron las revisiones de los autores (Sherwani, Usmani and Varun, 2010; Hsu et al., 2012; de Wild-Scholten, 2013; Gerbinet, Belboom and Léonard, 2014) quienes manifiestan cuales estudios se acercan a un rango óptimo de resultados verídicos. En las revisiones se presentaron las diferentes herramientas utilizadas para calcular los impactos ambientales, al igual se mencionan los límites, tipo de tecnología, región, tipo de montaje, unidad funcional y eficiencia del módulo. Gerbinet et al., (2014) concluyó que la cantidad de GEI siempre es menor de 150 g de CO₂-eq/kWh. Lo que significa que los resultados obtenidos para el Caso base del presente estudio, muestra valores aceptables comparados con los de la literatura. Se cuidó que los estudios con los que se comparó el Caso Base tuvieran características similares y que concordaran los límites de los sistemas. Aunado a esto, al revisar la información del sistema estudiado (Caso Base) y la que se encuentra en la literatura se descubrieron detalles que tienen que examinarse para futuros estudios, ya que la tecnología FV sigue teniendo un desarrollo tecnológico acelerado y su mercado presenta cambios constantes que deben de considerarse. A continuación, se mencionarán los detalles encontrados:

- Los espesores de obleas ocupados en los estudios han tenido un cambio a lo largo de la trayectoria de estudios de ACV de SFV. Actualmente el rango del grosor de las obleas se encuentra entre 180-200 μm . En los estudios más recientes se encontró el valor de 180 μm y el ocupado para el Caso Base fue de 200 μm .
- Los estudios modelados en la BD Ecoinvent 3.1 sólo contempla datos provenientes de la producción en Europa y Norteamérica (Jungbluth et al., 2012). Por lo cual, se considera necesario para estudios futuros la actualización de la base de datos donde se muestre la participación actual que tienen los demás países en el mercado FV para los diferentes procesos. Como ejemplo se tiene el

- incremento de la participación de China, que ha llegado a ser uno de los países con mayor presencia en el mercado FV entre el año 2016-2017 (REN21, 2017).
- El inventario del ciclo de vida debe basarse en la medida de lo posible, en información reciente. Sin embargo, hay procesos que hasta la fecha siguen sin tener grandes cambios y por lo tanto no se han modificado de la BD de Ecoinvent 3.1 para este estudio. Por ejemplo, el empaquetado del inversor y la cantidad de cable utilizada en la instalación.
 - La estimación del traslado de materiales de un proceso a otro también debe de revisarse en un mayor detalle. En los diferentes procesos existe un mercado interno que en su mayoría está conformado por Europa, Estados Unidos y recientemente China, donde la materia prima para la entrada de cada uno de los procesos depende de la ubicación del proveedor y del porcentaje de participación de los países en el mercado FV. Aunado a esto, el mercado FV no se ha actualizado y en algunos procesos el transporte se considera únicamente en el mercado interno en Europa y en otros casos se incluye la participación de Estados Unidos sin considerar que el mercado FV se ha diversificado y actualmente tiene la participación de China en un mayor porcentaje como lo menciona de Wild-Scholten (2013) y Frischknecht et al. (2015). Por lo que, la participación de China y otros países en varios de los procesos todavía no es tomada en cuenta en la BD de Ecoinvent 3.1, lo que podría suscitar una variación en la energía consumida durante el traslado de materiales y reflejarse en un aumento sobre el impacto ambiental potencial del sistema FV.
 - La cadena de producción de los sistemas FV también muestra cambios en las dimensiones de las obleas en Ecoinvent 3.1 se consideraron obleas de tamaño 156x156 mm². Sin embargo, a partir del año 2015 las obleas de 156.75x156.75 mm² han empezado a incrementar su participación en el mercado hasta llegar a un 40% en el 2017 y se espera que aumente en los siguientes años (ITRPV, 2017). Esta característica de las obleas también debe de actualizarse en la BD de Ecoinvent 3.1, ya que al utilizar obleas de mayor tamaño los módulos tendrán dimensiones mayores y generara mayor energía por módulo, de manera que, se ocuparan menos módulos para generar la misma cantidad de energía.

- Mejorar el rendimiento de los materiales utilizados en la fabricación de los módulos aportará una disminución del uso de materiales. En el momento de la fabricación del módulo se deben de reducir las pérdidas por reflexión causadas por la cubierta frontal de vidrio. Entre las opciones se propone modificar el grosor del vidrio o en un caso extremo modificar el material utilizado para la cubierta. Sin embargo, es casi imposible que se haga un cambio de material, ya que el vidrio revestido anti-reflejante es el más utilizado en la cubierta frontal del módulo abarcando el 90% del mercado FV (ITRPV, 2017). Por lo tanto, queda como opción mejorar el vidrio de forma que tenga un revestimiento anti reflejante más eficiente que capte la mayor cantidad de radiación solar.
- Otro de los materiales críticos para las celdas FV es el contenido de plata en las barras colectoras de las celdas (ver sección 5.2), se sabe que la plata es un material demandado en varias industrias y por lo tanto tiene un alto costo. En la BD de Ecoinvent 3.1 existe una cierta incertidumbre de la cantidad exacta que se ocupa, así que el valor se fijó alrededor de un kilogramo (Jungbluth et al., 2012). El reporte ITRPV (2017) encontró valores de 90 mg para dimensiones de 156x156 mm². Se espera que en un futuro exista la sustitución de la plata o al menos un menor consumo.
- En el estudio realizado se modificaron las dimensiones del panel FV para el Caso Base, en la BD de Ecoinvent 3.1 las dimensiones del panel son de 98.6x162 cm con 60 celdas de 156x156 mm². Al realizar el estudio del Caso Base se colocaron las dimensiones reales del sistema, las cuales coinciden con la tendencia de las nuevas instalaciones.
- Otra característica que se está modificando en el mercado FV es el número de celdas por módulo, los módulos que prevalecen son los de 60 y 72 celdas, los módulos de 60 celdas son los más comunes y con los que se han realizado los estudios de ACV. Sin embargo, en los últimos años su participación ha disminuido y como consecuencia ha aumentado la participación de los módulos de 72 celdas (ITRPV, 2017). El cambio en el número de celdas por módulo es para disminuir el número de módulos que se ocupan en una instalación y por lo

tanto las interconexiones entre ellos mismos y el uso de material en los marcos de aluminio.

7.2 Análisis de sensibilidad

Las recomendaciones propuestas hasta el momento tienen la intención de mejorar los resultados obtenidos en los impactos ambientales potenciales. En el análisis de sensibilidad se realizaron modificaciones de dos parámetros que en la actualidad han tenido mejoras y se propusieron para indicar los cambios que podría beneficiar tanto al Caso Base como al Caso de Referencia.

En el Caso A del análisis de sensibilidad se propuso cambiar la eficiencia del inversor, al ser el componente que se encuentra al final de la cadena de generación de energía en el sistema FV se concluye que se logra minimizar los impactos ambientales en todas las categorías de impacto, el porcentaje de disminución de impactos que se obtuvo fue mayor entre el inversor de eficiencia 93.5% y el inversor de eficiencia 95.5%, la diferencia fue de 1.19 [g CO₂-eq] para la categoría de impacto de GWP.

Mientras que, en el análisis de sensibilidad del Caso B, los cambios realizados en las dimensiones de la superficie ocupada entre el sistema del caso de referencia y el caso B, nos indican que la reducción de impactos se dio en la estructura de montaje y el panel FV en todas las categorías de impacto. Al ser el panel FV el que aporta mayores impactos ambientales en toda la cadena de valor del sistema, el análisis de sensibilidad del Caso B evidencia que cualquier cambio en los parámetros del panel FV disminuyen los impactos ambientales en mayor grado. Con el estudio llegamos a concluir que existe un cambio y el porcentaje de reducción fue mayor para el Caso B, donde se obtuvo una disminución del 3.42% y del 3.34% para la estructura de montaje y del panel respectivamente.

Los resultados logrados en el análisis de sensibilidad, lo que demuestran es que cualquier cambio que se realice en un estudio de ACV, modifican los impactos ambientales potenciales del sistema de forma puntual y dan mejores evaluaciones.

7.3 Comparación de las tecnologías fotovoltaicas

La comparación que se realizó del Caso Base (mc-Si) con tres tecnologías de generación fotovoltaica diferentes (película delgada CIS, silicio amorfo, monocristalina), evidenció que entre las mismas tecnologías FV hay diferencias que deben considerarse antes de decidir el tipo de tecnología que conviene instalar.

En el análisis de resultados se expusieron las diferencias en cuando a las características de las tecnologías y de los impactos ambientales potenciales de cada uno de los sistemas. Aunado a esto, sigue habiendo puntos importantes que mencionar. Al igual que la tecnología policristalina, las demás tecnologías tienen mejores eficiencias y se han modificado sus dimensiones actuales. En general, las tecnologías que han tenido mayor innovación son la monocristalina y la policristalina, los reportes como (ITRPV, 2017), hablan de la tendencia en estas dos tecnologías.

La tecnología de película delgada ha tenido una reducción del uso de materiales y no se descarta un aumento de participación en el mercado. Sin embargo, sigue teniendo la limitante de no crear plantas de grandes dimensiones, debido a que sus materiales de fabricación son materiales críticos. En algunos estudios se menciona que la alta producción que han tenido los metales críticos (Te, In, Ga) no serán suficientes para lograr aumentar la demanda de celdas FV que necesiten de estos materiales (Kavlak et al. 2015). Debido a que los materiales tienen limitaciones en su suministro porque son subproductos de otros metales. Este desabasto que sufre la industria de película delgada se ha vuelto una limitante para competir con la tecnología monocristalina y policristalina.

En el (capítulo 3) se comentó que la tecnología de silicio amorfo tiene una disminución de eficiencia inicial del panel. Este parámetro no lo vuelve competente ante las celdas monocristalinas o policristalinas, aparte de que para sistemas instalados en azotea no es recomendable por las dimensiones de superficie ocupada (ver capítulo 6). La tecnología de silicio amorfo se ocupa en su mayoría para fachadas de edificios. Por lo cual, su mercado no está enfocado a construcciones en suelo y azotea (Frischknecht et al., 2015).

Actualmente el mercado fotovoltaico está conformado por dos tercios de celdas fabricadas de silicio cristalino (sc-Si y mc-Si), lo que coloca a la tecnología de silicio por encima de las otras tecnologías (IRENA & IEA-PVPS, 2016). Con los resultados obtenidos en la comparación de las diferentes tecnologías se percibe que la tecnología policristalina sigue siendo la más recomendable.

Se espera que, con la reducción en el consumo de energía de los procesos, la minimización de uso de materiales críticos (plata, cobre, plomo), así como las recomendaciones que se dieron para la actualización del inventario para el ACV, se logren tener menos impactos ambientales potenciales colocando a la tecnología policristalina en la lista de las tecnologías FV que menos emisiones ambientales potenciales causa.

7.4 Reciclaje

El crecimiento del mercado FV está teniendo un aumento en la capacidad instalada acumulada a nivel mundial, se espera que siga teniendo el mismo comportamiento para los siguientes años como se describen en los diversos escenarios (ITRPV, 2017; REN21, 2017).

A medida que va aumentando la capacidad de sistemas FV instalados, los residuos de los sistemas también se incrementan. Por lo cual en un futuro próximo se tendrá la necesidad de manejar de forma adecuada los residuos y por lo tanto será necesario tener información que pueda ser incorporada en los inventarios de ACV para futuras evaluaciones.

Anteriormente se comentó que hacía falta información para el reciclaje de paneles solares. Sin embargo, ante el crecimiento que se tiene en sistemas FV instalados se han creado organizaciones preocupadas por la gestión de desechos, entre los que se han visto involucrados se encuentra IRENA y IEA-PVPS (2017) que en conjunto han realizado un informe llamado “End of life management” en donde se habla del futuro que tendrá la basura generada por los paneles fotovoltaicos. La información contenida en el informe no pudo ser incluida en el inventario del presente estudio debido a su reciente publicación. Por esta razón, de manera general se describirá el trabajo a futuro que se tiene para la inclusión del reciclaje de paneles FV al inventario del ACV.

- Entre los países que se prevé tengan mayor proyección de desechos acumulados, se encuentran los países que actualmente lideran la lista de países con mayor capacidad acumulada (China, EU, Japón, Alemania, India). Así que serán ellos los principales involucrados en el mercado de reciclaje de sistemas FV. Sin embargo, si México quiere llegar a ser líder en Latinoamérica en temas de sustentabilidad, cambio climático y otros impactos ambientales, deberá inicial el planteamiento de la regulación sobre la gestión de desechos de sistemas fotovoltaicos de forma que se puedan recuperar materiales valiosos para la misma industria.
- Un panel FV contienen elementos metálicos que son necesarios para la industria (oro, cobre, plata, níquel, zinc, aluminio). Estos metales pueden ser reciclados dependiendo de la cantidad contenida en el sistema.
- Además de los metales, también se tiene el reciclaje del vidrio y en algunos casos de EVA (acetato etil-vinil).

El trabajo de las organizaciones también necesita el apoyo de los diferentes gobiernos de cada país, debido a que el crecimiento de los SFV en un futuro próximo generará residuos que tendrán que ser clasificados. Por eso, como ya se mencionó, será necesario incluir normalizaciones y leyes que gestionen el tratamiento y eliminación de los residuos de un sistema FV. Ya que el reciclaje tiene beneficios como: disminución de impacto ambientales, disminución de extracción de recursos minerales y materiales críticos, manejo adecuado de residuos y sistema energéticos sustentables.

7.5 Otros sistemas fotovoltaicos

Dentro de la misma línea de investigación del ACV, es recomendable analizar la participación de la generación solar FV dentro de un sistema energético integrado, que tome en cuenta todas las demandas energéticas (electricidad, térmica), emisiones, entradas y salidas de materia y combustibles para transportar los diversos productos. Que tome en cuenta las curvas variables de carga eléctrica derivadas de las actividades económicas, del clima y población. La energía solar es una fuente limpia, que puede ser parte de una mezcla de tecnologías energéticas y el tamaño de su participación en futuros estudios debe ser

evaluado con base en un análisis de costos (LCC) con restricciones de naturaleza variable (confiabilidad del sistema). La energía solar tiene la restricción de no producir energía de noche y para ser una energía dominante requerirá emplear sistemas de almacenamiento de energía que tendrán que evaluarse para ver su efecto en costos e impactos ambientales.

7.6 Comparación de diferentes sistemas de generación eléctrica con el sistema FV (Caso Base)

En el estudio realizado por Stamford y Azapagic (2014) se muestra las emisiones de GEI en la categoría de impacto de potencial de calentamiento global de un sistema FV comparado con sistemas de combustibles fósiles (SCF) para la generación eléctrica; las emisiones de GEI para una planta de carbón fue de 1,068.3 [g de CO₂- eq./kWh] y para una planta de gas Shale de 462.0 [g de CO₂- eq./kWh]. La mayoría de las emisiones provienen de la etapa de operación para los SCF mientras que para un sistema FV las emisiones son causadas en la fabricación de los componentes (panel solar, inversor, estructura de montaje y equipo eléctrico) porque durante su operación las emisiones son menos del 0.5% (ver sección 6.1). Las emisiones de GEI para el Caso Base del presente estudio fueron de 57.33 [g de CO₂- eq./kWh] un valor muy inferior al mostrado por Stamford y Azapagic. Con los resultados presentados se comprueba que existe una diferencia muy considerable, ya que los sistemas fotovoltaicos causan menos impactos ambientales potenciales que los sistemas con combustibles fósiles, a la misma conclusión llegó Fthenakis y Kim (2011). Aunado a esto, si se siguen las recomendaciones dadas en el presente estudio se podrían llegar a reducir más los impactos ambientales de un SFV y competir con un sistema eólico o nuclear (consultar Stamford & Azapagic, 2014; Fthenakis & Kim, 2011).

El estudio presentado aquí es una contribución al análisis de impactos ambientales potenciales que deben ser considerados cuando se decide adoptar una cierta tecnología. Específicamente, el estudio resaltó la importancia de generar energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos para aumentar la participación de la energía solar en México y de esta forma acelerar la transición hacia un futuro energético sustentable que ayude a mitigar el cambio climático.

Anexo A

En la Tabla A.1 se presentan los valores de materia prima de silicio requerido en cada uno de los procesos.

Tabla A.1. Materia prima requerida en cada uno de los procesos de fabricación del panel.

Proceso	mc-Si	Unidad	Referencia
Silicio Metalúrgico (MG-Silicon)	2.68	kg arena de silicio/ kg MG-Silicon	Ecoinvent 3.1
Mezcla de silicio para SFV (Silicio grado solar SoG-Si)	1.50	kg MG-Si/kg SoG-Si	Ecoinvent 3.1
Lingote de Silicio (ingot)	1.33	kg SoG-Si/kg lingote	Ecoinvent 3.1
Oblea (wafer)	0.485	kg lingote/m ² oblea	Ecoinvent 3.1
Celda	1.47	m ² oblea/ m ² celda	Ecoinvent 3.1
Módulo	0.753	m ² solar cell/ m ² module	Ecoinvent 3.1

Tabla A.2. Inventario de los elementos predominantes de los procesos del panel policristalino (mc-Si).

Proceso	Parámetro	mc-Si	Unidad	Referencia
Oblea (wafer)	Dimensiones de la oblea	156x156	mm	Jungbluth et al. (2012)
	Grosor de la oblea	200	µm	Jungbluth et al. (2012)
Módulo	Celdas por módulo	60	celdas	Jungbluth et al. (2012)
	Grosor del vidrio de protección	4	mm	Jungbluth et al. (2012)
	Grosor de la lámina EVA	2x0.5	mm	Diao & Shi (2011)
	Peso de la lámina EVA	1.0	Kg/m ²	Jungbluth et al. (2012)
	Grosor de lámina posterior	125	µm	Diao & Shi (2011)

	Grosor placa base Tedlar	4	mm	Jungbluth et al. (2012)
Panel	Marco de aluminio	2.63	Kg/m ²	Jungbluth et al. (2012)
Sistema fotovoltaico	Dimensiones del panel	22.02	m ²	Calculada con información de (SHARP, 2012).
	Dimensiones de la superficie ocupada por el sistema	22.68	m ²	Calculada con información de (SHARP, 2012).

La Tabla A.3. muestra los materiales para el embalaje de un inversor fueron tomados de (Schwarz & Keller, 1992), y hasta la fecha no se han reemplazado o simplemente no se han tomado en cuenta, para el estudio presentado se consideró sin cambios.

Tabla A.3. Inventario de los materiales para el embalaje de un inversor de 2.5 kW.

Material	SFV	Unidad
Cartón ondulado	2.5	kg
Espuma de poliestireno	0.3	kg
Láminas de polietileno	0.06	kg

El cableado del sistema fue tomado de la información de (de Wild-Scholten, 2006) y tiene las siguientes características.

Tabla A.4 Cantidad de cable que se requiere para un Sistema Fotovoltaico de 3 kWp con tecnología policristalina.

Material	SFV	Unidad
Cable Solar de 4mm ² para corriente directa (CD)	2.16	m/m ² módulo
Cable Solar de 6mm ² , tres líneas para corriente alternan (CA)	0.11	m/m ² módulo

La estructura de montaje es principalmente de material aluminio y acero, el inventario está basado en información de Siemer (2008).

Tabla A.5. Material requerido para la estructura de montaje de un Sistema Fotovoltaico de 3 kWp con tecnología policristalina.

Material	SFV	Unidad
Aluminio	2.8	kg/m ²

Acero	1.5	kg/m ²
-------	-----	-------------------

La información del consumo de energía contenida en la Base de Datos de Ecoinvent 3.1 se recaudó de diferentes fuentes de información. Sin embargo, la Tabla A.6 presentada a continuación es la que mostro mayor credibilidad en su momento:

Tabla A.6. Consumo de Energía en los procesos del sistema fotovoltaico.

Consumo de energía en los procesos			
Proceso	Mezcla eléctrica	Energía	Fuente
MG-silicon	24% hidroeléctrica 76% Gas cogeneración	150 kWh/kg Electricidad 160 MJ Calor	(Hartmann 2001). (Wacker 2002). Obtenida de Jungbluth et al. (2012).
Obención Poli-silicio	57% Cogeneración 43% hidroeléctrica	85.6 y 200 kWh/kg 68 y 270 MJ/kg	(de Wild-Scholten & Alsema 2007, Wacker 2006). Obtenida de Jungbluth et al. (2012).
Oblea (wafer)	Consumo de gas natural	8 kWh/m ² Electricidad 4 MJ/m ²	(de Wild-Scholten & Alsema 2007)
Celda mc-Si	Mezcla eléctrica europea	0.302 kWh/ dm ²	(de Wild-Scholten & Alsema 2007).
Producción del Panel FV	50% de combustible fósil 15% energía FV restante de un mix eléctrico (no especificado)	4.7 kWh/panel Electricidad 5.4 MJ Calor	(de Wild-Scholten & Alsema).
Instalación del SFV de 3 kWp	Mezcla eléctrica europea	0.23 kWh	Ecoinvent 3.1
Inversor	No especificado	21.2 kWh	Schwarz y Keller (1992). Obtenida de Jungbluth et al. (2012)

Anexo B

Tabla B.1. Impactos ambientales potenciales del Sistema Fotovoltaico Caso Base, incluyendo la operación del sistema por 30 años.

Categorías de Impacto Ambiental	Inversor 2.5 kW		Estructura de Montaje		Instalación Eléctrica		Panel FV Policristalino		Operación del SFV		Total	
	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%	V. Absoluto	%
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP elements) [kg Sb-eq.]	8.728E-07	37.0	1.694E-08	0.7	3.143E-07	13.3	1.144E-06	48.5	1.011E-08	0.43	2.358E-06	100
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP fossil) [MJ]	5.208E-02	8.2	8.993E-02	14.1	1.650E-02	2.6	4.767E-01	74.7	2.786E-03	0.44	6.380E-01	100
Potencial de Acidificación (AP) [kg SO ₂ -eq.]	7.206E-05	15.0	8.652E-05	18.1	4.474E-05	9.3	2.739E-04	57.1	2.103E-06	0.44	4.793E-04	100
Potencial de Eutrofización (EP) [kg PO ₄ -eq.]	5.353E-05	27.3	1.624E-05	8.3	3.458E-05	17.6	9.093E-05	46.3	9.012E-07	0.46	1.962E-04	100
Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP inf.) [kg DCB-eq.]	1.137E-02	27.9	7.337E-03	18.0	7.993E-03	19.6	1.394E-02	34.2	1.778E-04	0.44	4.082E-02	100
Potencial de Calentamiento Global (GWP 100 years) [kg CO ₂ -eq.]	4.714E-03	8.2	9.564E-03	16.7	1.296E-03	2.3	4.150E-02	72.4	2.530E-04	0.44	5.733E-02	100
Potencial de Toxicidad Humana (HTP inf.) [kg DCB-eq.]	4.292E-02	33.8	1.712E-02	13.5	3.426E-02	27.0	3.219E-02	25.3	5.460E-04	0.43	1.270E-01	100
Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP inf.) [kg DCB-eq.]	4.007E+01	17.9	8.074E+01	36.1	2.516E+01	11.3	7.660E+01	34.3	9.726E-01	0.44	2.235E+02	100
Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP, steady state) [kg R11-eq.]	3.622E-10	3.7	4.444E-10	4.6	5.362E-11	0.6	8.776E-09	90.7	4.241E-11	0.44	9.679E-09	100
Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP) [kg C ₂ H ₄ -eq.]	6.929E-06	13.8	6.369E-06	12.7	2.553E-06	5.1	3.404E-05	67.9	2.181E-07	0.44	5.011E-05	100
Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP inf.) [kg DCB-eq.]	1.876E-04	29.2	9.737E-05	15.2	1.133E-04	17.6	2.414E-04	37.6	2.915E-06	0.45	6.426E-04	100

La siguiente tabla muestra la disminución directa de los impactos ambientales de los procesos del panel FV al modificar las dimensiones reales del sistema Caso de referencia.

Tabla B.2. Diferencia de los impactos ambientales potenciales obtenidos en el Caso de referencia y en el Caso B.

CASO REF & CASO B					
Categorías de Impacto Ambiental	Caso	Inversor	Estructura de montaje	Instalación Eléctrica	Panel
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP elements) [kg Sb-eq.]	Referencia	8.92E-07	1.79E-08	3.21E-07	1.21E-06
	B	8.91E-07	1.73E-08	3.21E-07	1.17E-06
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP fossil) [MJ]	Referencia	5.15E-02	9.51E-02	1.69E-02	4.93E-01
	B	5.14E-02	9.19E-02	1.69E-02	4.76E-01
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Acidificación (AP) [kg SO ₂ -eq.]	Referencia	7.30E-05	9.15E-05	4.57E-05	2.86E-04
	B	7.30E-05	8.84E-05	4.57E-05	2.76E-04
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Eutrofización (EP) [kg PO ₄ -eq.]	Referencia	5.45E-05	1.72E-05	3.53E-05	9.50E-05
	B	5.45E-05	1.66E-05	3.53E-05	9.19E-05
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce (FAETP inf.) [kg DCB-eq.]	Referencia	1.16E-02	7.76E-03	8.17E-03	1.47E-02
	B	1.16E-02	7.49E-03	8.16E-03	1.42E-02
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Calentamiento Global (GWP 100 years) [kg CO ₂ -eq.]	Referencia	4.70E-03	1.01E-02	1.32E-03	4.31E-02
	B	4.70E-03	9.77E-03	1.32E-03	4.17E-02
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Toxicidad Humana (HTP inf.) [kg DCB-eq.]	Referencia	4.63E-03	1.02E-02	1.33E-03	4.30E-02
	B	4.62E-03	9.80E-03	1.32E-03	4.16E-02
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina (MAETP inf.) [kg DCB-eq.]	Referencia	4.38E-02	1.81E-02	3.50E-02	3.37E-02
	B	4.38E-02	1.75E-02	3.50E-02	3.25E-02
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP, steady state) [kg R11-eq.]	Referencia	4.09E+01	8.54E+01	2.57E+01	8.07E+01
	B	4.09E+01	8.25E+01	2.57E+01	7.80E+01
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (POCP) [kg C ₂ H ₄ -eq.]	Referencia	3.49E-10	4.70E-10	5.48E-11	9.14E-09
	B	3.49E-10	4.54E-10	5.48E-11	8.83E-09
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34
Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (TETP inf.) [kg DCB-eq.]	Referencia	6.99E-06	6.74E-06	2.61E-06	3.54E-05
	B	6.99E-06	6.51E-06	2.61E-06	3.42E-05
	% Disminución	0.04	3.42	0.04	3.34

Tabla B.3. Aportación de impactos ambientales potenciales en cada una de las categorías de impacto de las cuatro tecnologías fotovoltaicas: película delgada CIS, silicio amorfo a-Si, monocristalina y policristalina. En 6 de las 11 categorías la tecnología monocristalina tiene la mayor aportación

Categorías de Impacto Ambiental	Película delgada CIS	Amorfo a-Si	Monocristalino	Policristalino
	V. Absoluto	V. Absoluto	V. Absoluto	V. Absoluto
Potencial de agotamiento de recursos abióticos [kg Sb-eq.]	2.138E-06	2.078E-06	2.378E-06	2.358E-06
Potencial de agotamiento de recursos abióticos [MJ]	5.598E-01	6.247E-01	7.621E-01	6.380E-01
Potencial de Acidificación [kg SO ₂ -eq.]	4.460E-04	5.410E-04	5.682E-04	4.793E-04
Potencial de Eutrofización [kg PO ₄ -eq.]	2.258E-04	1.936E-04	2.191E-04	1.962E-04
Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce [kg DCB-eq.]	4.896E-02	5.032E-02	4.349E-02	4.082E-02
Potencial de Calentamiento Global [kg CO ₂ -eq.]	5.222E-02	5.863E-02	6.906E-02	5.733E-02
Potencial de Toxicidad Humana [kg DCB-eq.]	1.352E-01	1.562E-01	1.322E-01	1.270E-01
Potencial de Ecotoxicidad Acuática Marina [kg DCB-eq.]	2.552E+02	3.274E+02	2.380E+02	2.235E+02
Potencial de Agotamiento de la Capa de [kg R11-eq.]	3.261E-09	3.154E-09	1.010E-08	9.679E-09
Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico [kg C ₂ H ₄ -eq.]	3.243E-05	4.319E-05	5.484E-05	5.011E-05
Potencial de Ecotoxicidad Terrestre [kg DCB-eq.]	5.969E-04	9.813E-04	6.827E-04	6.426E-04

Bibliografía

Aliyu, M.M., Islam, M.A., Hamzah, N.R., Karim, M.R., Matin, M.A., Sopian, K., Amin, N. (2012). Recent developments of flexible CdTe solar cells on metallic substrates: Issues and prospects. *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, Article ID 351381, 10 pages.

Alsema, E.A. (1998). Energy requirements of thin-film solar cell modules-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(4), pp.387–415.

Alsema, E.A. (2000). Energy pay-back time and CO2 emissions of PV systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8(1), pp.17–25.

Amendola, S. (2011). *Overview of manufacturing processes for solar-grade silicon*. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/view/4616920/overview-of-manufacturing-processes-for-solar-grade-rsi-silicon> [Accessed 13 Agu. 2017].

Azapagic, A. (2009). *Life cycle assessment as a tool for sustainable management of ecosystem services*. London. Available at: <http://www.bath.ac.uk/research/seminars/esrc/june09/downloads/azapagic.pdf>

Barrera, M. (2010). *Energía solar: electricidad fotovoltaica*. 1st ed. Madrid: Liber Factory, p.76.

Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The hitchhiker's guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application*. Lund: Studentlitteratur.

Bekkelund, K. (2013). *Life Cycle Assessment of Thin Film Solar Panels*. Master. Norwegian University of Science and Technology.

- Biccari, F. (2012a). *CdTe solar cells*. Power point presentation. University of Rome, Italy.
- Bolin, B. (1995). *Second Assessment Report Climate Change 1995*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Cámara de Diputados México. (2013). *Ley para el aprovechamiento de las energías renovables y el financiamiento de la transición energética (LAFAERTE)*. Available at: http://www.senado.gob.mx/comisiones/energia/docs/marco_LAERFTE.pdf
- Cámbara, J. (2012). *Análisis de la confiabilidad de las metodologías EICV*. Máster. Universidad de Oviedo.
- Chopra, K.L., Paulson, P.D., Dutta, V. (2004). Thin-film solar cells: An overview. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12 (2-3), pp. 69-92.
- Clift, R. and Druckman, A. (2016). *Taking Stock of Industrial Ecology*. London: SpringerOpen, pp.45-69.
- Curran, M. A. (2012). *Life cycle assessment handbook*. Hoboken, N.J.: Wiley.
- Curran, M. A. (1996). *Environmental life-cycle assessment*. New York: McGraw-Hill
- de Wild-Scholten, M. (2013). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 119, pp.296-305.
- de Wild-Scholten, M. J. & Alsema, E. A. (2007). Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic System Production. Energy research Center of the Netherlands, Petten, The Netherlands and Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Utrecht University, The Netherlands.

Entrena, F. (2014). *Determinación del potencial solar*. 1st ed. Antequera, Málaga: IC Editorial.

EPIA (2014). *Global Market Outlook. For Photovoltaics 2014-2018*. [online] Inter Solar, pp.5-57. Available at:
http://www.cleanenergybusinesscouncil.com/site/resources/files/reports/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_-_Medium_Res.pdf [Accessed 9 May 2017].

Frankl, P. (1998). *Life Cycle Assessment of Photovoltaic (PV) Systems*. Ph.D. thesis, University of Rome

Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hischer R., Humbert S., Margni M. and Nemecek T. (2007). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*.ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

Frischknecht, R., Bollens, U., Bosshart, S., Ciot, M., Ciseri L., Doka G., Dones, R., Gantner, U., Hischer, R. & Martin, A. (1996). *Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. 3. Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, Villigen, Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern, CH, retrieved from: www.energieforschung.ch.

Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Scholten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Kim, H. C., Raugei, M., Stucki, M., (2015). *Life Cycle Inventories and Life Cycle*

Assessment of Photovoltaic Systems. *International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12*. Report T12-04:2015.

Fronius (2010). *Fronius IG PLUS v.* [online] U.S.A: Fronius. Available at:
<http://www.fronius-usa.com> [Accessed 12 Sep. 2017].

Fthenakis, V. and Kim, H. (2011). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85(8), pp.1609-1628.

Fthenakis, V. M., Kim H. C., Alsema, E. (2008) Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *In: Environmental Science and Technology*, 42, pp. 2168-2174.

Fthenakis, V., Frischknecht, R., Raugei, M., Kim, H., Alsema, E., Ito, M., Pölz, W., Sinha, P. and Vanbuggenhout, P. (2011). Methodology Guidelines on Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity. [online] 2nd ed. *IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Photovoltaic Power systems Programme*. Available at: <http://www.iaa-pvps-task12.org> [Accessed 3 Jun. 2017].

Fthenakis, V., Moskowitz, P., Zweibel, K. (1998). Photovoltaics and the Environment. Workshop Summary, Brookhaven National Laboratory and the National Renewable Energy Laboratory <http://www.pv.bnl.gov/keystone.htm>.

GaBi. (2017). *Life Cycle Assessment LCA Software*. Germany: thinkstep. [online] Available at: <http://www.gabi-software.com/> [Accessed 30 Jul. 2017].

Gaiddon, B. & Jedliczka, M. (2006). Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities. The compilation of this report has been supported by the French Agency for Environment and Energy Management, ADEME/IEA, Hespul, Villeurbanne, France.

- Gardiner, S. (2006). *A Perfect Moral Storm: Climate Change, Intergenerational Ethics and the Problem of Moral Corruption*. *Environmental Values* 15, 397–413.
- Gerbinet, S., Belboom, S. and Léonard, A. (2014). Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp.747-753.
- Gobierno de la República. (23 de septiembre del 2014). *Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el periodo 2020-2030*. México: Gobierno de la República.
- Green, M., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E., Levi, D. and Ho-Baillie, A. (2016). Solar cell efficiency tables (version 49). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(1), pp.3-13.
- Guinée, J. B. (1995). *Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products, with a case study on margarines*. Dissertation, Leiden University. [online] Available at: <http://openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/8052>
- Guinée, J. B. (Ed.), Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. de, Oers, L. van, Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H. A., Bruijn, J. A. de, Duin, R. van, & Huijbregts, M. A. J. (2002). *Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards*. Series: Eco-efficiency in industry and science (Vol. 7). Dordrecht: Springer.
- Guinée, J. B., & Heijungs, R. (2011). Life cycle sustainability analysis: Framing questions to approaches. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), pp.656–658.

- Guinée, J. B., Udo de Haes, H. A., & Huppes, G. (1993). Quantitative life cycle assessment of products: Goal definition and inventory. *Journal of Cleaner Production*, 1(1), pp.3–13.
- Guinee, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, R., Buonamici, R., Ekvall, T., and Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), pp.90-96.
- Hauschild, M., & Wenzel, H. (1998). *Environmental assessment of products*. Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development – Volume 2: Scientific background. London: Chapman & Hall.
- Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo de Haes, H. A., Wegener Sleeswijk, A., Ansems, A. M. M., Eggels, P. G., van Duin, R., & de Goede, H. P. (1992). *Environmental life cycle assessment of products*. Guide and backgrounds. Leiden: Leiden University, Centre of Environmental Science.
- Hellweg, S. and Mila i Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344(6188), pp.1109-1113.
- Hsu, D., O'Donoghue, P., Fthenakis, V., Heath, G., Kim, H., Sawyer, P., Choi, J. and Turney, D. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation. *Journal of Industrial Ecology*, 16, pp.S122-S135.
- IEA. (2016). *World Energy Investment*. [online] Available at: <https://www.iea.org/investment/> [Accessed 14 Sep. 2016].

IEA. (2016a). International Energy Outlook 2016. [online] Available at:

<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/emissions.pdf> [Accessed 14 Dec. 2016].

IHOBE. (2009). *Análisis del ciclo de vida y Huella de carbono: dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*. España: IHOBE- Sociedad Pública de Gestión Ambiental.

IIE . (2014).

<http://genc.iie.org.mx/genc/siger/frames.asp?mcontador=21336&url=mapas1%2Ehtm>

m. (I. d. Eléctricas, Productor) Recuperado el 30 de Noviembre de 2016, de

<http://genc.iie.org.mx/genc/siger/frames.asp?mcontador=21336&url=mapas1%2Ehtm>

m:

<http://genc.iie.org.mx/genc/siger/frames.asp?mcontador=21336&url=mapas1%2Ehtm>

m

INERE. (2017). *Inventario Nacional de Energías Renovables*. [online] Available at:

<https://dgel.energia.gob.mx/inere/> [Accessed 10 Feb. 2017].

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático*. Contribución

del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo

Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Resumen para

responsables de políticas) [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E.

Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B.

Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel & J.C. Minx

(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York,

NY, USA.

- IRENA & IEA-PVPS (2016). *End of life management*. Solar Photovoltaic Panels. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems.
- ISO 14040:2006. (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization.
- ISO 14044:2006. (2006). Environmental management - Life cycle assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006). UNE-EN ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.(ISO 14040:2006). AENOR.
- ITRPV (2017). *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)*. 2016 Results, Eighth Edition, March 2017. [online] VDMA & ITRPV. Available at: <http://www.itrpv.net>. [Accessed 14 Aug. 2017].
- Jungbluth, N. (2005). Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the swissecoinvent database. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 13(5), pp.429–446.
- Jungbluth, N., Bauer, C., Dones, R. and Frischknecht, R. (2004). Life Cycle Assessment for Emerging Technologies: Case Studies for Photovoltaic and Wind Power (11 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1), pp.24-34.
- Jungbluth, N., Stucki, M., Flury, K., Frischknecht, R. and Busser, S. (2012). *Life Cycle Inventories of Photovoltaics*. Version 2012. [online] Suiza: ESU Fair consulting in

- sustainability, pp.1-235. Available at: <http://www.esu-services.ch> [Accessed 5 Jan. 2017].
- Kato, K. (1999). *Energy resource saving and reduction in CO2 emissions as values of PV Technology: A review of life cycle analysis on PV technologies in Japan.*
- Kavlak, G., McNerney, J., Jaffe, R. and Trancik, J. (2015). Metals Production Requirements for Rapid Photovoltaics Deployment. *SSRN Electronic Journal.*
- Klöpffer, W. and Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA).* Weinheim: Wiley.
- Knapp, K.E., Jester, T.L. (2000). Energy balances for photovoltaic modules: status and prospects. In Rohatgi A & Benner J: IEEE Photovoltaics specialists conference <<http://www.ieeevsc.nrel.gov>>, Anchor- age, Alaska.
- Krieger, T. & Roekens-Guibert, H. (2006). Environmental impacts of Tedlar (R) PVF film for use in photovoltaic modules. *DuPont*, 302, pp. 774-1026.
- Lindeijer, F. (1996). *Normalization and valuation. In: Towards a methodology for life cycle impact assessment.* Brussels, Belgium: SETAC.
- Lindfors, L.-G., Christiansen, K., Hoffman, L., Virtanen, Y., Juntilla, V., Hanssen, O. J., Rønning, A., Ekvall, T., & Finnveden, G. (1995). *Nordic guidelines on life-cycle assessment.* Copenhagen: Nordic Council of Ministers.
- Lindfors, L.G. (Ed.) (1992). *Product life cycle assessment : Principles and methodology.* Copenhagen: Nordic Council of Ministers.
- Luque, A., Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.* 2nd edition. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.

Malm, U. (2008). Modelling and degradation characteristics of thin-film CIGS solar cells.

Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, 554, 81 pp. Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, Sweden. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-9291>
(Downloaded 10.06.13)

Markvart, T. (2009). *Solar electricity*. Chichester: Wiley.

Mason, J. M., Fthenakis V. M., Hansen T., Kim H. C. (2006) Energy Pay-Back and Life Cycle CO₂ Emissions of the BOS in an Optimized 3.5 MW PV Installation. *In: Prog. Photovolt. Res. Appl.* 14, pp. 179-190.

Méndez Muñiz, J. and Cuervo García, R. (2012). *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: Fundación Confemetal.

Moro, M. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. 1st ed. Madrid: Paraninfo, pp.32-40.

NREL. (2017). *Best Research-Cell Efficiencies*. National Renewable Energy Laboratory
Available at: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>

OMM. (2016). *Declaración de la OMM sobre el estado del clima*. [online] Suiza: Organización Meteorológica Mundial, pp.3-23. Available at:
<https://public.wmo.int/es/resources/library/declaraci%C3%B3n-de-la-omm-sobre-el-estado-del-clima-mundial-en-2015> [Accessed 14 Jan. 2017].

Palz, W., Zibetta, H. (1991). Energy pay back time of photovoltaic modules.
International Journal of Solar Energy, 10(3-4), pp.211–216.

- Pehnt, M., Bubenzer, A., Räuber, A. (2002). Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Systems: Trying to fight Deep-seated Prejudices. In: Bubenzer A, Luther J: *Photovoltaics Guidebook for Decision Makers*. Springer-Berlin, Germany
- Pfatischer, R. (2008) Evaluation of predicted and real operational data of different thin-film technologies. *In proceedings from: OTTI Thin Film User Forum, 28.01.2009*, Würzburg
- Phylipsen, GJM., Alsema, EA. (1995). Environmental life cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules. Report, 95057, Dept. of Science Technology and Society of Utrecht University (STS- UU), The Netherlands. Available at: <http://www.chem.uu.nl/nws/www/publica/95057.htm>.
- REN21 (2017). *Energías Renovables 2016*. Avanzando en la transición mundial hacia la energía renovable. [online] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Available at: <http://www.ren21.net> [Accessed 18 Ago. 2017].
- REN21. (2017a). *Renewables 2017*. Global Status Report. [online] París: REN21 Secretariat. Available at: <http://www.REN21.net>. [Accessed 15 Jul. 2017].
- REN21. (2017b). *Renewables 2017*. Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat.
- Romero, T. (2010). *Energía solar fotovoltaica*. 1ªEd. Barcelona: Ceac.
- Rosenkilde, C. (2012). Employee Norsk Hydro. *Solar cell technology*. Lectures in the course: TMT4285 Hydrogen technology, fuel cells and solar cells, 16.-17.02.2012, Norwegian University of Technology and Science, Trondheim, Norway.

- Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H. and Azapagic, A. (2011). Life cycle assessment of electricity generation in Mexico. *Energy*, 36(3), pp.1488-1499.
- Sánchez Juárez, A., Martínez Escobar, D., Santos Magdaleno, R., Ortega Cruz, J. and Sánchez Pérez, P. (2017). *Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial*. 1st ed. Ciudad de México: IER.
- Sanz Requena, J. (2009). *Fundamentos de energía solar fotovoltaica para los grados de titulaciones científico-técnicas*. Valladolid: Universidad Europea Miguel de Cervantes, Servicio de Publicaciones.
- SEMARNAT & INECC. (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010*. SEMARNAT, Primera edición, 384.
- SENER. (2016). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016-2030 (PRODESEN)*. Estados Unidos Mexicanos: Secretaría de Energía SENER.
- SENER. (2017). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2031 (PRODESEN)*. Estados Unidos Mexicanos: Secretaría de Energía SENER, pp.3-289.
- SHARP (2012). *Solar Electricity*. ND-240QCJ. [online] U.S.A: Sharp Electronics Corporation. Available at: <http://www.sharppusa.com/solar> [Accessed 3 Aug. 2017].
- Sherwani, A., Usmani, J. and Varun (2010). Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp.540-544.

- Simon, F.-G., Holm, O., Berger, W. (2013). Resource recovery from urban stock, the example of cadmium and tellurium from thin film module recycling. *Waste Management*, 33 (4), pp. 942-947.
- Singh, A., Olsen, S. and Pant, D. (2013). *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources: Importance of Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*. London: Springer, pp.1-11.
- SolarPowerEurope. (2017). *Global Market Outlook*. [online] Available at: http://www.solarpowereurope.org/index.php?eID=tx_nawsecured1&u=0&g=0&t=1497053099&hash=6522f36ae1272214d8f7e1a0f269df620eabee1c&file=fileadmin/user_upload/GMO_2017.pdf [Accessed 9 May 2017].
- SPEDT. (2009). *Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables*. Gobierno Mexicano, Subsecretaría de Planeación y Desarrollo Tecnológico. México: Diario Oficial de la Federación.
- Stamford, L. and Azapagic, A. (2014). Life cycle environmental impacts of UK shale gas. *Applied Energy*, 134, pp.506-518.
- TopCable. (2017). *Manufacture & International supply of Electric Cables / Top Cable*. [online] Available at: <http://www.topcable.com> [Accessed 11 Apr. 2017].
- Tsuo, Y.S., Gee, J.M., Menna, P., Strebkov, D.S., Pinov, A., Zadde, V. (1998). Environmentally benign silicon solar cell manufacturing. In: Fthenakis V, Moskowitz P, Zweibel K: Photovoltaics and the Environment. Pages: 1.5, Brookhaven National Laboratory and the National Renewable Energy Laboratory <http://www.nrel.gov/ncpv/pdfs/tsuo.pdf>.

- UNAM, G. (2017). *Atlas Solar de la Sección de Radiación Solar, Geofísica, UNAM*.
[online] Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica.
Available at: http://www.geofisica.unam.mx/radiacion_solar/atlas.php [Accessed 28 Aug. 2017].
- UNEP & SETAC (2004). *¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida?*. [online] París: United Nations. Available at: <http://www.unep.org> [Accessed 12 Jun. 2017].
- UNEP. Environment Programme Life Cycle Initiative. United Nations Environment Programme website; <http://lcinitiative.unep.fr/>.
- Vigon, B. W., Tolle, D. A., Cornaby, B. W., Latham, H. C., Harrison, C. L., Boguski, T. L., Hunt, R. G., & Sellers, J. D. (1993). *Life-cycle assessment: Inventory guidelines and principles* (EPA/600/R-92/245). Washington, DC: Environmental Protection Agency.
- WEC. (2013). *World Energy Resources: a summary*. England, de World Energy Council.
- WEC. (2014). *Energy market reform*. London; 2004, de World Energy Council.
- WEC. (2016). *World Energy Perspectives: renewables Integration 2016*. September 2016, de WEC Sitio web: <https://www.worldenergy.org>
- WEC. (2004). *Energy market reform*. London: World Energy Council.
- Zuser, A., Rehnberger, H. (2011). Considerations of resource availability in technology development strategies: The case study of photovoltaics. *Resources, Conservation and Recycling*, 56 (1), pp. 56-65.