



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

ANÁLISIS DE LA CADENA DE VALOR DE LA INDUSTRIA FOTOVOLTAICA EN MÉXICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

MARIANO OSVALDO BIRLAIN ESCALANTE

TUTOR PRINCIPAL:

DR. JORGE MARCIAL ISLAS SAMPERIO, IER-UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. FABIO LUIGI MANZINI POLI, IER-UNAM

DR. AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ, IER-UNAM

DR. JOSE ANGEL DE LA VEGA NAVARRO, FACULTAD DE ECONOMÍA-UNAM

DR. ARTURO MORALES ACEVEDO, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA-CINVESTAV-IPN

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice general

Índice general	2
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas	6
Capítulo 1. El valor y la Cadena de Valor.	9
1.1 Definición de Valor.	9
1.2 Definición de Cadena de Valor.	12
1.2.1 Actores en el desarrollo de la Cadena de Valor.....	18
1.2.2 Gobernanza de la Cadena de Valor.	19
Capítulo 2. La Industria Fotovoltaica	24
2.1 La tecnología fotovoltaica.....	26
2.1.1 Celdas Fotovoltaicas.....	27
2.1.2 Módulos fotovoltaicos	33
2.1.3 Sistemas Fotovoltaicos	34
2.2 La cadena de valor de la industria fotovoltaica.....	36
2.2.1 La parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica.....	38
2.2.2 La parte descendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica.....	58
Capítulo 3. Políticas para el desarrollo de la industria fotovoltaica.	63
3.1 La Política Industrial	63
3.2 La Política Energética.	72
3.2.1 La Generación Distribuida como política energética para el desarrollo de la industria fotovoltaica en México.....	74
3.2.2 Promoción de la Generación Distribuida en México.....	76
3.3 Políticas Públicas para el desarrollo de la Industria Fotovoltaica: Experiencia Internacional.	82
3.3.1 Alemania.....	85
3.3.2 China.....	90
3.3.3 Estados Unidos de América.....	96
3.4 La transferencia tecnológica como política para el fomento de la industria fotovoltaica.	99
Capítulo 4. Beneficios socio-económicos de la industria fotovoltaica.	103
4.1 Valor agregado.	106
4.2 Empleo.	108
4.3 Seguridad Energética.....	111

Capítulo 5. Marco Normativo para el desarrollo de cadenas de valor relacionadas con la industria eléctrica.	115
Capítulo 6. La Industria Fotovoltaica en México.	119
6.1 Situación actual de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.	125
Capítulo 7. Escenarios de desarrollo e integración ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.	133
7.1 Metodología General.	133
7.2 Construcción de escenarios.	134
7.2.1 Año de referencia.	134
7.2.2 Escenario Base.	135
7.2.3 Construcción del Escenario Alternativo.	139
7.3 Modelos de Cálculo.	140
7.3.1 Modelo de Costos.	140
7.3.2 Modelo del Precio Mínimo Sostenible (MSP).	147
7.3.3 Modelo de Proporción de Contenido Nacional.	149
7.3.4 Beneficios socioeconómicos.	151
Capítulo 8. Resultados.	157
8.1 Año de Referencia.	157
8.2 Escenario Base.	158
8.3 Escenario Alternativo.	165
9. Discusión.	174
10. Conclusiones.	179
11. Anexos	180
12. Referencias	185

Índice de Figuras

Figura 1. Cadena de Valor	13
Figura 2. La Cadena de Valor y sus actividades.....	17
Figura 3. Estructuras de Gobernanza dentro de las cadenas de valor.....	20
Figura 4. Actividades de la Cadena de Valor de la Industria Fotovoltaica.....	37
Figura 5. Planta de reducción carbotérmica para la producción industrial de silicio metálico. ...	40
Figura 6. Mezclas de materiales carbonosos usados para la producción de MG-Si.....	41
Figura 7. Desglose del costo de producción de MG-Si por reducción carbotérmica.	42
Figura 8. Diagrama de flujo de proceso típico para la producción de Poly-Si en Hemlock y b) Representación de un reactor Siemens tradicional.	43
Figura 9. Figura 6. Participación en la producción mundial de Poly-Si en 2018.	44
Figura 10. Desglose del costo de producción de Poly-Si mediante el proceso Siemens.....	45
Figura 11. Proceso Cz para la elaboración de lingotes y obleas de Poly-Si.....	48
Figura 12. Participación en la producción mundial de obleas de Poly-Si en 2018.....	49
Figura 13. Desglose del costo de producción de obleas de Poly-Si.....	50
Figura 14. Proceso para la fabricación de CFV tipo PERC.....	51
Figura 15. Participación en la producción mundial de CFV en 2018.....	52
Figura 16. Desglose del costo de producción de CFV tipo PERC.....	53
Figura 17. Proceso para la fabricación de un módulo de silicio monocristalino de 60 celdas y MFV terminado.....	55
Figura 18. Participación en la producción mundial de MFV en 2018.....	55
Figura 19. Desglose del costo de ensamblar un MFV.....	57
Figura 20. Capacidad instalada de energía solar fotovoltaica, 2008-2018.	58
Figura 21. Participación en la instalación de nueva capacidad fotovoltaica en 2018.....	60
Figura 22. Evolución de la Generación Distribuida en México al primer semestre de 2023.	74
Figura 23. Participación de las diferentes tecnologías de Generación Distribuida en México al primer semestre de 2023.	75
Figura 24. Atribuciones de los actores públicos de acuerdo con el nuevo marco normativo de la Reforma Energética en materia de electricidad.	78
Figura 25. Esquemas de contraprestación para la GD.....	80

Figura 26. Marco Conceptual para el análisis de los efectos socioeconómicos del despliegue de energías renovables a gran escala.	106
Figura 27. Planta piloto para la fabricación de celdas y módulos fotovoltaicos del CINVESTAV	120
Figura 28. Primeras aplicaciones de módulos FV fabricados en México.....	121
Figura 29. Ejemplos de sistemas de bombeo fotovoltaico instalados en México a través de los programas MREP y PERA entre 1994 y 2006.....	122
Figura 30. Concentración de Bienes y Servicios para la Industria Fotovoltaica a nivel Nacional, 2023.....	128
Figura 31. Número de empresas según el bien o servicio suministrado a la Industria Fotovoltaica, 2023.....	129
Figura 32. Promedio de capacidad instalada de generación distribuida por contrato de interconexión en México.....	131
Figura 33. Curva de aprendizaje del precio de módulo FV en función de la demanda global. ..	142
Figura 34. Demanda acumulada de MFVs a nivel mundial 2018 – 2040.....	143
Figura 35. Evolución de la capacidad de producción de la CVIFM en el Escenario Base, 2018 - 2040.....	159
Figura 36. Evolución anual de capacidad de ensamble, demanda e importaciones de MFV en el Escenario Base en México, 2018 – 2040.....	160
Figura 37. Evolución de la capacidad de producción de la CVIFM en el Escenario Alternativo, 2018 -2040.	164
Figura 38. Evolución anual de capacidad producción e importaciones de la CVIFM en el Escenario Alternativo y el Escenario Base en relación con la demanda nacional de MFV, 2018 – 2040.....	165
Figura 39. Evolución en el desarrollo del Escenario Alternativo y su impacto en el decremento de los costos de fabricación con relación al Escenario Base, 2018 – 2040.	168
Figura 40. Evolución de la incorporación de políticas de desarrollo al Escenario Alternativo, 2018 – 2040.....	176

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos y Criterios determinantes en la Gobernanza de las Cadenas de Valor.	23
Tabla 2. Eficiencias confirmadas para diferentes tipos de módulos fotovoltaicos clasificados según su tipo celda solar.	33
Tabla 3. Principales países productores de MG-Si, 2018.	41
Tabla 4. Principales empresas y países productores de Poly-Si en 2019.	45
Tabla 5. Principales empresas y países productores de obleas de Poly-Si en 2018.	49
Tabla 6. Principales empresas y países productores de CFV en 2018.	53
Tabla 7. Principales empresas y países productores de MFV en 2018.	56
Tabla 8. Tipos de Políticas Industriales.	65
Tabla 9. Fortalezas y debilidades del uso del valor agregado y el empleo como efectos para analizar el desarrollo de las energías renovables.	110
Tabla 10. Empresas productoras de módulos solares en México en 2018.	126
Tabla 11. Clasificación de Bienes y Servicios proveídos a las Industria Fotovoltaica.	127
Tabla 12. Centrales fotovoltaicas en México.	130
Tabla 13. Variables técnicas y económicas para determinar el costo de fabricación de un módulo fotovoltaico en México en 2018.	135
Tabla 14. Datos históricos sobre la capacidad de producción de la CVIFM.	136
Tabla 15. Costos de inversión de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, 2018.	137
Tabla 16. Industrias consideradas y relacionadas con el suministro de materias primas a la parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.	138
Tabla 17. Cambio en variables técnicas y económicas derivado del progreso tecnológico considerando una completa integración de la CVIFM en 2018 y en 2040.	144
Tabla 18. Cambio en el costo total de manufactura derivado del progreso tecnológico considerando una completa integración de la CVIFM en 2018 y en 2040.	145
Tabla 19. Capex por eslabón de la cadena de valor de la industria fotovoltaica para el año de referencia.	146
Tabla 20. Tasa de descuento y numero de periodos por eslabón para elaborar el flujo de efectivo.	148
Tabla 21. Costo de manufactura de un MFV en México en 2018.	157

Tabla 22. Proporción de Contenido Nacional de la CVIFM en el año de referencia.	158
Tabla 23. Capacidad instalada, generación de electricidad y emisiones de GEI con base en las perspectivas nacionales, 2018 – 2040.....	158
Tabla 24. Costos de fabricación (USD/W) para un MFV en el Escenario Base.	161
Considerando lo anterior, para satisfacer la demanda nacional de tecnología fotovoltaica para la generación de electricidad en el presente escenario, se tienen que invertir un total acumulado de 11,383 MUSD a lo largo del periodo de estudio; donde el 52% corresponde a las ventas totales de la producción de la CVIFM, mientras que el 49% corresponde al valor total de las importaciones de tecnología fotovoltaica (MFV) (véase Tabla 25).	161
Tabla 26. Beneficios socioeconómicos totales de la CVIFM en el Escenario Base.....	163
Tabla 27. Flujo de efectivo para el Escenario Base, 2018 – 2040.	164
Tabla 28. Evolución de la capacidad de producción, costos y precios de la CVIFM en el Escenario Alternativo.....	165
Tabla 29. Costos de fabricación (USD/W) derivados de la integración ascendente e incrementos de capacidad de producción de la CVIFM en el Escenario Alternativo.	168
Tabla 30. Proporción de materiales e insumos de origen nacional en la fabricación de los productos finales de cada eslabón de la CVIFM en el Escenario Alternativo.....	169
Tabla 31. Proporción de contenido nacional de cada eslabón de la CVIFM en el Escenario Alternativo.	171
Tabla 32. Beneficios socioeconómicos totales de la CVIFM en el Escenario Alternativo.	171
Tabla 33. Evolución de la generación de empleos y valor agregado en términos de la integración de eslabones de la CVIFM en el Escenario Alternativo, 2018-2040.....	172
Tabla 34. Flujo de efectivo para el Escenario Alternativo, 2018 – 2040.....	173
Tabla 35. Escenario de políticas propuestas para el desarrollo de la CVIFM y su impacto en relación con el Escenario Alternativo propuesto.	177
Tabla. A. 1. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón MFV.	182
Tabla. A. 2. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón CFV.....	183
Tabla. A. 3. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón Oblea.....	184

Tabla. A. 4. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón Poly-Si.	185
Tabla. A. 5. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón MG-Si.	186

Capítulo 1. El valor y la Cadena de Valor.

1.1 Definición de Valor.

De acuerdo con el diccionario de la Universidad de Cambridge el *valor* puede definirse como “la cantidad de dinero que se recibe por algo” o como “la importancia o utilidad de algo para alguien”. Esta disyuntiva entre si el valor puede ser visto como algo objetivo o subjetivo ha generado una disputa entre economistas y filósofos desde el siglo XIX y en el centro de esta disputa se encuentra la Teoría del Valor. Según (Schroeder, 2016), los economistas políticos clásicos encontraron que el valor se determinaba en la producción; dado que la mayor parte del costo de producción se podía reducir a la mano de obra, este enfoque se refinó en la *Teoría del Valor del Trabajo*. Los economistas neoclásicos buscaron valor en el acto de intercambio del mercado y desarrollaron la *Teoría Marginal del Valor*. Ambas teorías están actualmente fueron desafiadas por los poskeynesianos con su *Teoría Sraffiana del Valor*, que, como la teoría del valor trabajo, se basa en la producción más que en el intercambio. Sin embargo, cualquier teoría del valor en economía es una formulación extremadamente abstracta, siendo la principal intersección entre economía y filosofía (Schroeder, 2016).

Desde el punto de vista objetivo, el valor de un objeto, bien o servicio, es intrínseco, lo que significa que puede estimarse utilizando medidas objetivas. La mayoría de estas teorías consideran el proceso de producción de un artículo y los costos involucrados en ese proceso como una medida del valor intrínseco del artículo. La teoría del valor trabajo es un ejemplo temprano de una teoría intrínseca, que originalmente fue propuesta por Adam Smith y desarrollada más adelante por David Ricardo y Karl Marx (Butler, 2012). Por otro lado, desde el punto de vista subjetivo, Carl Menger propone la idea de que el valor de un bien no está determinado por ninguna propiedad inherente del bien, ni por la cantidad de trabajo necesaria para producir el bien, sino que el valor está determinado por la importancia que un individuo que actúa otorga a un bien para el logro de sus fines deseados (Menger, 2007).

En otras palabras, para estimar valor de un producto, algunos consideran más importantes las variables objetivas (c). Sin embargo, otros académicos dan más relevancia a los factores subjetivos como la satisfacción o el beneficio que brinda el bien o servicio al consumidor.

En este sentido, Porter (1985) define al valor como: “la cantidad que los compradores están dispuestos a pagar por lo que proporciona una empresa”. Considerando que el valor se encuentra en los beneficios que se acumulan para los clientes (valor subjetivo), los procesos interdependientes que lo generan y la demanda resultante y flujos de fondos que se crean (valor objetivo). Y de acuerdo con esto, Feller et. al. (2006), consideran que el valor tiene tres características principales: 1) es subjetivo y depende del contexto en que se dé; 2) el valor se da cuando al satisfacer las necesidades a través de la provisión de productos, recursos o servicios, generalmente durante algún tipo de transacción o intercambio y 3) el valor es una experiencia que fluye desde aquel que recibe los recursos, el consumidor, hacia el productor. Por lo tanto, es importante centrarse en desarrollar la apreciación y el conocimiento de las necesidades y los valores del consumidor, para luego organizar las actividades de la empresa para satisfacer esas necesidades de manera rápida, precisa y con un costo mínimo. Así mismo, para las corporaciones, la capacidad de proporcionar valor a los clientes genera ingresos que exceden los costos de producir ese valor, es decir, capturan valor al generar ganancias (Sjödin, Parida, & Jovanovic, 2020) (Verdin & Tackx, 2015)(Parcell, Brees, & Giddens, 2004). Desde un punto de vista industrializado, considerando la elaboración de productos basada en una línea de ensamblaje, el valor se va generando a través de las distintas etapas de producción al transformar los insumos en productos mediante el uso de tecnologías de enlace largo o secuenciales¹; la línea de ensamblaje está diseñada para producir productos estandarizados a bajo costo por unidad al proteger las actividades del proceso de producción de las fluctuaciones de entrada o salida a corto plazo en actividades adyacentes mediante el almacenamiento intermedio y al aprovechamiento de las economías de escala. Donde el producto final resulta el medio para transferir valor entre la empresa y sus clientes (Stabell

¹ Una tecnología de enlace largo o secuencial se refiere a la combinación en una organización de etapas sucesivas de producción, cada etapa de producción utiliza como insumos la producción de la etapa anterior y produce insumos para la etapa siguiente, dando como resultado un producto final que está disponible para los clientes (Mahoney & Frost, 1974). Las empresas a gran escala que utilizan la producción de líneas de ensamblaje para producir bienes o servicios a través de una secuencia de actividades, como en la industria automotriz, son ejemplos de tecnologías de enlace largo.

& Fjeldstad, 1998). A este valor capturado, comúnmente se le denomina *valor agregado* (Hellin & Meijer, 2006).

Porter (1985) también hace énfasis en que el valor de los productos está en función de los criterios que tenga el consumidor al adquirir los productos (Buyer Purchasing Criteria). Dando lugar a la selección específica de productos para cubrir ciertas necesidades o a la *diferenciación*. Los productos diferenciados suelen exigir un precio más alto al proporcionar una mejor coincidencia con los criterios de compra del consumidor. Estos criterios de compra son obtenidos generalmente a través de la mercadotecnia, la cual se encarga de analizar el comportamiento de los consumidores y de crear, comunicar, entregar e intercambiar ofertas que tienen valor para los consumidores, satisfaciendo así sus necesidades (AMA, 2013). Además, la mercadotecnia tiene dos propósitos complementarios. El primero está en el desarrollo y refinamiento de la cadena al proporcionar especificaciones de productos y estimaciones de volumen. El segundo es simular el nivel requerido de demanda para el rendimiento de la cadena para garantizar una operación estable y la utilización de la capacidad. El servicio posterior a la compra se realiza para garantizar el uso correcto del producto por parte del consumidor, para remediar los defectos o para aumentar la vida útil del producto (Stabell & Fjeldstad, 1998). De acuerdo con esto, el valor se crea cuando las necesidades de los clientes se satisfacen a través de un intercambio de productos y/o servicios. Creando valor a partir del desarrollo de la tecnología, reduciendo el costo de un producto a través de mejoras en los procesos o aumentando el precio exigible al mejorar la adaptación del producto a los criterios de compra del consumidor, definidos por los ahorros que el producto puede proporcionar en sus actividades o por las mejoras de rendimiento que este puede obtener al usar el producto (Sjödin et al., 2020) (Verdin & Tackx, 2015)(Parcell et al., 2004). De esta manera, la estrategia de la diferenciación de Porter (1980) tienen como objetivo mejorar o aumentar el valor de un producto en relación con el valor promedio de su industria mediante la satisfacción de las necesidades de los consumidores. Lo que permite identificar aquellas fuentes de ventaja competitiva; la cual se obtiene cuando se puede proporcionar el mismo valor que los competidores, pero a un precio más bajo, o puede cobrar precios más altos al proporcionar un mayor valor a través de la diferenciación.

Finalmente, si se considera todo lo anterior, se puede decir que la definición de valor radica principalmente en determinar si es un valor objetivo en el que existe una captura de valor que genera un *valor agregado*. O si se trata de un valor subjetivo, en donde el valor es creado cuando genera un *beneficio* cada vez que el valor satisface una necesidad.

1.2 Definición de Cadena de Valor.

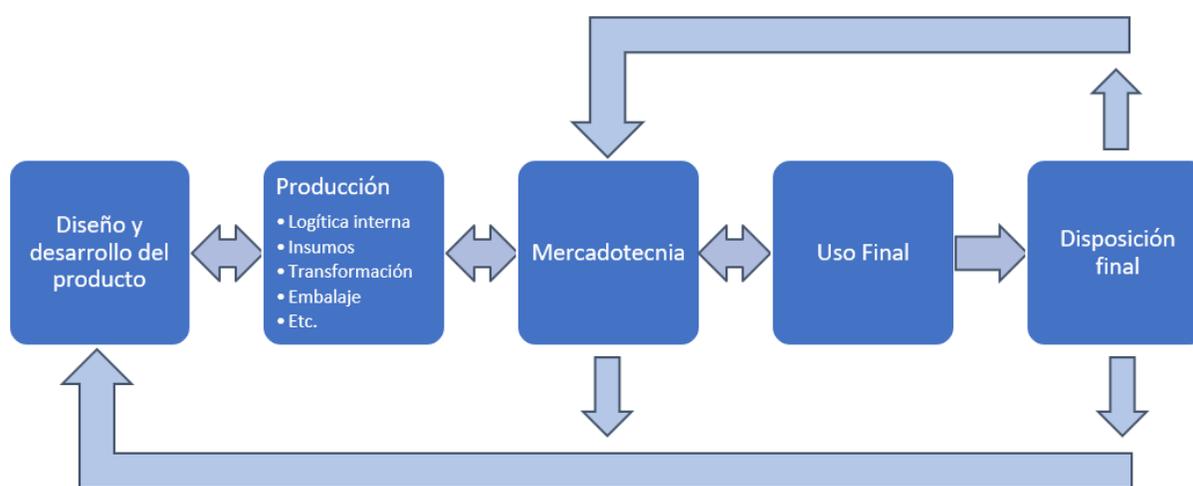
A lo largo de los años, se ha definido de diferentes maneras el cómo las empresas² organizan sus actividades según las relaciones específicas que surjan entre éstas y otros agentes dentro de las mismas (Gary Gereffi, Humphrey, Kaplinsky, & Sturgeon, 2001); lo cual se realizó mediante el análisis de conceptos como: cadenas de productos básicos (Hernández & Pedersen, 2017; Selwyn, 2015), cadenas de suministro (Al-Mudimigh, Zairi, & Ahmed, 2004; Connelly, Ketchen, & Hult, 2013; Priem & Swink, 2012) o cadenas de valor (Kaplinsky, 2000; Kaplinsky & Morris, 2002; Porter, 1985). La principal diferencia entre estos conceptos radica en el objeto principal de su análisis; las cadenas de productos básicos analizan a las industrias y sus relaciones de autoridad y poder, explicando el cómo una empresa líder (Mahatuga, 2011) da forma, controla, coordina y distribuye valor a través de una red de procesos de trabajo y de producción cuyo resultado final es un producto terminado (J. Lee, 2010) (Azmeah & Nadvi, 2014). Las cadenas de suministro abarcan los esfuerzos involucrados en la producción y entrega de un producto o servicio final, explicando las relaciones de las empresas con los proveedores y clientes para ofrecer productos o servicios a un costo menor (Feller, Shunk, & Callarman, 2006; Hernández & Pedersen, 2017). Mientras que el concepto de cadena de valor va un paso más allá y explica cómo las entidades pueden conectarse y crear un valor que sea una fuente de ventaja competitiva (Al-Mudimigh et al., 2004; Stabell & Fjeldstad, 1998).

El concepto de cadena de valor fue presentado por primera vez por el experto en negocios Michael Porter, famoso por su investigación sobre competitividad y estrategia. Porter y otros autores (Kaplinsky, 2000) (Kaplinsky & Morris, 2002) describieron la cadena de valor como una *herramienta para el análisis estratégico, basada en la visión procesual de las organizaciones,*

² Una empresa es una entidad legal y administrativa que posee un conjunto de habilidades aprendidas, instalaciones físicas y capital, siendo los instrumentos económicos para la producción y distribución de bienes y servicios actuales y para la planificación y asignación para la producción y distribución futuras (Chandler, 1992).

definiéndola como una gama completa de actividades requeridas para llevar un producto o servicio desde la concepción, a través de las diferentes etapas de producción (involucrando una combinación de transformación física y de diversos servicios usados por el productor), entrega a los consumidores finales y su disposición final después de ser usado y donde cada una de las etapas son comúnmente conocidas como *eslabones*. La cantidad de eslabones y/o actores que componen una cadena de valor cambia de manera importante según el tipo de industria y donde dichas actividades o eslabones pueden ser realizados por una o varias empresas (actores de la cadena) (Kaplinsky, 2000; Kaplinsky & Morris, 2002). De acuerdo con esta definición, una cadena de valor tomaría la forma mostrada en la Figura 1, donde puede observarse que la producción *per se* es solo uno de una serie de enlaces que van generando un valor agregado.

Figura 1. Cadena de Valor



Fuente: Figura adaptada de (Kaplinsky & Morris, 2002).

Comúnmente la cadena de valor suele representarse como una cadena vertical, sin embargo, en el mundo real, las cadenas de valor suelen ser en ocasiones mucho más complejas que esto, tendiendo a existir muchos más enlaces en la cadena que inclusive pueden ser llevados a una escala global, dando pie a una *cadena de valor global*. La cual, de acuerdo con algunos autores, apunta hacia un nuevo sistema denominado *fábrica global* (P. Buckley, 2011; Gary Gereffi & Fernandez-Stark, 2016), el cual describe cómo las empresas pueden reducir los costos de ubicación y transacción al organizar la cadena de valor global de tal manera que todas las actividades estén vinculadas por flujos internacionales de productos intermedios que las compañías multinacionales controlan pero

que no necesariamente posee, donde el conocimiento se internaliza cada vez más (Buckley & Strange, 2015) y donde los intermediarios de una cadena de valor en particular pueden alimentar una serie de cadenas de valor alternas al proceso vertical las cuales tienden a absorber solo una pequeña parte de su producción y por ende del valor agregado (Kaplinsky, 2002). No obstante, la participación en el valor agregado puede no captar la historia completa, ya que dentro de la dinámica de un mercado o tecnología determinados un proveedor relativamente, pequeño puede convertirse en un proveedor relativamente grande, o viceversa, en el futuro. Además, la participación en el valor agregado puede resultar engañosa, ya que hay ocasiones en las que un proveedor tener el control sobre una tecnología o insumo indispensable en el proceso producción, y sin embargo, su participación puede ser una parte relativamente pequeña del proceso de generación de valor (Kaplinsky, 2000; Kaplinsky & Morris, 2002).

De acuerdo con (UNIDO, 2009)(Gary Gereffi, Humphrey, & Sturgeon, 2005)(Gary Gereffi, 1999), una cadena de valor se puede analizar considerando los siguientes aspectos:

- *La estructura de insumo-producto.* La cual remite a su origen y destino las transacciones económicas intersectoriales, en función de los niveles de producción de cada sector de actividad y las importaciones de bienes que se requieren.
- *La cobertura geográfica.* Donde se observa que tanta extensión tiene la cadena de valor en términos territoriales, pudiendo ser local, regional o global. Aquí también se puede distinguir entre las cadenas de valor nacionales donde los productos se comercializan únicamente dentro del país y las cadenas de valor globales donde el producto se procesa y/o comercializa en un país diferente al de origen de sus productos primarios.
- *La gobernanza de la cadena de valor.* Es en donde se define el marco relacional en que económicamente actuarán los actores involucrados, se relacionarán entre estas y con otras instituciones de apoyo que pueden provenir del gobierno o del sector privado.
- *El grado de transformación del producto.* Ciertos productos, como los perecederos, solo requieren unos pocos pasos de transformación en las cadenas de valor. En cambio, los no perecederos pueden precisar de muchas etapas para su procesamiento. El grado de transformación se encuentra también estrechamente relacionado con el nivel de sofisticación de la tecnología utilizada. En algunas cadenas de valor únicamente se utilizan los conocimientos tradicionales (como ocurre, por ejemplo, con ciertas producciones

artesanales), mientras que en otras se emplean tecnologías de vanguardia (es el caso de la industria de los semiconductores).

- *El marco regulatorio institucional.* Es aquel que influye en el desarrollo de las cadenas de valor. Incluyen el marco regulatorio, las políticas, los regímenes comerciales, las intervenciones de mercado, las infraestructuras, etc. a nivel local, nacional e internacional y determinan si existen entornos propicios para la cadena de valor nacional y mundial.

También es de utilidad un análisis de la cadena de valor para la identificación de relaciones de poder o jerarquía en esta, que tienen un impacto directo en la organización global de la industria y en los espacios asignados a las empresas establecidas en un país o región en especial. Además, el marco de análisis de la cadena de valor postula que la ventaja competitiva se entiende mejor al desagregar el proceso a partir del cual el *valor* es creado. Porter propone que, al desagregar las actividades de un proceso, se debe de considerar que las actividades resultantes tienen diferentes aspectos económicos además de un alto impacto potencial en la diferenciación (o valor) de un producto o servicio, lo finalmente puede determinar una posición competitiva.

La configuración de la cadena de valor puede clasificarse genéricamente en dos niveles de actividades de creación de valor: actividades primarias y actividades de apoyo (Porter, 1985). Las actividades primarias tratan directamente con productos físicos y se encuentran directamente involucradas en crear y aportar valor al consumidor. Mientras que las actividades de apoyo son las que permiten y mejoran el desempeño de las actividades primarias. Las actividades de apoyo solo afectan el valor entregado a los clientes en la medida en que afectan el desempeño de las actividades primarias. Para las actividades primarias, Porter propone una desagregación genérica en cinco categorías de una cadena de valor:

- a) *Logística entrante.* Actividades asociadas con la recepción, almacenamiento y diseminación de insumos al producto.
- b) *Operaciones.* Actividades asociadas a la transformación de insumos en la forma del producto final.
- c) *Logística de salida.* Actividades asociadas con la recolección, almacenamiento y distribución física del producto a los compradores.

- d) *Marketing y ventas*. Actividades asociadas con proporcionar un medio por el cual los compradores pueden comprar el producto e inducirlo a hacerlo.
- e) *Servicio*. Actividades asociadas con la prestación de servicios para mejorar o mantener el valor del producto.

Las primeras tres actividades primarias, pueden categorizar de manera adecuada el proceso de creación de valor de una industria manufacturera. El *marketing* se incluye como una categoría de actividad principal, ya que estas actividades informan al cliente de las características relevantes del producto y aseguran la disponibilidad del producto en el mercado. De manera similar, la inclusión del *servicio* como una actividad primaria se deriva del hecho de que el servicio puede ser crítico para el valor realizado por el cliente.

Para el caso de las actividades de soporte, la categorización es la siguiente:

- a) *Obtención*. Actividades realizadas en la compra de insumos utilizados en la cadena de valor.
- b) *Desarrollo tecnológico*. Actividades que pueden agruparse ampliamente en esfuerzos para mejorar el producto y el proceso.
- c) *Gestión de recursos humanos*. Actividades de reclutamiento, contratación, capacitación, desarrollo y compensación de personal.
- d) *Infraestructura de la empresa*. Actividades de administración general, planificación, finanzas, contabilidad, asuntos legales, asuntos gubernamentales y gestión de calidad.

Las categorías de actividades de soporte no están vinculadas de forma única a la lógica de creación de valor de una tecnología de enlace largo. Porter no defiende explícitamente su categorización de las actividades de apoyo, únicamente trata de cubrir dentro de esta aquellas funciones que no están incluidas en la categorización de las actividades primarias. Así mismo, es importante mencionar que esta categorización de actividades de la cadena de valor no pretende modelar un flujo real de producción. Únicamente intenta dar un enfoque que pueda utilizarse para identificar necesidades u oportunidades de mejora estratégica. Así como identificar aquellas actividades críticas para la generación de valor que proporcionan una base para comprender y desarrollar una ventaja

competitiva desde la perspectiva de la empresa en su conjunto. Pero no es necesariamente útil para especificar una reingeniería de los procesos de negocios.

Finalmente, Porter (1985) establece que la cadena de valor de una empresa está incorporada en un sistema de cadenas de valor interconectadas. Este sistema de valores puede incluir la cadena de valor de los proveedores de materias primas y componentes. Así como cadenas de valor de distintos canales de distribución antes de que el producto se convierta en parte de la cadena de valor del comprador. De manera general, el sistema comprende, por lo tanto, una cadena de cadenas de actividades primarias entrelazadas secuencialmente que transforman gradualmente las materias primas en el producto final valorado por el comprador.

La Figura 2 muestra la representación de una cadena de valor en la cual se involucran las actividades primarias y las actividades de apoyo. La secuencia y el formato de flecha del diagrama subraya la naturaleza secuencial de las actividades de valor primario. Las actividades de apoyo en la mitad superior potencialmente se aplican a todas y cada una de las actividades primarias. La sobreposición de las actividades de apoyo aparentemente pretende decirnos que las actividades se realizan en paralelo con las actividades primarias. El margen, al final de la flecha de la cadena de valor, subraya que todas las actividades son elementos del costo que, en conjunto, producen el valor entregado al final de la cadena.

Figura 2. La Cadena de Valor y sus actividades.



Fuente: Figura adaptada de (Porter, 1985).

El analizar de esta manera una cadena de valor, nos ayuda a entender la participación de los eslabones, ya sea, desde la óptica de la organización industrial, o en términos de desarrollo económico y social, debido a que las actividades asociadas con cada eslabón tienen diferente

intensidad en el uso de recursos (capital, tecnología, mano de obra o recursos naturales), distinta oportunidad de encadenamientos productivos y, en consecuencia, oportunidades diferenciadas para el desarrollo de capacidades locales.

1.2.1 Actores en el desarrollo de la Cadena de Valor.

Los actores de las cadenas de valor son principalmente las empresas y personas que asumen diferentes funciones en la cadena de valor, involucrándose directamente en la producción, procesamiento y comercialización. Por lo general, son el propietario del producto y/o toman posiciones activas en el mercado.

Comúnmente se puede distinguir entre dos tipos principales de actores de la cadena de valor: aquellos que toman una posición de mercado activa en la cadena y aquellos que apoyan el desarrollo de la cadena de valor sin involucrarse activamente en las relaciones comerciales de la cadena. Este último puede dividirse además en proveedores de servicios y agentes de soporte de desarrollo de cadenas de valor. Además, es útil considerar las condiciones de la política y del marco institucional que permiten o impiden el desarrollo de la cadena de valor (ONUDI, 2009). En la Figura 2 muestra de manera general una cadena de valor en la cual podemos encontrar a sus principales participantes:

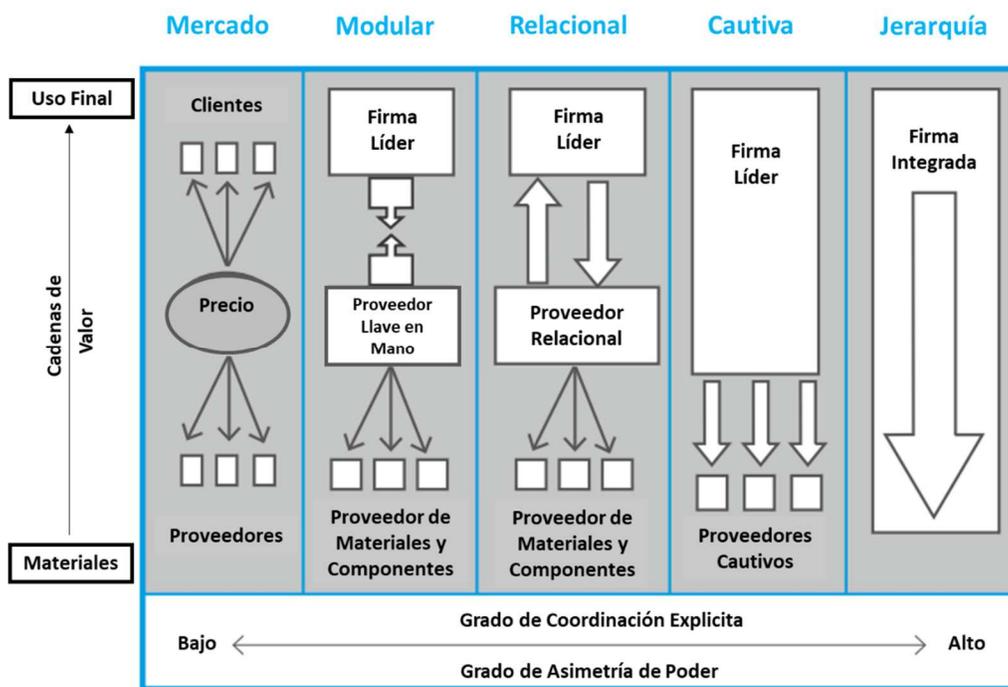
- *Actores de la cadena de valor:* Aquellos que se ocupan solamente de los productos, participando en forma directa en la producción, el procesamiento y la comercialización. Usualmente son dueños del producto y/o toman posiciones en el mercado.
- *Proveedores públicos y privados de servicios:* Aquellos que apoyan el funcionamiento de la cadena, incluido el transporte, el embalaje y el manejo, la certificación, el apoyo financiero, etc. (en la medida en que no lo llevan a cabo los propios actores de la cadena de valor).
- *Agentes promotores de la cadena de valor:* Aquellos organismos gubernamentales, agencias de ayuda, instituciones educativas y organizaciones internacionales que llevan a cabo actividades de apoyo e intervenciones para fomentar el desarrollo de la cadena de valor. Las acciones pueden incluir, por ejemplo, fortalecimiento de capacidades, manejo de estándares, suministro de información de mercado, asesoramiento sobre planificación comercial o el inicio de acuerdos de asociación.

1.2.2 Gobernanza de la Cadena de Valor.

El término gobernabilidad o gobernanza se refiere a las diferentes formas de control/coordinación que ejercen las empresas líderes en una cadena de valor específica o desde otro punto de vista, son las relaciones de autoridad y poder que determinan cómo se asignan y fluyen los recursos financieros, materiales y humanos dentro de una cadena de valor, sea esta de carácter nacional o global (G. Gereffi & Korzeniewicz, 1994). El objetivo de esta clasificación es construir una base en la toma de decisiones para las diferentes empresas involucradas en la cadena (Sandoval, 2012). De manera más específica, la teoría de la gobernanza en las cadenas de valor debe ser útil para generar instrumentos de política eficaces, relacionados con el ascenso industrial, el desarrollo económico, la creación de empleos y el alivio a la pobreza (Gereffi, Humphrey & Sturgeon, 2005). Estudiar la gobernanza de las cadenas de valor permite analizar los mecanismos, los procesos y las reglas mediante los que las empresas se relacionan económicamente entre sí, con el gobierno y con otros actores. A través de su estudio se busca conocer qué factores determinan la conducta de los principales actores de la cadena de valor, sobre los vínculos y relaciones que se establecen entre estos, así como las reglas explícitas e implícitas sobre las que inciden. En términos de coordinación y gobernanza, la cadena de valor opera tradicionalmente bajo dos tipos de gobierno; uno basado en el *mercado* y otro basado en la *jerarquía* (UNIDO, 2009) (Hernández & Pedersen, 2017). El primero implica transacciones relativamente simples entre las empresas involucradas. Bajo esta estructura, los compradores y proveedores a lo largo de la cadena de valor necesitan poca cooperación y el costo de cambiar a nuevos socios es bajo para ambos. El precio es el mecanismo para alcanzar el acuerdo (Gary Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Sin embargo, la tendencia es que las empresas dentro de la cadena de valor global están cada vez más conectadas, creando una red de firmas independientes orquestada o coordinada por una empresa líder, y brindando un contexto de confianza y poder dentro de entornos volátiles (P. J. Buckley, 2016). En el otro extremo, encontramos el modo de gobierno jerárquico, que implica integración vertical y control de gestión dentro de la empresa líder. Si bien es cada vez menos común encontrar empresas que integren toda la cadena de valor, hay investigaciones que se han centrado en examinar configuraciones de cadenas de valor globales basadas en decisiones de inversión extranjera directa (C. Hsu & Chen, 2009). Esta estructura es más habitual cuando los productos son complejos, la

codificación es difícil y los proveedores competentes no son fáciles de encontrar (Gereffi & Fernández-Stark, 2016). Sin embargo, parece que explicar la configuración de las actividades de la cadena de valor simplemente a través de una estructura jerárquica o de mercado (los dos extremos) está lejos de la realidad. Como explican Jacobides & Billinger (2006), las empresas también pueden usar alianzas y generar integración parcial con modos mixtos. Entre estos dos extremos, encontramos estructuras alternativas de gobernanza dentro de las cadenas de valor, siendo estas: modular, relacional y cautiva (Gereffi et al., 2005), véase la Figura 3. Aunque todas ellas se basan en relaciones con otras empresas, también existen diferencias entre ellas.

Figura 3. Estructuras de Gobernanza dentro de las cadenas de valor.



Fuente: Figura adaptada de (Gereffi et al., 2005).

La gobernabilidad **modular** implica que los proveedores elaboran productos de acuerdo con las especificaciones de una empresa líder, lo que implica un alto volumen de flujo de información codificada, mientras que la empresa líder se concentra en la creación, penetración y defensa de mercados para productos finales (Sturgeon, 2002). En un modo modular, los proveedores tienden a ser altamente competentes, brindan servicios de paquete completo y se responsabilizan de ciertas etapas, como la fabricación a través de contratos llave en mano (PingQing et al., 2007; Wad, 2008).

Por su parte, la gobernabilidad *relacional* es más probable cuando la información es más compleja, no se transfiere fácilmente y cuando se necesitan mayores niveles de interacción e intercambio de conocimientos basados en la confianza mutua y los lazos sociales (Altenburg, 2006). La gobernabilidad relacional implica que la coordinación está organizada por relaciones sociales y normas compartidas (Poppo & Zenger, 2002). También permite a las empresas y proveedores líderes responder rápidamente a las condiciones cambiantes utilizando normas de reciprocidad para resolver conflictos (Sturgeon, 2002). Por último, la estructura de gobierno *cautivo* es el modo de gobierno que conlleva una mayor dependencia de los proveedores, que operan bajo las condiciones de las empresas líderes, con altos niveles de monitoreo y control por parte de ellos (Gereffi et al., 2005). Esto implica que los proveedores están en una posición peor para negociar precios de venta más altos, pero una posición mejor para recibir apoyo de empresas líderes (Altenburg, 2006).

Además de lo anterior, la configuración de la cadena de valor en cada una de estas estructuras de gobierno puede depender de varios factores. Primero, las condiciones externas, como las de la industria, pueden afectar las estructuras de gobierno en la configuración de la cadena de valor. Qian et al. (2012) relacionan la probabilidad de internalizar las actividades de la cadena de valor con el ciclo de vida de la industria y si la empresa se mueve temprano o llega tarde. De hecho, los modos de gobierno pueden variar con el tiempo a medida que la industria madura y evoluciona (Gereffi & Lee, 2012). La existencia de barreras de entrada también puede afectar a las estructuras de gobierno. Mahutga (2012) explica la existencia de cadenas de valor modulares y relacionales cuando las barreras de entrada son altas, cadenas de valor cautivas y jerárquicas cuando las barreras de entrada son intermedias, y cadenas de valor cuasi-mercado y modulares cuando las barreras de entrada son bajas. Como concluye Buckley (2011), la dinámica de la industria y los cambios en el mercado, como la demanda o las tecnologías de los clientes, también determinan la estructura de la cadena de valor global en estructuras integradas o no integradas.

Adicionalmente, existen otras condiciones internas relevantes dentro de las empresas que pueden afectar el modo de gobierno. De Marchi et al. (2014) señalan que la posición de la empresa líder en cadenas de productos impulsados por el comprador y por el productor es diferente, lo que implica estructuras de gobierno diferentes. Otros estudios han considerado el tamaño de la empresa como un factor para explicar las estructuras de gobierno (Buciuni & Mola, 2014; Roza et al., 2011). La elección de una estructura de gobierno u otra también puede depender de si la empresa tiene o

no las capacidades específicas requeridas para integrar actividades a lo largo de la cadena de valor. La internalización de actividades requiere capacidades relacionadas con la coordinación, organización y gestión de los actores (Qian et al., 2012), por lo que la integración vertical es atractiva para las empresas con las capacidades que les ayudan a estimular la coordinación, el aprendizaje y la innovación entre actividades (Mudambi, 2008); además de que los modos alternativos requieren otras capacidades, como las capacidades relacionales y de red (Giroud & Mirza, 2015). Específicamente, las empresas que intentan implementar una estrategia a través de asociaciones deben poseer las habilidades y capacidades que les permitan administrarlas de manera efectiva y eficiente, como la capacidad de compartir información y de desarrollar una capacidad de respuesta global y local (la capacidad de iniciar acciones basadas en el conocimiento generado y diseminado a través de la organización) a proveedores (Yeniyurt et al., 2013). Igualmente, las empresas pueden elegir diferentes modos de gobierno en función de las capacidades que tienen en ciertas actividades. Como explican (Mudambi & Venzin, 2010), las empresas son más propensas a mantener el control sobre la cadena de valor si tienen competencias más sólidas en la fabricación o la prestación de servicios estandarizados, y pueden vincularlas a actividades más intensivas en conocimiento en investigación y desarrollo (I+D), diseño y marketing. Por otro lado, la especialización y el enfoque en el control de ciertas actividades es más probable en compañías con competencias dinámicas más sólidas en actividades intensivas en conocimiento interno, pero competencias más débiles para vincular actividades estandarizadas y especializadas.

En resumen, existen cinco diferentes estructuras de gobernanza identificadas y que son medidas y determinadas por tres variables, a saber, la complejidad de la información compartida entre los actores de la cadena; cómo se puede codificar la información para la producción; y el nivel de competencia del proveedor (Frederick & Gereffi, 2009; Gereffi et al., 2005). La Tabla 1 presenta el grado de dificultad para que alguna de las variables determinantes se presente en las diferentes estructuras de gobernanza.

Independientemente del tipo de cadena, de quien la dirija o de la cantidad de actores y actividades involucradas, el valor debe reflejarse a través de la secuencia natural de las operaciones, de una etapa a otra. Ya que, como se mencionó en los párrafos anteriores, el valor implica tanto la creación de valor como la captura de valor.

Tabla 1. Tipos y Criterios determinantes en la Gobernanza de las Cadenas de Valor.

Tipo de Gobernanza de la cadena de valor	Complejidad de las transacciones	Habilidad para codificar transacciones	Capacidad de los proveedores
<i>Mercado</i>	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>
<i>Modular</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>
<i>Relacional</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>
<i>Cautiva</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>

Fuente: (Gereffi et al., 2005).

De acuerdo con todo lo anterior lo anterior y para los fines del presente trabajo, definiremos a la *cadena de valor* como: ***la gama de actividades necesarias para desarrollar un producto a través de diferentes etapas, desde su concepción y proceso de elaboración hasta el consumidor final; donde el valor es capturado por el productor en forma de un valor agregado tras el cumplimiento de cada una de estas etapas. Y donde el valor se crea cuando las necesidades del consumidor han sido satisfechas, reflejándose en un beneficio.***

Capítulo 2. La Industria Fotovoltaica.

Como con muchas otras tecnologías, la generación de energía eléctrica por medio de la conversión directa de la energía solar en electricidad fue un descubrimiento incidental. Russell Ohl, científico de Bell Laboratories en los Estados Unidos de América (EUA) elaboró el primer dispositivo fotovoltaico, una celda fotovoltaica a partir de silicio, a principios de los años 40s. La era moderna de la tecnología de energía solar llegó en 1954 cuando Bell Laboratories, experimentando con semiconductores, descubrió accidentalmente que el silicio dopado con ciertas impurezas era muy sensible a la luz. En 1954, otros tres investigadores estadounidenses, a saber, GL Pearson, Daryl Chapin y Calvin Fuller, demostraron una célula solar de silicio con una eficiencia del 6% cuando se usa bajo la luz solar directa, aumentada al 14% en 1958, teniendo su principal aplicación en satélites y naves espaciales. El desarrollo temprano en estos nichos durante la década de los 60s ayudó a establecer el proceso de producción de módulos fotovoltaicos y la crisis petrolera de la década de 1970 desencadenó un esfuerzo por desarrollar aplicaciones terrestres más asequibles (Amin et al., 2017)(Sabas, 2016). El liderazgo mundial de EUA en el desarrollo y la producción de tecnologías fotovoltaicas llegó a su fin a principios de la década de 1980 cuando los precios del petróleo disminuyeron. Situación que fue aprovechada por Japón, convirtiendo a la energía fotovoltaica en una de las principales prioridades del país, lo que fomentó el despliegue de la energía fotovoltaica durante la década de 1990, convirtiendo a Japón en el país con la mayor capacidad instalada de energía fotovoltaica en el mundo. De esta manera, EUA y Japón fueron pioneros en la fabricación de tecnologías fotovoltaicas y en la aplicación de las políticas federales que apoyaron su desarrollo, desencadenando una dinámica considerable en el mercado fotovoltaico y la población de empresas (Hipp & Kalthaus, 2018). A inicios de la década del 2000, Alemania tomó la delantera tanto en la industria como en el mercado fotovoltaico gracias a la incorporación de su política más importante, la tarifa de suministro (Feed-in-Tariff, en inglés) y la cual fue seguida por políticas similares en varios países de Europa y en Japón (Sternkopf, 2017)(Ayoub & Yuji, 2012). Mientras que en EUA se hizo uso de créditos fiscales de energía residencial (Residential Energy Tax Credits) para fomentar la generación de energía con fuentes renovables (CRS, 2018) dando inicio al primer mercado masivo de sistemas fotovoltaicos. A partir de 2003, la fuerte demanda de módulos fotovoltaicos derivó en una competencia por el polisilicio entre los fabricantes emergentes de paneles solares y las empresas de semiconductores, resultando

en un periodo de escasez de polisilicio, (material crítico para esta industria ya que a partir de este se elaboran las celdas fotovoltaicas, principal tecnología fotovoltaica para la generación de electricidad) provocando que el precio de este material, y en consecuencia el de las tecnologías fotovoltaicas, aumentará hasta 1200% en un periodo de 3 años (GreentechMedia, 2008a). Durante el periodo 2008 – 2013, los precios de los módulos disminuyeron exponencialmente, gracias a la expansión del mercado fotovoltaico en China, situación que aprovecharon los actores de la industria fotovoltaica china, tomando rápidamente una posición de liderazgo mundial con la formación de una cadena de suministro completa en el país. Lo cual, condujo a un exceso de oferta de módulos fotovoltaicos, traduciéndose en una reducción de los precios del 80% durante el periodo. A pesar de que los responsables políticos de Japón y Alemania intentaron defender la ventaja competitiva de su industria fotovoltaica, al final solo tuvieron éxito en la producción de silicio metálico (MG-Si) y equipos para la industria, así como en la parte descendente de la cadena de valor de esta industria (BoS e integración de la red) (Zhou, Chong, & Wang, 2020)(Binz, Tang, & Huenteler, 2017)(Quitow, 2015)(Wang, Luo, & Guo, 2014)(Hoppmann, Huenteler, & Girod, 2014). Inicialmente, la industria fotovoltaica china se concentró en la producción de celdas y módulos fotovoltaicos. Sin embargo, el país se dio cuenta de la necesidad de reducir el costo del polisilicio y mejorar la captura de valor por parte de la industria fotovoltaica china. Por lo que a mediados de la década de 2010, el gobierno central de China asumió el papel de fomentar la inversión nacional en la producción de MG-Si (principal materia prima para la producción de polisilicio) y junto con las principales empresas chinas invirtieron agresivamente en los segmentos ascendentes de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, en un esfuerzo por reducir el costo y aprovechar los beneficios de la integración vertical (Zhou, Chong, & Wang, 2020) (Quitow, Huenteler, & Asmussen, 2017)(Hopkins & Li, 2016)(Wang, Luo, & Guo, 2014). De esta manera, China inicio su transición de exportador de materia prima de la industria fotovoltaica a convertirse en el principal proveedor del mundo en menos de una década. Ya para mediados de 2012, China se había convertido en una de las regiones productoras de MG-Si y polisilicio más grandes del mundo; lo que provocó que los EUA y la Unión Europea (UE) reaccionarán implementarán una política de aranceles en contra de las celdas y módulos fotovoltaicos elaborados en China (Li, 2016). Situación que aprovecharon empresas en Taiwán y Corea, que perfeccionaron la fabricación de celdas fotovoltaicas, para cubrir la demanda de este componente en dichas regiones entre los años 2014 y 2016 (W. L. Wang & Kryszak, 2020)(Son, Moon, & Ahn, 2015). Sin embargo, para

evitar las medidas antidumping y anti subvenciones de EUA y la UE, en años recientes, las empresas chinas comenzaron a instalar fábricas fuera de China, particularmente en Malasia y Vietnam. La mayoría de los 10 principales proveedores de módulos tienen operaciones de la empresa en el sudeste asiático (Malasia, Tailandia y Vietnam) o tener acuerdos de Fabricante de Equipo Original (OEM, por sus siglas en inglés), con operaciones financiadas por China. Las empresas chinas han establecido una capacidad de fabricación de aproximadamente 12 GW de celdas fotovoltaicas y de 14 GW de módulos fotovoltaicos en el sudeste asiático. Algo que los gobiernos de estos países del sudeste asiático también han aprovechado para desarrollar estratégicamente políticas industriales para atraer inversiones de empresas tanto de EUA como de la UE (por la necesidad de estos países de reducir sus costos y poder competir con la industria fotovoltaica china)(TERI, 2019).

Actualmente, la industria fotovoltaica continua desarrollándose y disminuyendo sus costos de fabricación gracias al progreso tecnológico y a las economías de escala, impulsados en gran medida, por nuevas políticas a nivel mundial que exigen una mayor penetración de las fuentes de energía renovable en la matriz energética con el propósito principal de mitigar el cambio climático (IRENA, 2019b)(European Commission, 2018)(Okioga, Wu, Sireli, & Hendren, 2018) y consolidando a los sistemas fotovoltaicos, como la tecnología líder de generación de electricidad, en términos de capacidad añadida, incrementado su demanda a una tasa promedio anual de 31% en la última década (REN21, 2020)(IRENA, 2017) principalmente a que los precios de los módulos fotovoltaicos han disminuido más del 90% y los precios de los sistemas fotovoltaicos en casi un 80% (PV Exchange, 2019), en términos reales, durante la última década.

Con expectativas de nuevas reducciones de precios y costos en el futuro cercano (ITRPV, 2020), es muy probable que la industria fotovoltaica, siga impulsando el uso de la energía solar fotovoltaica para que esta continúe siendo la protagonista de la economía de energía limpia y se vuelva lo suficientemente barata como para que se encuentre presente y disponible para todo el mundo.

2.1 La tecnología fotovoltaica.

Como se mencionó en los párrafos anteriores, la tecnología fotovoltaica ha sido reconocida como la tecnología de energía limpia y segura más utilizada en el mundo para convertir directamente la energía solar en electricidad, a través de un sistema fotovoltaico (SFV). Los componentes clave

de un SFV son: diversos tipos de celdas fotovoltaicas (a menudo llamadas celdas solares) interconectadas y encapsuladas para formar un módulo fotovoltaico (el producto comercial), la estructura de montaje para el módulo o matriz, el inversor (esencial para los sistemas con interconexión a la red), la batería de almacenamiento y el controlador de carga (para sistemas aislados de la red, pero también cada vez más utilizados para aquellos conectados a la red). La cantidad de celdas solares y módulos pueden elegirse fácilmente según la energía eléctrica demandada, por lo que la tecnología fotovoltaica es más usada que otros tipos de energía renovable, como veremos más adelante en el presente Capítulo (Tyagi, Rahim, Rahim, & Selvaraj, 2013).

2.1.1 Celdas Fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas representan la unidad más pequeña en un SFV y típicamente se encuentran disponibles en cuadrados con tamaños de 244 cm² (VDMA, 2020)(IEA, 2016b). Actualmente las celdas solares comerciales pueden clasificarse en cinco tipos: Celdas Cristalinas (monocristalinas, policristalinas y de GaAs), Celdas de Capa Fina (silicio amorfo, CdTe, CdS, CIGS y CIS), Celdas Orgánicas, Celdas basadas en colorantes fotosensibles (dye-sensitized) y Celdas de Perovskita. Sin embargo, el 94% de la producción total de celdas solares pertenece a las tecnologías de celdas solares de silicio cristalino (IEA, 2016). A continuación, se proporciona una breve explicación de los diferentes tipos de celdas solares más utilizadas.

2.1.1.1 Celdas Cristalinas.

De todos los otros materiales de celdas solares, la celda solar basada en silicio cristalino tiene la mayor eficiencia en comparación con otras celdas de tipo cristalino. Además de eso, el suministro de silicio puede estar fácilmente disponible ya que es la segunda materia prima más fácil que se puede encontrar en la tierra (EPIA, 2013). Una breve descripción de las celdas solares cristalinas se da a continuación.

- a) *Celdas de Silicio Monocristalinas.* Este tipo de celdas han sido ampliamente utilizadas debido a sus altas eficiencias, las cuales actualmente se encuentran por arriba del 20%, con valores de entre 20.3% y 26.3% (Fertig et al., 2017; Glunz et al., 2015; Kaneka, 2016;

Masuko et al., 2014; Zhenjiao, 2012) Sin embargo, para la comercialización, las eficiencias se encuentran entre un 21% y un 25% (VDMA, 2020). La mayoría de las celdas de silicio cristalino (mc-Si) comerciales usan obleas de un solo cristal dopadas con boro y cultivadas mediante el proceso de Czochralski (Razykov et al., 2011). En este proceso, el silicio de alta pureza y de grado semiconductor se funde en un crisol, generalmente de cuarzo. Los átomos impuros del dopante, como el boro o el fósforo, se agregan al silicio fundido en cantidades precisas para dopar el silicio, transformándolo así en un silicio de tipo n (n-type) o tipo p (p-type). Esto influye en las propiedades electrónicas del silicio. Un cristal de siembra montado en una varilla y orientado con precisión se sumerge en el silicio fundido. La varilla con el cristal sembrado se tira lentamente hacia arriba y se gira de manera simultánea. Controlando de manera precisa los gradientes de temperatura, la velocidad de extracción y la velocidad de rotación, es posible extraer un lingote cilíndrico grande de un solo cristal de la masa fundida. La aparición de inestabilidades indeseadas en la masa fundida se puede evitar investigando y visualizando los campos de temperatura y velocidad durante el proceso de crecimiento del cristal. Este proceso normalmente se realiza en una atmósfera inerte, como el argón, o en una cámara inerte, como el cuarzo (Hoshikawa, Kohda, & Hirata, 1984; Nakamura et al., 1997; Talik & Oboz, 2013; Wilfried von Ammon, Dornberger, Oelkrug, & Weidner, 1995).

b) *Celdas de Silicio Policristalinas.* Las celdas de silicio policristalinas (pc-Si) son usadas principalmente para reducir los costos de desarrollo de los módulos fotovoltaicos; sin embargo, su eficiencia es baja frente a la de las celdas mc-Si, esto a pesar de que las celdas pc-Si tienen menores defectos en su estructura, derivados de la contaminación del metal, en comparación con las celdas mc-Si (Manna & Mahajan, 2007), aunque se han alcanzado eficiencias de hasta el 21% (Deng et al., 2016). Las obleas de pc-Si pueden fabricarse en áreas extensas y se elaboran fundiendo el silicio para posteriormente solidificarlo nuevamente con el objetivo de orientar los cristales en una dirección fija produciendo un lingote rectangular de pc-Si para ser cortado en bloques y finalmente en obleas delgadas. A pesar de una serie de ventajas de las celdas solares pc-Si, no hay una diferencia significativa entre los costos de las celdas solares mc-Si y pc-Si. Las celdas solares comerciales pc-Si tienen eficiencias que rondan entre el 19% y el 21% (VDMA, 2020). La

tecnología de fabricación policristalina fue desarrollada por Evergreen Solar (Tyagi et al., 2013).

c) *Celdas de Arseniuro de Galio (GaAs)*. El arseniuro de galio (GaAs) es un material semiconductor formado Galio (Ga) y Arsénico (As), elementos de los grupos III y V de la tabla periódica, por lo que las celdas solares elaboradas con este material, también se conocen como celdas solares III-V, y que posee una estructura similar a la del silicio. Comparado con las celdas solares basadas en silicio, las celdas de GaAs cuentan con una mayor eficiencia y un menor espesor, llegando a reportar eficiencias de entre 25% (Razykov et al., 2011). La eficiencia de la célula solar GaAs se puede aumentar mediante aleaciones con ciertos materiales como Aluminio (Al), Indio (In), Fósforo (P), Antimonio (Sb) y Germanio (Ge). El proceso de aleación dará como resultado la formación de dispositivos de unión múltiple (multi-junction), lo que puede generar altas eficiencias de más del 40% (Friedman, 2010; King et al., 2007) y hasta el 50% (Yamaguchi et al., 2008) con el uso de nuevos materiales y estructuras. Las celdas solares de GaAs se utiliza normalmente para módulos fotovoltaicos de concentración solar y para aplicaciones espaciales debido a su alta resistencia térmica y su baja degradación frente a la radiación. Además, las celdas de GaAs son más ligeras en comparación con las de silicio. Sin embargo, el material y la fabricación de GaAs son altamente costosos (Razykov et al., 2011; Tyagi et al., 2013). Para aplicaciones comerciales, las eficiencias para este tipo de celdas solares se encuentra entre un 18% y un 29% (Green, et al., 2021).

2.1.1.2 *Celdas de Capa Fina*

En comparación con las celdas solares basadas en silicio cristalino, la tecnología de capa fina es menos costosa al utilizar menos materiales y procesos de fabricación. Se espera que las tecnologías de capa fina exhiban menores costos de producción por área de superficie que las celdas cristalinas basadas en silicio ya que pueden beneficiarse de economías de escala, por ejemplo, de la obtenida de los procesos y tecnologías desarrollados para la elaboración de pantallas planas (Dross et al., 2012). Mediante un flujo de proceso integrado, pueden depositarse los materiales absorbentes de película delgada, con espesores de entre 1 μm a 3 μm , sobre sustratos de bajo costo, como el vidrio, para finalmente aplicarlo directamente a los módulos fotovoltaicos. Este potencial de reducción de

costos en comparación con las tecnologías basadas en mc-Si se utiliza siempre que la eficiencia y los costos de fabricación por unidad de área permanezcan comparables (Abermann, 2013).

- a) *Celdas mc-Si y pc-Si de Capa Fina.* Las celdas solares de silicio de capa fina tienen las siguientes ventajas importantes en comparación con las células cristalinas: (i) El espesor de silicio puede reducirse drásticamente a 50 μm ; (ii) La capa fina se pueden depositar en sustratos de bajo costo; (iii) La capa fina se puede fabricar en sustratos del tamaño de un módulo y en estructuras integralmente interconectadas (Razykov et al., 2011). Según algunos cálculos, el grosor de las películas de silicio puede reducirse hasta a 1 μm (M. A. Green, Zhao, Wang, & Wenham, 2001). De manera comercial, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias alrededor del 23% (Green, et al., 2021).
- b) *Celdas de silicio amorfo.* En la tecnología de capa fina, el silicio amorfo es un material muy popular. Este material es una forma de silicio no cristalino con una estructura desordenada, el cual tiene un índice de absorción de la luz 40 veces mayor en comparación con el mc-Si (Tyagi et al., 2013). Las celdas solares que utilizan este tipo de material han registrado eficiencias entre 10.2% y 11.9% (Green, et al., 2021).
- c) *Celdas de Telurio de Cadmio (CdTe) y de Sulfuro de cadmio (CdS).* La elaboración de celdas solares a partir de estos materiales puede generar eficiencias de entre 15% y 23% (Tyagi et al., 2013) (Green, et al., 2021) debido a que poseen un alto coeficiente de absorción. Los procesos para elaborar celdas solares de CdTe/CdS son principalmente por evaporación de deposición de los materiales en sustratos de vidrio para posteriormente ser tratadas con un flujo de cloruro de cadmio (CdCl_2) a una temperatura de 450°C. Sin embargo otros procesos como la pirolisis por rocío, el método sputtering y la Impresión sobre pantallas han sido investigados (Razykov et al., 2011). Las celdas solares de CdTe/CdS son conocidas también por su estabilidad en largos periodos de tiempo y han demostrado tener un excelente potencial para la producción rentable de electricidad solar. Sin embargo, estas tecnologías, especialmente CdTe, adolecen de la percepción de toxicidad, principalmente del cadmio. Entre los problemas planteados se incluyen los riesgos asociados con los materiales utilizados durante el procesamiento y la fabricación de las celdas solares de CdTe/CdS y los riesgos asociados durante el ciclo de vida de los

módulos. Los problemas ambientales y de riesgo para la salud de los módulos solares de CdTe han sido ampliamente investigados por varias agencias independientes, incluidos los laboratorios nacionales en Europa y los EUA (Fthenakis, Morris, Moskowitz, & Morgan, 1999).

d) *Celdas de cobre indio galio selenio (CIGS)/cobre indio selenio (CIS)*. Los materiales para elaborar este tipo de celdas pueden ser preparados fácilmente en una amplia gama de composiciones. Este tipo de celdas se encuentran aún en su fase de desarrollo, sin embargo, pueden competir de manera importante con las celdas de silicio, ya que ha reportado eficiencias de hasta 23% (Green, et al., 2021). En términos de aplicaciones a gran escala, este tipo de celdas tienen una desventaja, ya que el indio y el galio son recursos muy limitados. Recientemente, el galio fue sustituido para elaborar una celda de cobre indio aluminio selenio (Cu (In, Al) Se₂), la cual obtuvo una eficiencia de más del 17% (Marsillac et al., 2002).

2.1.1.3 *Celdas orgánicas*

Al igual que las celdas del punto anterior, las celdas orgánicas están en su fase de desarrollo. Algunas ventajas clave de las celdas orgánicas son que los materiales orgánicos provenientes de polímeros son económicos; tienen una alta flexibilidad mecánica; permiten el uso de películas con espesores de solo cientos de nanómetros; son compatibles con sustratos de plástico; y pueden fabricarse utilizando técnicas de impresión bien establecidas con una estructura de costos similar al procesamiento de plásticos. La capacidad de diseñar y sintetizar moléculas y luego integrarlas en compuestos orgánicos-orgánicos e inorgánicos-orgánicos proporciona una vía única en el diseño de materiales para dispositivos novedosos (Goetzberger, Hebling, & Schock, 2003) (Razykov et al., 2011). Las celdas orgánicas ofrecen un gran potencial a largo plazo de alcanzar el objetivo de ser una tecnología fotovoltaica económicamente viable para la generación de energía a gran escala. Actualmente, este tipo de celdas cuentan con eficiencias de alrededor del 15% (Green, et al., 2021).

2.1.1.4 Celdas basadas en colorantes fotosensibles (dye-sensitized cells)

La principal diferencia de este tipo de celdas solares en comparación con las células convencionales es que el elemento funcional que es responsable de la absorción de la luz (el colorante) está separado del propio transporte del portador de carga. Las celdas solares sensibilizadas con colorante se basan principalmente en un mecanismo foto-electroquímico de rápida regeneración. De manera general, estas celdas se fabrican con un soporte mecánico recubierto con óxidos conductores transparentes; una película semiconductor, generalmente TiO₂; un colorante fotosensible adsorbido sobre la superficie del semiconductor; un electrolito que contiene un mediador redox y un contraelectrodo capaz de regenerar el mediador redox, recubierto de platino (Pt) (Goetzberger et al., 2003). Este tipo de celdas han sido estudiadas ampliamente debido a su razonable eficiencia de conversión fotoeléctrica, tecnología de ensamblaje simple y su potencial bajo costo. Por lo cual pueden ser un buen competidor de la tecnología material existente en la producción de células solares. Actualmente este tipo de celdas tienen una eficiencia cercana al 12% (Green, et al., 2021).

2.1.1.5 Celdas de Perovskita

Las celdas solares de perovskita (PSC) son una nueva clase de dispositivos fotovoltaicos, que han atraído una atención significativa debido a sus excelentes propiedades opto eléctricas, bajo costo y fácil fabricación. Las primeras células solares de perovskita fueron anunciadas hace apenas 10 años por el equipo de investigación de Tsutomu Miyasaka en la Universidad Toin, en Yokohama, Japón. Pero esos primeros prototipos de laboratorio eran increíblemente inestables y tenían una eficiencia de solo el 3.8 por ciento (Nature Energy, 2019). Desde entonces, los investigadores y fabricantes han logrado grandes avances en eficiencia y también han abordado la estabilidad y escalabilidad de los dispositivos. En 2018, Oxford PV, una empresa con sede en el Reino Unido, anunció una célula solar en tándem de perovskita / silicio monolítica con una eficiencia de conversión de energía certificada del 28.0% (Nature Energy, 2019), superando a las células solares de unión única de perovskita (23.7%) (Morales-Acevedo, 2019) y silicio (26.7%) (Green et al., 2021). Sin embargo se espera que este tipo de celdas alcance una eficiencia del 29% (Morales-Acevedo, 2019).

2.1.2 Módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos son fabricados mediante la conexión eléctrica de una serie de celdas solares que son encapsuladas comúnmente con un polímero translucido denominado EVA (etilenoacetato de vinilo), para posteriormente ser colocadas entre sustratos de vidrio (parte frontal) y plástico (parte posterior) para proteger las celdas contra las influencias externas del clima y la humedad. Finalmente, los sustratos son enmarcados normalmente en un marco de aluminio para terminar la estructura del módulo (Pern, 2008) (Sinovoltaics, 2011) (TSEC, 2015). Los módulos fotovoltaicos se clasifican típicamente entre módulos de 50 W y 350 W, con módulos especiales usados para en sistemas fotovoltaicos integrados para edificios (BIPV, por sus siglas en inglés) en tamaños aún mayores (IEA, 2016b). Hasta ahora, la mayor parte de los módulos fotovoltaicos son mono faciales, es decir, solamente su cara superior contiene celdas fotovoltaicas. Sin embargo, ya se están utilizando módulos fotovoltaicos bifaciales, conformados de celdas solares bifaciales y donde ambas caras del MFV genera electricidad, lo que incrementa la eficiencia final del módulo. Se espera que, en los próximos 10 años, la participación de mercado de estos MFV bifaciales sea del 35% (VDMA, 2020). La Tabla 2 muestra las eficiencias obtenidas para diferentes tipos de módulos fotovoltaicos según el tipo de celda solar con el que fueron elaborados.

Tabla 2. Eficiencias confirmadas para diferentes tipos de módulos fotovoltaicos clasificados según su tipo celda solar.

Tipo de celda solar	Eficiencia	Compañía / No. de celdas
Silicio monocristalino	24.4 ± 0.5	Kaneka / 108 celdas
Silicio policristalino	20.4 ± 0.3	Hanwha Q cells / 60 celdas
GaAs – capa fina	25.1 ± 0.8	Alta Devices / *n.d.
CdTe – capa fina	19.0 ± 0.9	First solar / *n.d.
CIGS (libre de Cd)	19.2 ± 0.5	Solar Frontier / 70 celdas
CIGS	18.6 ± 0.6	Miasole / n.d.
a-Si	12.3 ± 0.3	TEL Solar, Trubbach Labs / n.d.
Orgánica	8.7 ± 0.3	Toshiba / n.d.
InGaP/GaAs/InGaAs (múlti unión)	31.2 ± 1.2	Sharp / 32 celdas
Perovskita	17.9 ± 0.5	Panasonic /55 celdas

*n.d., no disponible

Fuente: (Green et al., 2021)

2.1.3 Sistemas Fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico (SFV) consiste en un arreglo de uno o varios módulos fotovoltaicos conectados a la red eléctrica (sistemas interconectados) o fuera de esta (sistemas aislados). Comprende varios dispositivos eléctricos con el objetivo de adaptar la salida de electricidad del módulo o módulos a los estándares de la red o la carga: inversores, controladores de carga o baterías (Aaron Sánchez-Juárez, 2017), conocidos como balance del sistema (BoS, por sus siglas en inglés). Para su instalación se ha desarrollado una amplia gama de estructuras de montaje especialmente para BIPV; incluyendo fachadas fotovoltaicas, montajes para techos inclinados y/o planos, módulos integrados de vidrio-vidrio (opacos o semitransparentes) e inclusive tejas fotovoltaicas (IEA, 2016b). Otro elemento importante del SFV son los sistemas de seguimiento de uno o dos ejes, los cuales se han vuelto cada vez más atractivos para los sistemas montados en tierra, particularmente en países con una alta proporción de irradiación directa. Mediante el uso de tales sistemas, el rendimiento de energía puede aumentarse típicamente en un 25-35% para seguidores de eje único y de 35-45% para seguidores de doble eje en comparación con sistemas fijos (Bahrami, Okoye, & Atikol, 2017) (Hammad, Al-Sardeah, Al-Abed, Nijmeh, & Al-Ghandoor, 2017). Las aplicaciones más generales de los SFV se citan a continuación:

2.1.3.1 SFV aislados de la red

La principal característica de los SFV aislados es que requieren de un banco de baterías que almacene la energía que se necesitará durante los periodos de ausencia de luz solar. Normalmente las baterías usadas por este tipo de SFV son del tipo plomo-ácido de descarga completa. Otros tipos de baterías como las de níquel-cadmio (NiCd), níquel-hidruro (NiMH) metálico y de ión de litio (Li-ión) también son adecuadas y tienen la ventaja de que no se sobrecargan ni se descargan completamente; Pero tienen la desventaja de que son considerablemente más costosas y no se encuentran disponibles en todas las regiones. La vida útil de una batería varía, dependiendo del régimen operativo y las condiciones, pero generalmente es de entre 5 y 10 años (Aaron Sánchez-Juárez, 2017) (Bloomfield, Roberts, & Cotterell, 2016). Para mantener la batería en el estado de carga más alto posible, además de proporcionar la cantidad de electricidad requerida y proteger a la batería contra la descarga completa o sobrecarga, se utilizan controladores de carga (o reguladores), los cuales, en ocasiones cuentan con un dispositivo de seguimiento del punto de

máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) para maximizar la electricidad fotovoltaica generada (Chen, Shen, Shu, Qin, & Deng, 2007). En caso de existir el requisito de electricidad de corriente alterna (AC), un inversor autónomo es necesario para suministrar energía a aparatos de AC convencionales (SMA, 2017). Los SFV aislados de la red pueden clasificarse de acuerdo con sus aplicaciones en residenciales y no residenciales.

- a) *SFV aislados residenciales*. Este tipo de sistemas proporcionan electricidad a los hogares y las aldeas que no están conectados a la red. Proporcionan electricidad para iluminación, refrigeración y otras cargas de baja potencia, se han instalado en todo el mundo y a menudo son la tecnología más adecuada para satisfacer las demandas de energía de las comunidades aisladas. Los sistemas domésticos sin conexión a la red suelen tener un tamaño de hasta 5 kW. En general, ofrecen una alternativa económica para ampliar la red de distribución de electricidad a distancias de más de 1 o 2 km de las líneas eléctricas existentes (Kempener et al., 2015)(IEA, 2016b).
- b) *SFV aislados no residenciales*. Estos sistemas fueron la primera aplicación comercial para sistemas fotovoltaicos terrestres. Proporcionan energía para una amplia gama de aplicaciones, como telecomunicaciones, bombeo de agua, refrigeración de vacunas y ayudas a la navegación. Estas son aplicaciones en las que pequeñas cantidades de electricidad tienen un alto valor, lo que hace que la energía fotovoltaica sea competitiva desde el punto de vista comercial con otras fuentes de generación pequeñas (Kempener et al., 2015)(IEA, 2016b).

2.1.3.2 *SFV interconectados a la red*

En los SFV conectados a la red, un inversor es utilizado para convertir la electricidad de la corriente directa (DC) producida por el SFV a la corriente alterna (AC) que luego se suministra a la red eléctrica. Estos sistemas se clasifican en dos tipos de aplicaciones: distribuidas y centralizadas.

- a) *SFV distribuidos*. Los SFV distribuidos conectados a la red se instalan para proporcionar energía a un cliente conectado a la red o directamente a la red eléctrica. Dichos sistemas pueden ser: 1) integrados o integrados en las instalaciones del cliente, a menudo del lado

de la demanda; 2) en edificios públicos y comerciales. Los tamaños típicos son de 1 a 4 kW para sistemas residenciales, y de 10 kW a varios MW para tejados en edificios públicos e industriales (IPCC, 2012).

b) *SFV centralizados*. Este tipo de sistemas realizan las funciones de las centrales eléctricas centralizadas. La energía suministrada por un sistema de este tipo no está asociada con un cliente de electricidad en particular, y el sistema no está ubicado para realizar funciones específicas en la red eléctrica que no sea la oferta del suministro de energía eléctrica. Por lo general, los sistemas centralizados están montados en el suelo, y son mayores a 1 MW (IPCC, 2012).

2.2 La cadena de valor de la industria fotovoltaica.

Como se mencionó en el primer capítulo, una cadena de valor comprende una serie de actividades y procesos necesarios para la elaboración de un producto que cumpla una necesidad específica. De esta manera, la cadena de valor de la industria fotovoltaica involucra la fabricación, instalación y operación de la tecnología que se encarga de convertir la radiación solar en energía eléctrica, el sistema fotovoltaico.

Esta sección proporciona una breve descripción de la situación actual a nivel mundial de la parte ascendente (upstream) de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, así como de sus principales procesos de fabricación y transformación, considerando la fabricación de las principales materias primas de esta industria, siendo estas el silicio metálico (MG-Si) y el polisilicio (Poly-Si). Y la fabricación de los principales insumos y componentes, a saber, lingotes y obleas de polisilicio, celdas fotovoltaicas (CFV) y finalmente el módulo fotovoltaico (MFV). Así mismo, se presenta brevemente la situación actual de la parte descendente (downstream) de la cadena de valor de esta industria, en términos de la demanda de capacidad instalada de tecnología fotovoltaica a nivel global.

Es importante mencionar que el presente trabajo se enfoca en analizar de manera específica la cadena de valor de la industria fotovoltaica para la fabricación de insumos y componentes de silicio monocristalino, ya que es la cadena de valor dominante en la actualidad. Dicha cadena de valor puede estar integrada de manera vertical como se muestra en Figura 4.

Figura 4. Actividades de la Cadena de Valor de la Industria Fotovoltaica



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con dicha distinción, se puede considerar que las necesidades y expectativas de los actores que componen a la cadena de valor de la industria fotovoltaica tanto de la parte ascendente como de la parte descendente difieren entre sí, lo que conlleva a que la interpretación del *valor* sea distinta.

Desde el punto de vista ascendente, el *valor* está determinado por aquellas actividades implicadas en la generación de un valor agregado y empleos directos relacionadas con los actores que participan directamente en los procesos de transformación del silicio para la elaboración de las materias primas, insumos y componentes que tienen como destino final el módulo fotovoltaico. En cambio, por la parte descendente, el *valor* que proporciona la CVIF dependerá de los beneficios que se reciben al cubrir cierta demanda.

Con respecto a la parte descendente de esta cadena de valor, en el mundo, existen algunos proveedores que se encuentran integrados, desde la parte ascendente hacia la parte descendente de la cadena de valor en relación con su competencia principal (Harrigan, 1985)(Guan & Rehme, 2012). Ejemplo de esto son Hanwha SolarOne (China) (Hanwha, 2019) y REC (Noruega) (REC, 2019) se encuentran totalmente integradas desde la producción de polisilicio hasta el desarrollo de proyectos. Sin embargo, la integración vertical en la industria fotovoltaica se ha presentado comúnmente hacia la parte descendente de la cadena de valor, a partir del eslabón de fabricación de lingotes de silicio, obleas o celdas fotovoltaicas, hacia la fabricación de módulos fotovoltaicos como JA Solar (China) (JA Solar, 2020) o Jinko Solar (China) (Jinko Solar, 2020) dejando a los especialistas la producción de polisilicio, la cual es intensiva en capital y energía, y el desarrollo de proyectos orientados al servicio. Sin embargo, no todas las empresas siguen el mismo camino

hacia la integración. Yingli Solar (China) y Hanwha SolarOne, iniciaron en el eslabón de módulos fotovoltaicos y se integraron de manera ascendente gradualmente hacia la producción de polisilicio (Yingli Solar, 2018) (Hanwha, 2019) o SolarCity (EUA) integrándose de financiador-instalador solar a fabricante de módulos fotovoltaicos (Trabish, 2014). Mientras que otras, como Canadian Solar (Canada) o First Solar (EUA), quienes se integraron de manera descendente, desde la fabricación de módulos fotovoltaicos y celdas fotovoltaicas de CdTe, respectivamente, hasta el desarrollo de proyectos (Canadian Solar, 2019)(First Solar, 2019). LDK Solar, es un caso especial, fue una de las primeras empresas en integrar todas las actividades de manufactura de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, comenzó con la producción de obleas de silicio y posteriormente se integró simultáneamente de manera ascendente hacia la fabricación de polisilicio y de manera descendente hacia la fabricación de celdas y módulos fotovoltaicos (Piffer, 2011), sin embargo, esta se declaró en bancarrota en 2015 (Osborne, 2015). Otro caso similar, es de la empresa ReneSola, la cual no pudo sostener sus actividades de manufactura, para enfocarse exclusivamente en actividades de desarrollo de proyectos (Osborne, 2017).

Dentro de los factores que pueden impulsar el atractivo de la integración vertical en esta industria, se encuentran el asegurar un suministro estable y de alta calidad de polisilicio, el cual sigue concentrado en un pequeño número de empresas que producen más del 50% de la capacidad global (Hutchins, 2018), y una potencial reducción de costos a medida que se fabrica de manera local los componentes clave de un módulo fotovoltaico como son el polisilicio, las obleas o las celdas fotovoltaicas (CGTI, 2011).

Al ser la parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica el principal tema de análisis del presente estudio, esta se tratará con mayor detalle en la siguiente subsección.

2.2.1 La parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica.

2.2.1.1 Silicio de grado metalúrgico (MG-Si)

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, después del oxígeno. Se encuentra naturalmente como dióxido de silicio (SiO_2) y entre todos los minerales es casi el único que constituye un compuesto químico puro, ya que su composición suele ser 100% de SiO_2 (46.7%

de Silicio y 53.3% de Oxígeno) (SE, 2017). Este mineral es el principal constituyente de las arenas de sílice. También puede encontrarse en forma de enormes depósitos de cuarcita o arena de cuarzo y en rocas que contienen cristales de cuarzo. Por lo tanto, se puede concluir que los recursos de silicio son virtualmente ilimitados, aunque la pureza varía considerablemente según la zona geográfica en que se encuentre (Xakalashé & Tangstad, 2011).

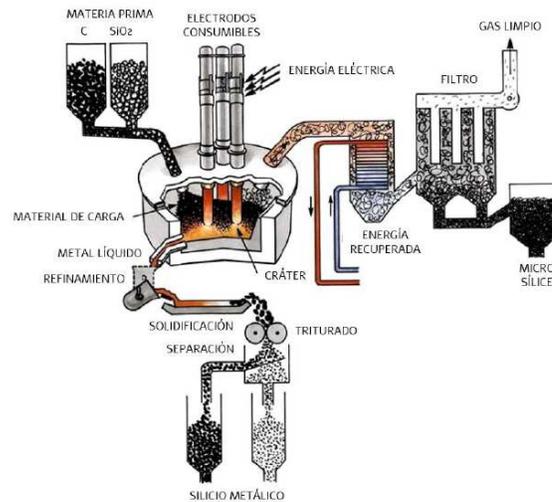
El silicio tiene muchas aplicaciones industriales y los requerimientos que establecen las industrias consumidoras son muy específicos y particulares. Dentro de sus principales aplicaciones se encuentran: para la desoxidación, aleación y fundición de acero, aleación de aluminio, como materia prima en la industria química y farmacéutica y como materia prima en la industria de semiconductores (dispositivos electrónicos y células fotovoltaicas). El silicio de grado metalúrgico (MG-Si) es el precursor del silicio policristalino o de grado solar utilizado en la industria fotovoltaica (Xakalashé & Tangstad, 2011).

El MG-Si se produce industrialmente mediante la reducción carbotérmica del SiO₂. La reacción global en una forma idealizada se puede escribir de la siguiente manera:



El horno es alimentado con una mezcla de SiO₂ (60-70% en peso) y de coque, carbón, carbón vegetal y astillas de madera como agentes reductores (40-30% en peso). La reacción de reducción se lleva a cabo a una temperatura de entre 1800°C y 2000°C dentro de un horno de arco eléctrico con electrodos consumibles de grafito, los cuales se encargan de suministrar la energía necesaria para llevar a cabo la reacción. Aproximadamente son necesarios 2.5 kg de SiO₂, 1.7 kg de reductores y un consumo de energía eléctrica de entre 11 y 13 kWh para producir 1 kg de MG-Si. La Figura 5 muestra el diseño típico de una planta de producción de silicio metálico por reducción carbotérmica.

Figura 5. Planta de reducción carbotérmica para la producción industrial de silicio metálico.

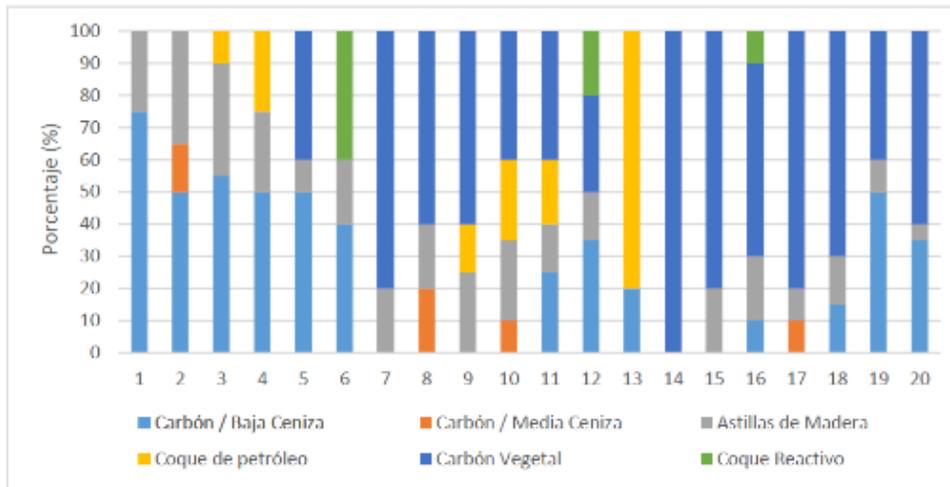


Fuente: Figura adaptada de (Xakalashé & Tangstad, 2011).

La composición de la mezcla de los materiales de reducción aspira a cumplir tanto los requisitos del proceso como las especificaciones del producto con respecto a la cantidad y el tipo de impurezas de acuerdo con la calidad del SiO₂ (Ceccaroli, Ovrelid, & Pizzini, 2017)(Nakajima & Usami, 2009)(Odden, Halvorsen, Rong, & Glockner, 2008). La Figura 6 presenta composiciones para materiales carbonosos utilizados como reductores en la producción de MG-Si.

El proceso de reducción carbotérmica para producir MG-Si generalmente se realiza en países con grandes depósitos de carbón y dióxido de silicio y donde el costo de la electricidad es bajo. A pesar de que el SiO₂ es un material abundante en todo el mundo, no todos los países tienen las capacidades para producir MG-Si. La Tabla 3 muestra los principales países donde se produce este material.

Figura 6. Mezclas de materiales carbonosos usados para la producción de MG-Si.



Fuente: Figura adaptada de (Myrvågnes, 2008)(Oliveira, 2018).

Tabla 3. Principales países productores de MG-Si, 2018.

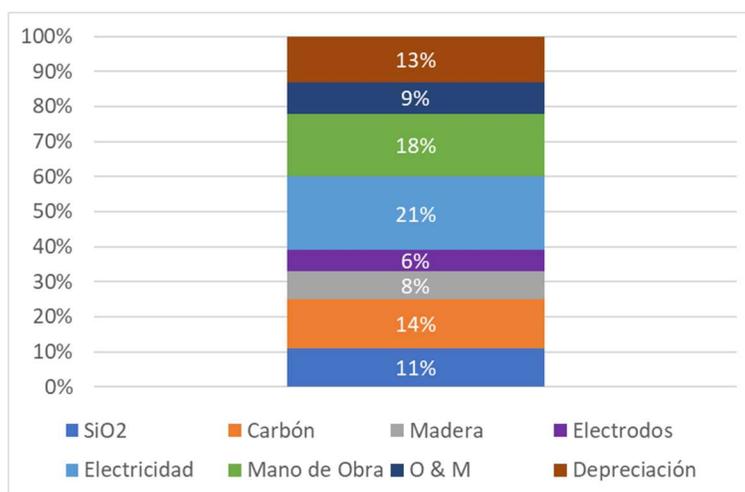
No.	País	Producción (ton)
1	China	2,200,000
2	EUA	425,000*
3	Noruega	150,000
4	Brasil	110,000
5	Francia	80,000
6	Sudáfrica	60,000
7	Australia	49,000
8	Rusia	48,000
9	Alemania	31,915
10	España	30,000
11	Canadá	27,000

*Incluye la producción de ferro-silicio

Fuente: (Brown et al., 2019)

El costo de producir MG-Si oscila entre los 1.5 USD/kg y los 2.0 USD/kg, dependiendo de la calidad, pureza y tamaño de partícula del SiO₂. Siendo la electricidad, el carbón y el SiO₂ los insumos que mayormente determinan el costo de producción de esta materia prima con una participación del 46% del costo total de producción, como puede observarse en la Figura 7 (USITC, 2018)(Parous, 2015)(Woditsch & Koch, 2002).

Figura 7. Desglose del costo de producción de MG-Si por reducción carbotérmica.



Fuente: Elaboración propia con información de (USITC, 2018)(Parous, 2015)(Woditsch & Koch, 2002).

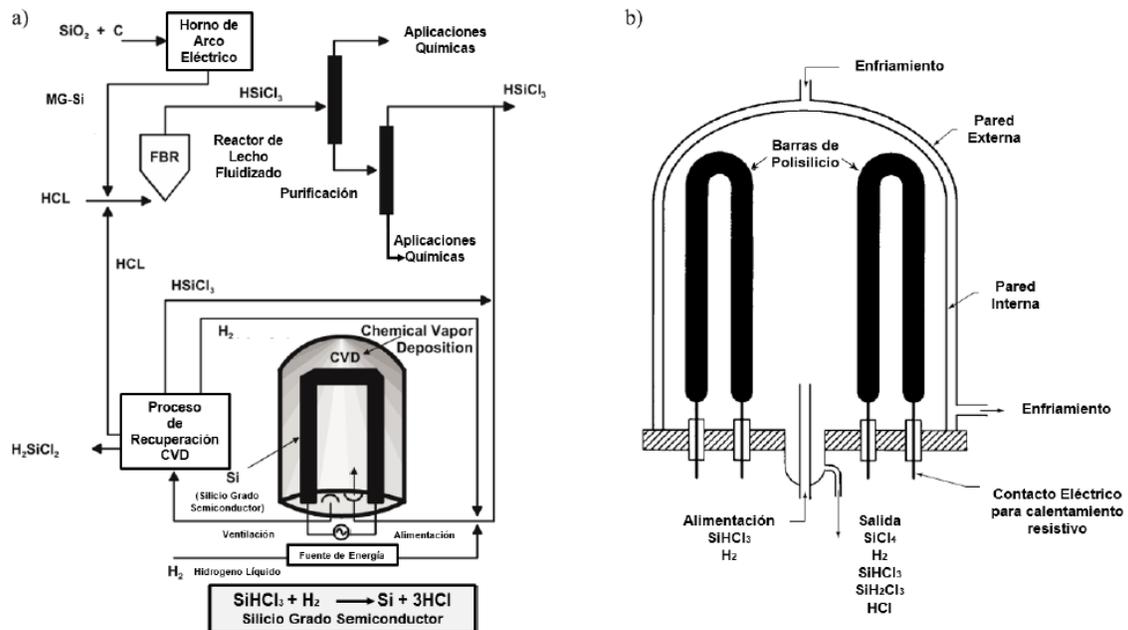
Mientras en cuestión de precios, el precio spot (sin considerar impuestos y costos de traslado) de un kilogramo de MG-Si con una pureza 2N (99.99%) se encuentra entre los 2.2 USD y 2.5 USD (HPQ-Silicon Resources Inc., 2019)(Ferrogllobe, 2018)(N. Mason, 2013)(Woditsch & Koch, 2002).

2.2.1.2 Polisilicio (Poly-Si).

Para la producción de Poly-Si existen una amplia gama de patentes, secretos comerciales y rutas de procesamiento de materiales con diferentes enfoques. Sin embargo, en esta sección nos centramos en la tecnología más común para la producción de este insumo y la cual cuenta con una significativa participación en el mercado: la tecnología de deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés), conocida como el proceso *Siemens*, el cual tiene más del 90% de participación de mercado (Woodhouse, Smith, Ramdas, & Robert Margolis, 2019a)(Fu, James, & Woodhouse, 2015a). El proceso Siemens (Figura 8) comienza al eliminar las impurezas contenidas en el MG-Si, para esto, el primer paso implica la producción y destilación de triclorosilano (SiHCl₃ o TCS). Las instalaciones que fabrican más de 2,000 toneladas/año de Poly-Si generalmente fabrican su propio TCS. La producción de TCS se puede lograr mediante la reacción de MG-Si con ácido

clorhídrico (HCl) a temperaturas cercanas a los 300°C. Generalmente son necesarios entre 1.2 kg y 1.5 kg de MG-Si para producir 1 kg de Poly-Si (Parous, 2015). La mayoría de las impurezas que estaban presentes dentro del MG-Si se quedan mientras el TCS es destilado (Ceccaroli et al., 2017) (Myrvågnes, 2008)(Luque & Hegedus, 2002)(Woditsch & Koch, 2002). Posteriormente, el Poly-Si es producido al hacer pasar TCS gaseoso sobre filamentos de silicio, previamente posicionados mecánicamente para adaptarse a contactos eléctricos dentro del reactor. Una corriente eléctrica pasa a través de los filamentos de silicio resistivos en forma de U para alcanzar una temperatura que se acerca a 1150°C, la cual es lo suficientemente alta para activar el crecimiento y la deposición de Poly-Si, en la superficie de estos filamentos como resultado de la Hidrogenación de TCS con un catalizador de HCl. Como pasos finales, las barras de Poly-Si son retiradas y rotas en trozos que son empaquetados en bolsas llenas de nitrógeno o argón para su envío (Woodhouse et al., 2019a)(Bye & Ceccaroli, 2014). El Poly-Si producido por esta vía, suele ser 9N, que a menudo se denomina "grado solar" o 11N, que se denomina "grado electrónico". Sin embargo, estas etiquetas son engañosas porque la industria fotovoltaica utiliza ambos grados y mayor pureza, ya que puede producir mayores eficiencias en las celdas (Coletti, 2014).

Figura 8. Diagrama de flujo de proceso típico para la producción de Poly-Si en Hemlock y b) Representación de un reactor Siemens tradicional.

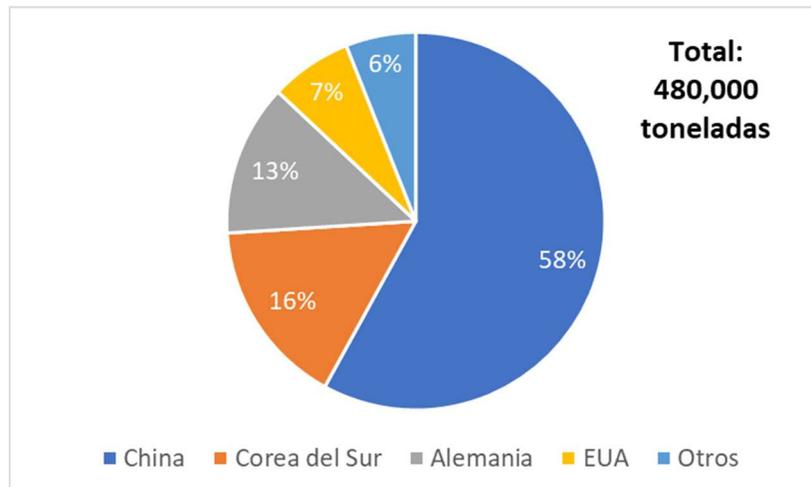


Fuente: Figuras adaptadas de (Woditsch & Koch, 2002) (a) y (Luque & Hedgus, 2002) (b).

El proceso de Siemens consume mucha energía y una gran parte de la energía se dispersa y solía perderse. Un gran avance en la producción de Poly-Si fue la utilización de campanas de metal en lugar de campanas de cuarzo. Permitted alojar 30 o más barras en forma de U invertidas en cada reactor. Esto incrementó dramáticamente la productividad mientras disminuía el consumo de energía específico por kg de Poly-Si producido. Las mejoras recientes del proceso de Siemens se han centrado en la reducción de la energía y el aumento de la productividad al jugar con la tasa de crecimiento, la configuración del filamento, el tamaño y el diseño del reactor. El número y la longitud de las barras han aumentado, mientras que el calor perdido y desperdiciado a través de la pared del reactor se minimiza aplicando un reflector térmico en la pared interior del reactor. Estos desarrollos recientes permiten construir nuevas instalaciones de producción con reactores Siemens que operan con 36 – 48 barras en U inversas. Los reactores más grandes y eficientes tienen una capacidad anual de 450–600 t y consumen menos de 50 kWh/kg de Poly-Si (Woodhouse et al., 2019a)(Bye & Ceccaroli, 2014).

La producción mundial de Poly-Si (incluido el polisilicio para la industria de semiconductores) en 2018 fue de 480,000 toneladas, donde el 93% de este volumen de producción corresponde a Poly-Si para la elaboración de CFV. De acuerdo con la Figura 9, en 2018 China fue el mayor productor de Poly-Si, con una participación del 58% en la producción de esta materia prima durante 2018, seguido por Corea del Sur, Alemania y EUA, con participaciones de 16%, 13% y 7%, respectivamente (Beunreuter, 2020)(IEA, 2019).

Figura 9. Participación en la producción mundial de Poly-Si en 2018.



Fuente: Elaboración propia con información de (Beunreuter, 2020)(IEA, 2019).

En lo que respecta a la capacidad de producción mundial de Poly-Si, a finales de 2018, esta fue de 643,000 ton/año. Donde el 69% de la capacidad de producción corresponde a empresas de origen chino, como se puede apreciar en la Tabla 4.

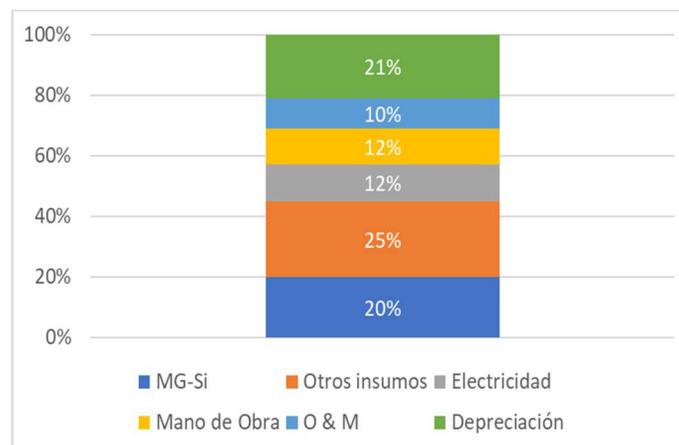
Tabla 4. Principales empresas y países productores de Poly-Si en 2019.

No.	Empresa	País	Capacidad de Producción (Ton/año)
1	Tongwei	China	96,000
2	GCL-Poly Energy	China	88,000
3	Wacker Chemie	Alemania	81,000
4	Xinte Energy	China	80,000
5	Daqo Group	China	80,000
6	East Hope New Energy	China	80,000
7	OCI	Corea del Sur	36,500
8	Hemlock	EUA	36,000
9	Asia Silicon	China	20,000
10	REC Silicon	Noruega	20,000
11	Dunan PV Techonolgy	China	10,000
12	Otras	Otros	15,500

Fuente: (Bernreuter, 2020)

En términos de costos, el costo aproximado de producir Poly-Si, hasta 2018, era de \$15 USD/kg en promedio. Sin embargo, a mediados de 2019, dicho costo disminuyó a valores de entre \$7.4 USD/kg y \$8.5 USD/kg; donde aproximadamente el 20% proviene de MG-Si y el 12% del consumo de energía (Figura 10) (Woodhouse et al., 2019)(Castellanos et al., 2018)(Powell et al., 2015)(Alan Goodrich, Hacke, et al., 2013) (Powell, Winkler, Goodrich, & Buonassisi, 2013).

Figura 10. Desglose del costo de producción de Poly-Si mediante el proceso Siemens.



Fuente: Elaboración propia con información de (Woodhouse et al., 2019).

Con respecto al precio de esta materia prima, al ser un material crítico e indispensable para la industria fotovoltaica, ha sufrido diversos altibajos a través del tiempo. A finales de los años 90s, la industria del polisilicio contaba con excedentes de producción debido a que los clientes de la industria de semiconductores e industria fotovoltaica mostraban un crecimiento saludable en volumen, lo que provocó una reducción progresiva en la capacidad de producción de polisilicio del 90% hasta 60%, generando a su vez una disminución en el precio de este material por debajo de los 30 USD/kg, derivando en el cierre de fábricas con una capacidad de producción cercana al 60% (GreentechMedia, 2008b). A partir de 2003, la fuerte demanda de módulos fotovoltaicos derivó en una competencia por el Poly-Si entre los fabricantes emergentes de paneles solares y las empresas de semiconductores, resultando en un periodo de escasez y donde los principales productores de Poly-Si, enfrentaron una caída en sus inventarios que duró varios años y que elevó el precio de este material de manera deliberada (Greentechmedia, 2008)(Hopkins & Li, 2016). Entre 2005 y 2006, los fabricantes de Poly-Si comenzaron a planificar incrementos en su capacidad de producción, con el objetivo de atender la creciente demanda. Sin embargo, el tiempo necesario para aumentar la capacidad o construir una nueva planta, no fue lo suficientemente rápido como para soportar la creciente demanda. Por lo que su precio continuo su escalada, pasando de 30 USD/kg a inicios del año 2000 hasta cerca de los 400 USD/kg para el año 2008 (Greentechmedia, 2008) (Li, 2016). Durante el periodo 2008 – 2013, la expansión del mercado fotovoltaico en China transformó a este país de exportador al principal proveedor Poly-Si en el mundo y para mediados del 2012, el precio del polisilicio ya se encontraba por debajo de los 24 USD/kg (Li, 2016). Actualmente, el precio spot del polisilicio varía en función de la evolución del mercado y se redujo significativamente durante 2018, iniciando en 18 USD/kg y cayendo drásticamente a 9.5 USD/kg a finales de diciembre de 2018 (Beunreuter, 2020)(IEA, 2019c).

Con la mejora de la eficiencia de las CFV y MFV y los esfuerzos para reducir el uso de materiales, la cantidad de Poly-Si, en gramos, utilizada para 1 W de oblea (g/w, unidad de consumo de polisilicio) ha ido disminuyendo año tras año. En 2018, se estima que, en promedio, 4.0 g/W, una reducción del 44% en comparación con los 7.2 g/W utilizados en 2009 (IEA, 2019). Situación que sumada a las economías de escala y excesos de capacidad, propició que esta materia prima se vendiera muy por debajo de su costo de producción (Chueh, 2019)(Foehringer, 2018)(Enkhardt, 2018)(Osborne, 2018a)(Osborne, 2018b).

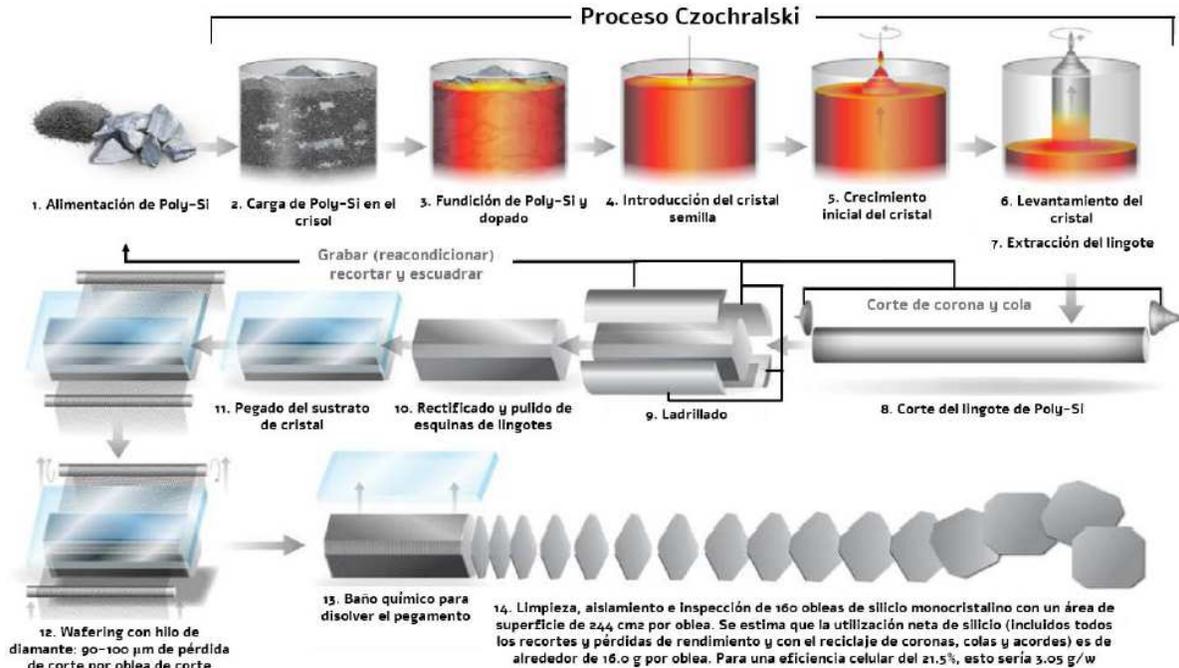
2.2.1.3 Lingote y oblea.

La industria fotovoltaica actualmente utiliza dos rutas principales para convertir materia prima de Poly-Si en obleas terminadas: la ruta para elaborar obleas de silicio monocristalinas que usa el proceso Czochralski (Cz) y la ruta para elaborar obleas de silicio policristalinas que usa el proceso de solidificación direccional (DS). Las principales diferencias entre estas dos rutas están en cómo es fundido el Poly-Si, cómo se forma en un lingote, el tamaño del lingote y cómo los lingotes se forman en ladrillos para cortarlos en forma de obleas (Woodhouse et al., 2019)(Fu et al., 2015)(N. Mason, 2013)(Nakajima & Usami, 2009)(Woditsch & Koch, 2002)(Xakalashé & Tangstad, 2011). Dado que se prevé que el Proceso Cz siga dominado el mercado (VDM, 2020), es el proceso en el que nos enfocaremos en el presente trabajo.

Como se muestra en la Figura 8, el método Cz crea un lingote cilíndrico, seguido por múltiples pasos de corte con cinta y alambre para producir obleas. Para un crisol típico de 24 pulgadas de diámetro cargado con un peso de carga inicial de aproximadamente 180 kg de Poly-Si, se requieren aproximadamente 35 horas para llevar a cabo el proceso de derretir el Poly-Si en el crisol, sumergir un cristal semilla de Poly-Si en el fundido y extraer el cuello, el hombro, el cuerpo y el cono final. El resultado es un lingote de Cz cilíndrico con una masa de entre 150 a 200 kg (Pasos 3-7 en la Figura 11). Para dejar atrás los metales y otros contaminantes, es necesario dejar 2 – 4 kg de restos en el crisol. Posteriormente, los lingotes de Cz se recortan en ladrillos que permiten una mayor densidad de empaquetamiento de celdas en los módulos a la vez que minimizan el costo de los lingotes y las obleas. La sección transversal del ladrillo se realiza cortando el lingote a lo largo después de cortar las partes superiores y las colas, como se muestra en los Pasos 8 y 9 de la Figura 8. Las superficies expuestas luego se pulen para producir superficies lisas y esquinas redondeadas (Paso 10). La tendencia actual de la industria es producir obleas Cz en el "formato M2", que es un corte transversal plano a plano específico de 156.75 mm x 156.75 mm con una superficie total de 244 cm². Después de pegar el ladrillo a una placa de vidrio (Paso 11), toda la unidad se coloca en una máquina de sierra de alambre donde las hebras de alambre cortan el ladrillo en obleas individuales (Paso 12). El pegamento se disuelve sumergiendo la placa de soporte de vidrio y ladrillo en rodajas en un baño químico (Paso 13). Finalmente, las obleas se limpian y se inspeccionan para detectar signos de rotura. A través de este proceso, se llegan a producir entre

5,000 y 6,000 obleas por lingote (Fu et al., 2015; N. Mason, 2013; Nakajima & Usami, 2009; Woditsch & Koch, 2002; Woodhouse et al., 2019; Xakalashe & Tangstad, 2011).

Figura 11. Proceso Cz para la elaboración de lingotes y obleas de Poly-Si.

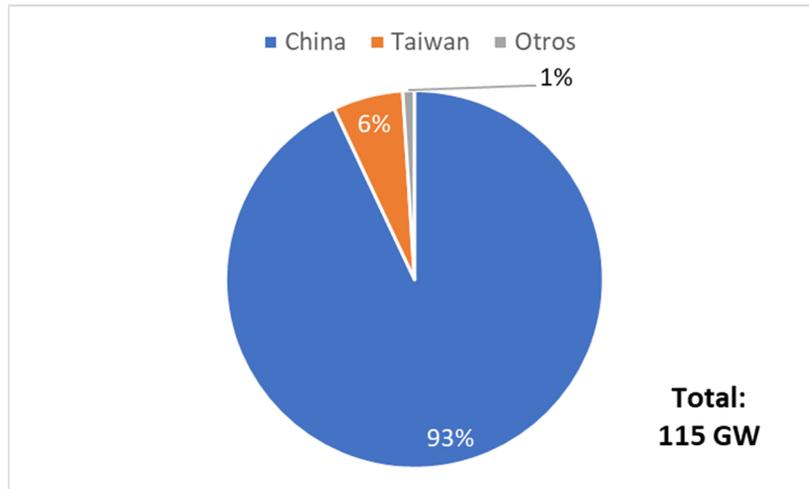


Fuente: Figura adaptada de (Woodhouse et al., 2019).

Los fabricantes de lingotes son en muchos casos fabricantes de obleas. Además de los principales fabricantes de lingotes/obleas, algunos fabricantes de CFV y MFV también cierta cantidad de lingotes y obleas para sus usos internos. Debido a la presión de los costos, algunos de estos importantes fabricantes de módulos fotovoltaicos que establecieron la fabricación integrada verticalmente están cambiando a la adquisición de obleas de fabricantes especializados debido a las ventajas de costo y calidad.

Se estima que durante 2018 se produjeron alrededor de 115,000 MW de obleas de Poly-Si. A partir de una capacidad de producción aproximada de 156,000 MW/año. Nuevamente, China domina la producción de obleas de Poly-Si con una producción cercana a los 107,000 MW, y que representa aproximadamente el 93% de la producción mundial, seguido por Taiwán con un 6% y otros países como Noruega, Corea del Sur, y los EUA que, en conjunto, representan el 1%, como se muestra en la Figura 12 (IEA, 2019).

Figura 12. Participación en la producción mundial de obleas de Poly-Si en 2018.



Fuente: Elaboración propia con información de (Hutchins, 2018)(IEA, 2019).

La Tabla 5 muestra las principales empresas fabricantes de lingotes y obleas de Poly-Si en el mundo.

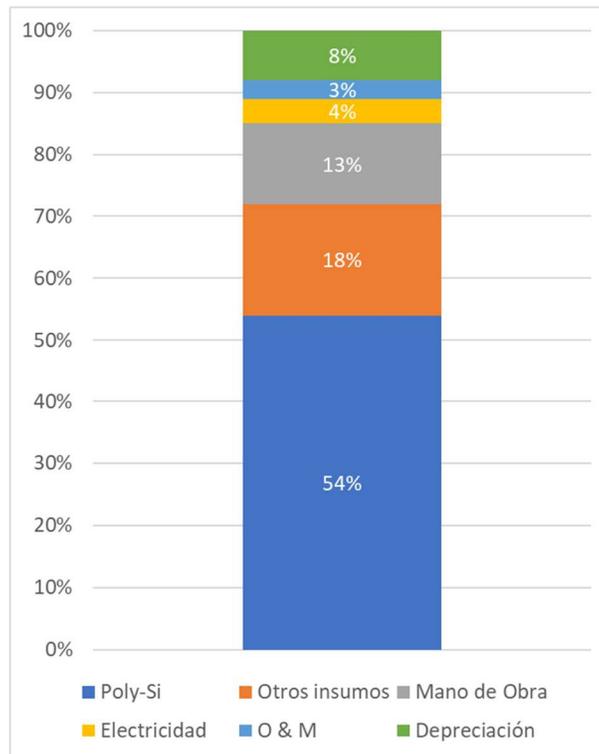
Tabla 5. Principales empresas y países productores de obleas de Poly-Si en 2018.

No.	Empresa	País	Capacidad de Producción (MW/año)
1	GCL-Poly Energy	China	30,000
2	LONGi Green Energy Technology	China	28,000
3	Inner Mongolia Zhonguan Photovoltaic Material	China	25,000
4	JA Solar	China	11,500
5	Trina Solar	China	11,000
6	Jinko Solar	China	10,500
7	Yingli Green Energy	China	4,000
8	Motech Industries	Taiwan	3,700
9	REC Solar	Noruega	1,000

Fuente: (IEA, 2019)(IEA, 2019a)(Hutchins, 2018).

En cuanto al costo de producción de las obleas monocristalinas elaboradas por el método Cz es aproximadamente de entre \$0.209 y \$0.394 USD/oblea, siendo el Poly-Si el que mayor participación tiene, con más del 50% del costo total (Figura 13). En lo que respecta a su precio spot, las obleas monocristalinas se venden, en promedio, entre \$0.36 y \$0.68 USD/oblea (Woodhouse et al., 2019)(PVinsights, 2020).

Figura 13. Desglose del costo de producción de obleas de Poly-Si.



Fuente: (Woodhouse et al., 2019)(von Ammon, 2014).

2.2.1.4 Celda fotovoltaica (CFV).

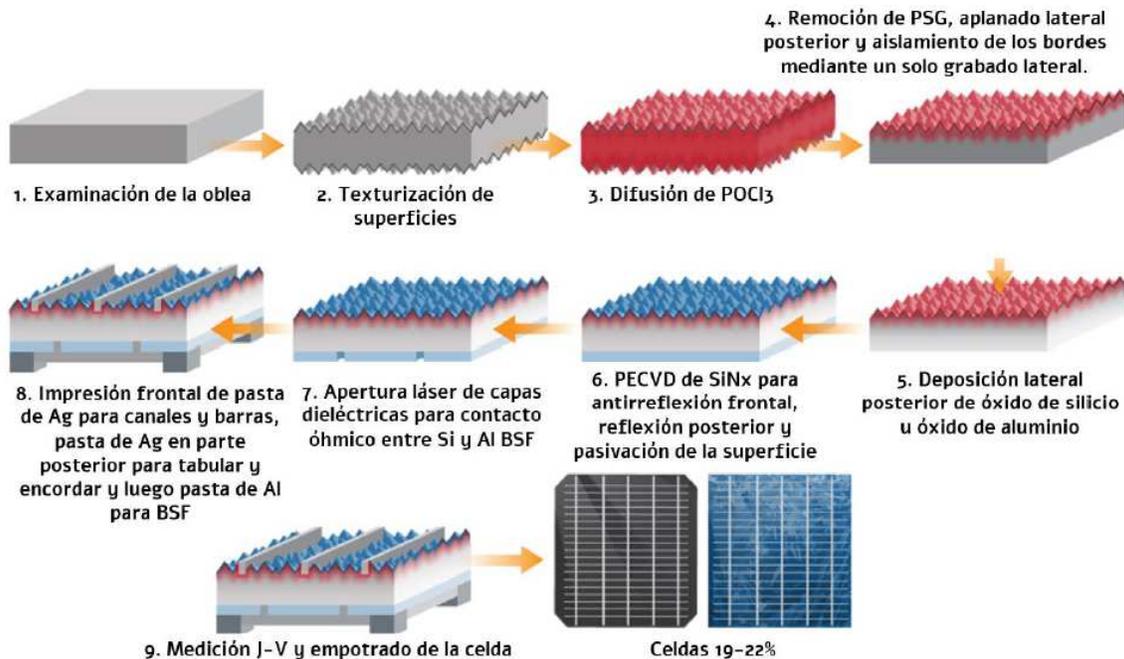
La elaboración de una celda fotovoltaica implica exponer las obleas de silicio a una serie de tratamientos químicos húmedos, difusiones gaseosas a alta temperatura, deposiciones de recubrimientos y etapas de metalización. La secuencia exacta y las herramientas de fabricación utilizadas dependen de la arquitectura de la celda.

El proceso estándar de conversión de células de campo de superficie posterior de aluminio (Al-BSF) fue el pilar de la fabricación de CFV durante décadas (Alan Goodrich, Hacke, et al., 2013). Sin embargo, otra tecnología, conocida como procesamiento pasivo de emisor de celda trasera (PERC, por sus siglas en inglés) se está utilizando ampliamente ya que mejora las eficiencias de conversión de la luz solar (hasta en un 1.5% en la eficiencia de células absoluta) más allá de las posibles a través de la arquitectura estándar de Al-BSF de área completa (Alan Goodrich, Hacke, et al., 2013). Actualmente, la participación de las celdas PERC en el mercado es de

aproximadamente 65% y se espera que sea la tecnología dominante en los próximos años (VDMA, 2020), motivo por el cual nos concentramos en esta tecnología en esta sección.

La ventaja técnica de la arquitectura PERC reside principalmente en su capacidad para reducir las pérdidas por recombinación eléctrica ya que refleja los rayos solares en la parte posterior de la CFV (en lugar de ser absorbidos por el módulo), lo que garantiza una mayor eficiencia y un mejor rendimiento en entornos con poca luz. La mitigación de estas pérdidas se puede lograr insertando una pila de uno o dos materiales en la parte posterior de la oblea, entre el sustrato de silicio y la metalización de aluminio inferior. Todavía es necesario habilitar puntos de contacto directo entre el silicio y el aluminio, lo que estimuló el desarrollo de equipos capaces de modelar agujeros y zanjas precisos perforados con láser. La mayor parte de la interfaz entre la pasta de silicio y aluminio todavía está cubierta por la capa de pasivación. La Figura 14 muestra el flujo del proceso para la fabricación de las CFV de tecnología PERC. El paso 5, el paso 6 (reflexión de la parte posterior y pasivación de la superficie), y el paso 7 son los pasos adicionales a la fabricación de CFV tipo Al-BSF.

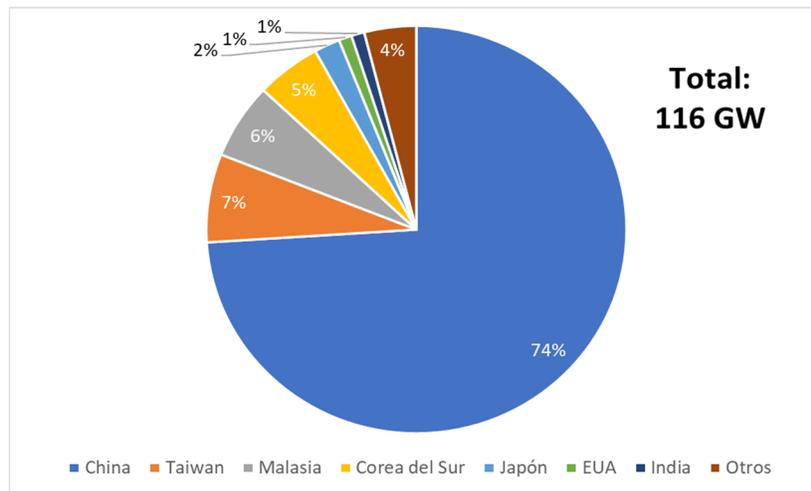
Figura 14. Proceso para la fabricación de CFV tipo PERC.



Fuente: Figura adaptada de (Woodhouse et al., 2019).

La producción mundial de CFV durante en 2018 fue de alrededor de 116,000 MW. Al igual que con otros insumos o materiales de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, China registró la mayor de CFV, donde se produjeron cerca 86,000 MW de CFV, representando el 74% de la producción mundial de CVF durante 2018, seguido por Taiwán, Malasia y Corea del Sur con 7%, 6% y 5% respectivamente. Con menor participación en la producción de este componente se encuentran Japón, con un 2% y EUA y India, ambos con 1% (IEA, 2019), como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Participación en la producción mundial de CFV en 2018.



Fuente: Elaboración propia con información de (IEA, 2019).

Así mismo, China cuenta con la mayor capacidad de producción del mundo con aproximadamente 128,000 MW/año. Como se muestra en la Figura 4.4, el volumen de producción de células solares de China representa el 74% del total mundial. La capacidad de producción global de células solares alcanzó 172 GW / año, debido particularmente a la mejora de la capacidad de producción en China. Los principales productores de CFV en el mundo se muestran en la Tabla 6, donde también las empresas chinas son la mayoría.

Tabla 6. Principales empresas y países productores de CFV en 2018.

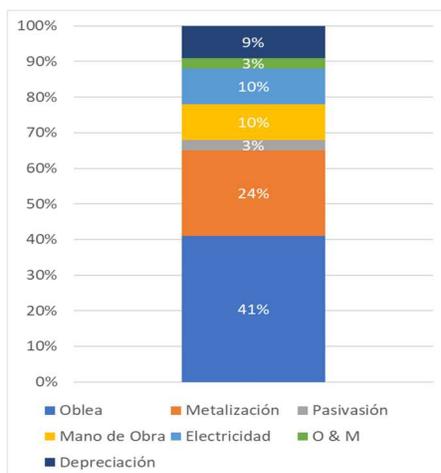
No.	Empresa	País	Capacidad de Producción (MW)
1	Tongwei	China	20,000
2	Trina Solar	China	16,000
3	JA Solar	China	11,000
4	Jinko Solar	China	11,000
5	Canadian Solar	China	9,600
6	Aiko Solar	China	9,200
7	Hanwha Q-CELLS	Corea del Sur	8,000
8	LONGi Green Energy Technology	China	5,000
9	Shunfeng (inclu. Wuxi Suntech)	Taiwán	4,900
10	First Solar ^a	EUA	3,200

^aFabrica CFV de capa fina de CdTe.

Fuente: (IEA, 2019)(IEA, 2019a)(IEA, 2019b)(Hutchins, 2018)

Con respecto al costo, el total para la conversión de celdas PERC monocristalinas, es aproximadamente de entre \$0.06 y 0.127 USD/W. Donde la oblea y la metalización (pastas de plata y aluminio) representan aproximadamente el 40% y el 24% del costo total de fabricación, respectivamente (Figura 16). Hasta ahora, los requisitos de materiales para la metalización son de alrededor de 80–110 mg de pasta de plata para el frente de la CFV, 20–50 mg de pasta de plata para la parte posterior y 1.3–1.5 g de pasta de aluminio para la parte trasera. Por la composición de estas pastas, incluidos los aditivos, del costos total de la metalización, el 58% corresponde a la parte frontal de plata, el 19% a la plata de la parte trasera y restante 23% a la parte trasera de aluminio (Woodhouse et al., 2019).

Figura 16. Desglose del costo de producción de CFV tipo PERC.



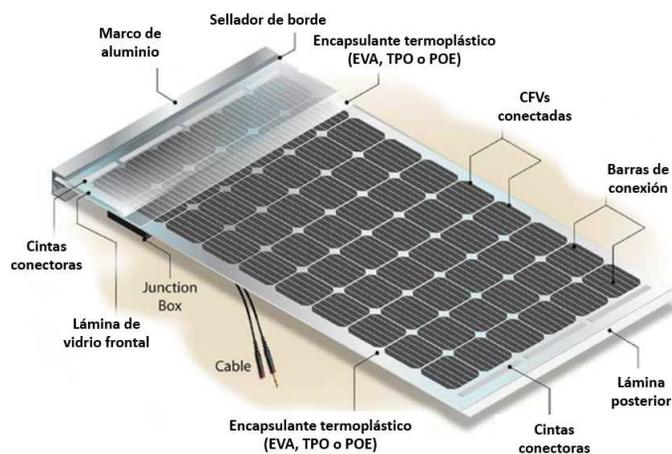
Fuente: (Woodhouse et al., 2019).

El precio spot actual de las celdas cristalinas PERC es aproximadamente de entre \$0.094 y \$0.198 USD/W para la celda monocristalina (Woodhouse et al., 2019)(PVinsights, 2020).

2.2.1.5 Módulo fotovoltaico (MFV).

El ensamblaje del módulo fotovoltaico inicia con una lámina de vidrio de bajo contenido de hierro y con recubrimiento antireflectivo (ARC), a la cual se le coloca una lámina de un material encapsulante termoplástico, el cual puede acetato de etil vinilo (EVA), poliolefina termoplástica (TPO) o poliolefina encapsulante (POE). Posteriormente, sobre el material encapsulante se coloca una matriz de CFVs las cuales fueron previamente conectadas eléctricamente una con otra mediante cintas conectoras metálicas en un proceso conocido como “tableado”, dicha matriz es colocada sobre la lámina del material encapsulante y cubierta con otra lámina de encapsulante. Los encapsulantes delanteros y traseros al ser materiales termoplásticos se funden cuando se les aplica calor durante el proceso de “laminado”, aislando la matriz de CFVs y quedando entre la lámina de vidrio en la parte frontal y una lámina parte posterior, la cual es típicamente de un material plástico como el tereftalato de polietileno (PET) o poliolefinas (PO). Después, MFV es sellado utilizando un marco de aluminio extruido colocado alrededor del perímetro del módulo y pegado con sellador de silicona. Finalmente, los cables eléctricos a través de los cuales fluiría la energía fuera del MFV son conectados al conjunto de CFV por un orificio en la lámina posterior y colocados dentro de una caja de conexiones (Junction box), la cual contiene diodos como protección eléctrica y será el punto de contacto entre los módulos en un SFV. La Figura 17 muestra un proceso representativo y un esquema para elaboración de un módulo de silicio monocristalino de 60 celdas. Algunas empresas están desarrollando módulos de 72 celdas y de 96 celdas, sin marco de aluminio y con láminas de vidrio en la parte frontal y posterior del MFV, generalmente para MFV bifaciales (El Amrani, Mahrane, Moussa, & Boukennous, 2007)(Woodhouse et al., 2019).

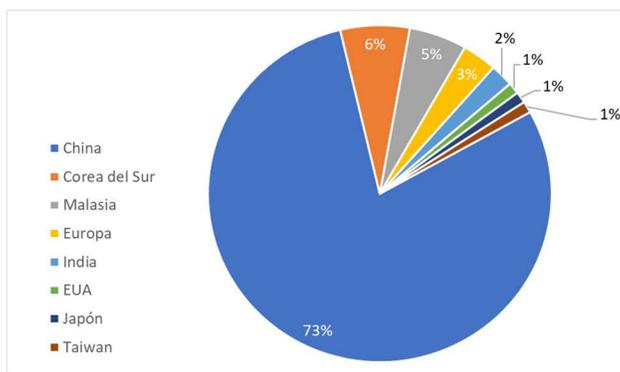
Figura 17. Proceso para la fabricación de un módulo de silicio monocristalino de 60 celdas y MFV terminado.



Fuente: Modificado del original (Woodhouse et al., 2019)

La producción de MFVs durante 2018 fue de aproximadamente 116,000 MW, donde de manera reiterada, China mantuvo la delantera con una producción aproximada de 84,000 MW, representando el 73% de la producción total mundial. Seguido por Corea del Sur y Malasia con una participación del 6% y 5% respectivamente de la producción mundial total. Con menores participaciones se encuentran Europa con un 3%, India con un 2% y EUA, Japón y Taiwán con un 1% cada uno (Figura 18).

Figura 18. Participación en la producción mundial de MFV en 2018.



Fuente: Elaboración propia con información de (IEA, 2019).

En cuanto a la capacidad de producción de MFVs en 2018, también China tiene la delantera con una capacidad de 130 GW/año, seguido por Corea del sur con 8 GW/año, y Malasia con 6 GW/año, mientras que la India cuenta con una capacidad de 3 GW/año.

Los principales productores de MFV en el mundo se muestran en la Tabla 7, donde también la capacidad de producción la concentran empresas chinas.

Tabla 7. Principales empresas y países productores de MFV en 2018.

No.	Empresa	País	Capacidad de Producción (MW)
1	LONGi Green Energy Technology	China	12,450
2	Jinko Solar	China	12,400
3	JA Solar	China	12,000
4	Risen	China	11,000
5	Canadian Solar	China	9,440
6	Trina Solar	China	7,900
7	Hanwha	Corea del Sur	4,300
9	LONGi Green Energy Technology	China	5,000
10	Shunfeng (inclu. Wuxi Suntech)	Taiwán	4,900
11	First Solar ^a	EUA	3,200

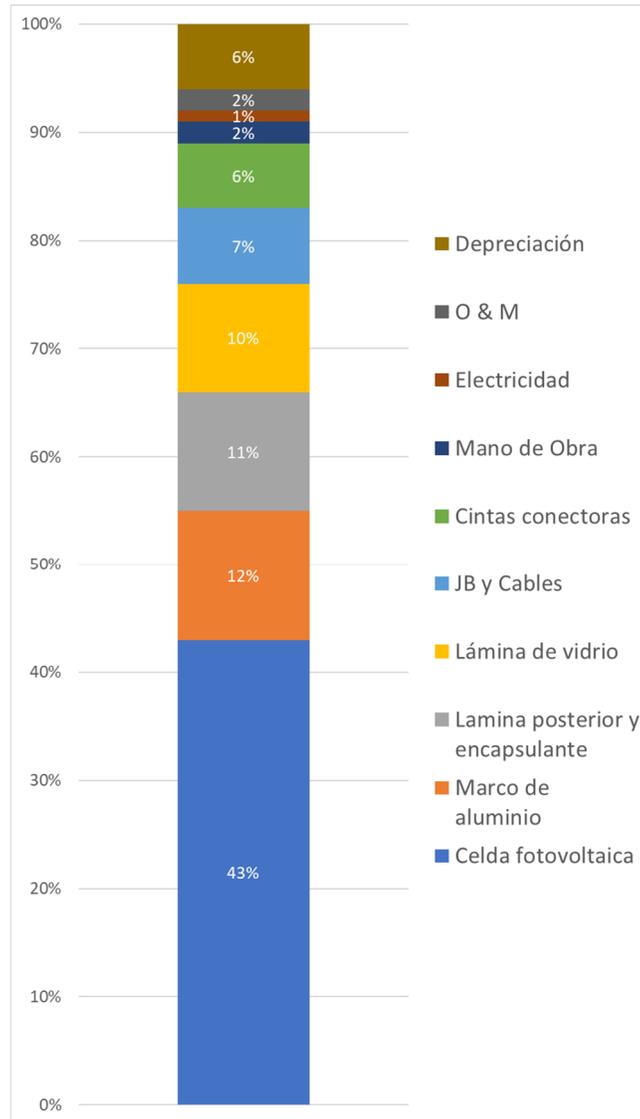
^aFabrica MFV de capa fina de CdTe.

Fuente: (IEA, 2019)(IEA, 2019a)(IEA, 2019b)(Hutchins, 2018)

En relación con los costos, el costo total de ensamblar un MFV es aproximadamente de entre \$0.113 y \$0.204 USD/W, donde la CFV, el proceso de laminado y el marco de aluminio son los costos más representativos, significando el 43%, 21% y 12%, respectivamente, tal y como se muestra en la Figura 19.

Con respecto al precio spot de un MFV, actualmente este se encuentra entre los \$0.196 y los \$0.358 USD/W para módulos de 60 CFV PERC de silicio monocristalino (Woodhouse et al., 2019)(PVinsights, 2020).

Figura 19. Desglose del costo de ensamblar un MFV.

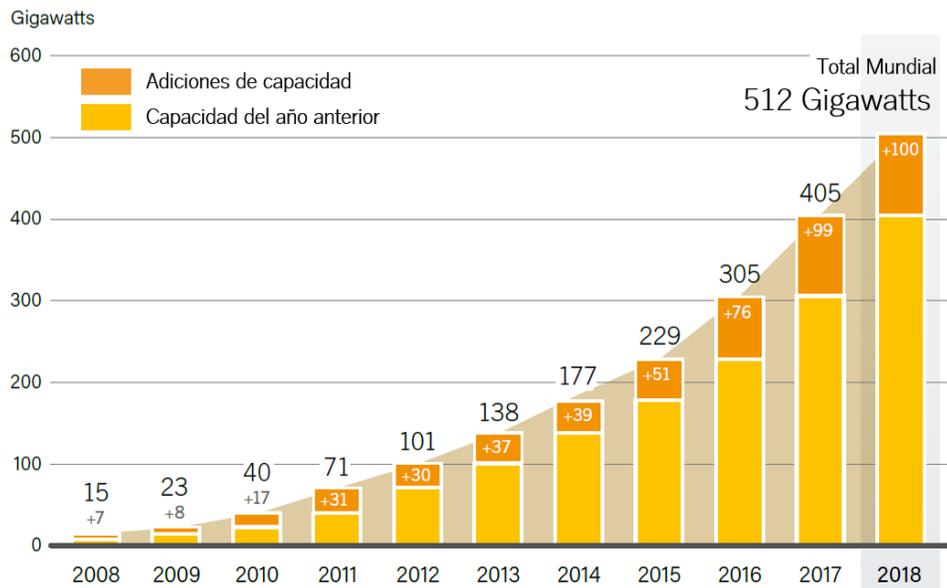


Fuente: (Woodhouse et al., 2019).

2.2.2 La parte descendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica.

El año 2018 fue el año en el que por primera vez se pasó la barrera de los 100 GW de nuevas instalaciones fotovoltaicas (incluyendo interconectadas y no conectadas a la red). La capacidad acumulada a nivel mundial alcanzó los 512 GW. Significando un incremento del 26% con respecto a la capacidad instalada en 2017 (REN21, 2019)(IEA, 2019c), como se puede ver en la Figura 20.

Figura 20. Capacidad instalada de energía solar fotovoltaica, 2008-2018.



Fuente: (REN21, 2019)(IEA, 2019c)

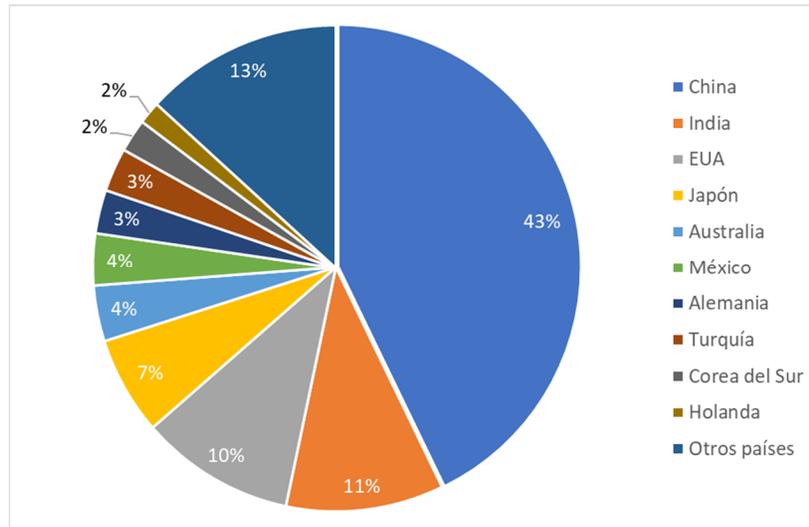
A pesar de la desaceleración del mercado en China, situación que afectó al todo el mundo cuando este país decidió controlar su mercado fotovoltaico al reducir el pago FiT para la generación solar, limitar los proyectos distribuidos a 10 MW y finalizar los subsidios para nuevas plantas de generación centralizada, exigiendo que pasen por subastas para fijar los precios de la energía (Shaw, 2018)(Hannen, 2018). El auge de los mercados de países emergentes y en Europa, debido en gran parte a las reducciones en los precios de la tecnología fotovoltaica (SolarPowerEurope, 2018) y a que la energía solar fotovoltaica continua siendo la opción más competitiva para la generación de electricidad, con mercados que añaden capacidad a escala de gigawatts en un número cada vez mayor de países, tanto para aplicaciones residenciales y comerciales como para proyectos de servicios públicos; contribuyó a la estabilización del mercado en 2018 (REN21, 2019)(IEA, 2019c).

Por sexto año consecutivo, Asia eclipsó a todos los demás mercados, representando alrededor del 62% (66.3 GW) de las adiciones globales de capacidad. Los países con mayores incrementos de capacidad fueron China con 44.3 GW, India con 10.8 GW, EUA con 10.7 GW y Japón con 6.7 GW. En conjunto, la Unión Europea incremento su capacidad en 8.4 GW, siendo Alemania, Holanda y Francia los principales mercados durante 2018 (REN21, 2019)(IEA, 2019c)(SolarPowerEurope, 2019). Siguiendo a los primeros cuatro países, se encuentra Australia con una nueva capacidad de 3.8 GW, derivada de un auge en aplicaciones a gran escala junto con una sólida demanda de sistemas fotovoltaicos distribuidos, que experimentó el país durante 2018. Alemania (sexto a nivel mundial como país) volvió a ocupar el primer puesto entre los países europeos, incrementando su capacidad en casi 3.0 GW. Seguido por México, donde las nuevas instalaciones fotovoltaicas, mayormente de generación centralizada como resultado de la primera subasta de generación de energía a largo plazo, finalmente se desarrollaron después de algunos años de lento desarrollo, instalándose un total de 3.6 GW durante 2018. A México le siguieron Turquía, con 2.9 GW, lo que confirma el potencial del país. Corea de Sur con 2.3 GW, con un mercado en donde se confía completamente en las aplicaciones. Y Holanda, con 1.5 GW instalados en 2018, en un mercado en auge.

En total estos 10 países representaron el 86% del mercado mundial en 2018 (Figura 21), una señal de que el crecimiento del mercado fotovoltaico global fue impulsado por un número limitado de países, mientras que otros están contribuyendo marginalmente. Sin embargo, esta concentración del mercado disminuye constantemente a medida que comienzan a surgir nuevos mercados, lo que permitió una estabilización del mercado a pesar de la menor contribución de China (REN21, 2019)(IEA, 2019c)(SolarPowerEurope, 2019).

Además de los anteriores, otros países instalaron cantidades significativas de energía fotovoltaica. Brasil instaló de 1.1 GW gracias a importantes cambios en su política energética, Taiwán (970 MW) Egipto (491 MW), Chile (596 MW), Israel (406 MW) y Malasia (503 MW). En total, once países agregaron más de 1 GW de nueva capacidad y los mercados de todo el mundo han comenzado a contribuir de manera significativa al crecimiento global. Para fines de 2018, al menos 32 los países tenían una capacidad acumulada de 1 GW o más.

Figura 21. Participación en la instalación de nueva capacidad fotovoltaica en 2018.



Fuente: (REN21, 2019)(IEA, 2019c)(SolarPower Europe, 2019)

Uno de los principales motivos de estos aumentos de capacidad instalada, es la participación de la generación distribuida (GD). El interés en este segmento es significativo y crece rápidamente, sin embargo, a pesar de su expansión, este mercado siguió teniendo muy poca participación en 2018. En China la GD representó el 43% de la nueva capacidad añadida en 2018. En India, esta aplicación de la energía solar fotovoltaica continuó creciendo rápidamente, aproximadamente en 60% durante 2018, integrado principalmente por grandes empresas comerciales e industriales, así como por entidades gubernamentales e instituciones educativas, todas buscando reducir sus facturas de electricidad (Prateek, 2018)(REN21, 2019). En Japón, la GD se mantuvo estable y se expandió el interés en el uso de almacenamiento más energía solar para el autoconsumo. La generación distribuida en el sector comercial también ha crecido a medida que la caída de los costos de la energía solar en relación con la electricidad de la red ha aumentado el interés de este sector en el autoconsumo. Así mismo en los EUA, el interés en el almacenamiento con energía solar también está aumentando en el mercado residencial de este país (REN21, 2019). En América Latina, la GD ha comenzado a experimentar un crecimiento significativo, particularmente en Brasil y México, donde la capacidad distribuida acumulada superó los 0.5 GW en 2018 (REN21, 2019)(CRE, 2019). Gracias principalmente a políticas como medición neta (net metering), al número creciente de incentivos a nivel estatal (en Brasil), la caída de los precios de los módulos, el aumento de las tarifas eléctricas y una mayor conciencia ambiental. Sin embargo, el acceso al financiamiento sigue siendo un desafío en gran parte de América Latina para proyectos de todos

los tamaños debido en parte a las tasas de interés volátiles y la inestabilidad cambiaria (REN21, 2019). En Europa, el mercado de GD aumentó, aunque no en la proporción de años anteriores, siendo los impulsores la eliminación de aranceles a los paneles solares chinos y el aumento de los precios de las emisiones en el Sistema de Comercio de Emisiones de la UE, que mejoró la competitividad de la energía solar fotovoltaica en relación con los combustibles fósiles; y una continua disminución de los precios de los sistemas solares fotovoltaicos (REN21, 2019)(IEA, 2019c)(SolarPower Europe, 2019).

Un caso sobresaliente es el de Australia, donde el autoconsumo también está jugando un papel importante. En la mayor parte de este país, la energía solar ya es más barata que la electricidad proveniente de la red, gracias a la caída del precio de la generación solar fotovoltaica, los subsidios existentes para las instalaciones a pequeña escala y los altos precios de la electricidad (CSIRO, 2018). A fines de 2018, uno de cada cinco hogares en Australia genera al menos parte de su electricidad con energía solar y se estima que la GD en este país aumentó un 22% durante el año como resultado de una mayor comprensión entre los propietarios del sistema sobre cómo maximizar su producción así como el uso de sistemas inteligentes de gestión de energía y de equipo de monitoreo (CEC, 2019); los sistemas de azotea representaron el 4.2% del consumo total de electricidad del país (Roberts et al., 2018). Sin embargo, la creciente penetración de la energía solar fotovoltaica continuó remodelando la red eléctrica de Australia durante el año, desafiando a los servicios eléctricos. Por ejemplo, en Queensland, donde se instaló aproximadamente la mitad de la nueva capacidad a gran escala, la generación solar ha disminuido precios mayoristas de energía. El dramático aumento de grandes proyectos en 2018 comenzó a causar restricciones en la red y a finales de año, las mayores preocupaciones para los desarrolladores de proyectos eran las demoras y el cambio de reglas para las conexiones a la red, lo que resultó en sobrecostos y socavó la confianza de los inversores, lo que ralentizó la cartera del proyecto (REN21, 2019).

Como se puede apreciar, en varios países, la energía solar fotovoltaica ya juega un papel importante y creciente en la generación de electricidad. En 2018, representó el 12.1% de la generación total en Honduras y participaciones sustanciales también en Italia (casi 8.2%), Grecia (8.2%), Alemania (7.7%) y Japón (6.5%). A finales de 2018, había suficiente capacidad en funcionamiento en todo el mundo para producir cerca de 640 TWh de electricidad al año, o un 2.4% estimado de la generación eléctrica mundial anual (IRENA, 2019).

Sin embargo, en la mayoría de los países, todavía existe la necesidad de esquemas de apoyo para la energía solar fotovoltaica, así como de marcos regulatorios y políticas adecuados que rijan las conexiones a la red. Además de abordar los desafíos para que la energía solar fotovoltaica se convierta en una fuente de electricidad importante en todo el mundo, incluida la inestabilidad normativa y de políticas en muchos países, así como desafíos financieros y de financiamiento, y la necesidad de integrar la energía solar fotovoltaica en los mercados y sistemas de electricidad de manera justa y sostenible.

Capítulo 3. Políticas para el desarrollo de la industria fotovoltaica.

3.1 La Política Industrial

El concepto de política industrial ha evolucionado en la medida que su objetivo y alcance han estado relacionados con el contexto económico, social y político prevaleciente y se refiere a aquellas acciones resultantes de las estrategias públicas implementadas por el Estado para alcanzar ciertos objetivos y metas. Según Chang (1994), existen dos categorías principales de política económica: las políticas macroeconómicas y las microeconómicas. Las primeras incluyen las políticas fiscales y monetarias que determinan el tamaño de las variables agregadas (producción, empleo y precios) a corto plazo, mientras que las políticas microeconómicas determinan la estructura sectorial y la calidad de la producción industrial, así como los vectores de empleo que afectan a los actores individuales (empresas y consumidores) en el mediano y largo plazo. Las políticas microeconómicas incluyen políticas industriales, políticas tecnológicas, políticas de competencia, etc.

La política industrial puede definirse de diferentes maneras, según la intervención del Estado en apoyo de la industrialización. Reich (1982) define a la política industrial como el conjunto de acciones gubernamentales diseñadas para apoyar industrias que tienen un gran potencial de exportación y capacidad de creación de empleo, así como también el potencial para apoyar directamente la producción de infraestructura. Pinder (1982) amplía esta definición incluyendo todas las políticas diseñadas para apoyar a la industria, incentivos fiscales y monetarios para inversión, inversión pública directa y programas de adquisición pública, incentivos para inversión en investigación y desarrollo, programas principales para la creación de empresas líder nacionales en sectores estratégicos y políticas para apoyar a las pequeñas y medianas empresas. Esta definición incluye apoyo directo para la creación y mejora de la infraestructura física y la infraestructura social (instituciones), política comercial, política de competencia y programas para apoyar directamente actividades industriales intensivas en mano de obra. Johnson (1984) define la política industrial de manera más precisa, como las actividades del gobierno que apuntan a apoyar el desarrollo de ciertas industrias en una economía nacional para mantener la competitividad internacional. Landesmann (1992) contribuye a la definición subrayando que una política industrial es aquella que discrimina y selecciona entre industrias, sectores y agentes, y está diseñada específicamente para cada industria y sector elegido dentro de un territorio nacional

determinado. Chang (1994) describe las políticas industriales como acciones gubernamentales que apoyan la generación de producción y la capacidad tecnológica en industrias consideradas estratégicas para el desarrollo nacional. Esto implica que la discriminación entre actividades, sectores y agentes se basa en su potencial para impulsar la economía en general. Finalmente, Peres y Primi (2009) definen la política industrial como el conjunto de instrumentos (esencialmente incentivos, regulaciones y formas de participación directa en la actividad económica) a través de los cuales el Estado promueve el desarrollo de actividades económicas específicas o agentes económicos (o un grupo de ellos) en función de las prioridades nacionales de desarrollo.

De acuerdo con lo anterior, en términos generales, la política industrial se refiere a la intervención del Estado en la industria para organizar y modificar la estructura y los esquemas de producción, considerando la diversidad y la complementariedad entre las actividades de producción y sus efectos sobre el crecimiento económico, la productividad y el desarrollo, ya que no solo se limita a medidas dirigidas al sector secundario de la economía, sino que de igual manera abarca aquellas medidas dirigidas al desarrollo de servicios y las actividades primarias.

Las políticas industriales pueden agruparse en cuatro variantes de acuerdo con sus alcances. Estas variantes son: *políticas horizontales pasivas*, *políticas horizontales activas*, *políticas para el cambio estructural sin desafiar ventajas comparativas* y *políticas que buscan generar nuevas ventajas comparativas*.

La Tabla 2 resume la amplia variedad de instrumentos disponibles para los gobiernos en materia de política industrial. Ampliándose conforme se avanza en el tipo de políticas hacia el final de la Tabla, ya que considera los instrumentos con los que cuenta la política anterior. Es decir, las políticas para el cambio estructural también cuentan con los instrumentos de las políticas horizontales pasivas y activas, aunque varía el enfoque e integración con una estrategia nacional de desarrollo.

Debe tenerse en consideración que esta clasificación descrita no implica que exista una versión precisa para cada uno de los enfoques. Por lo general los países seleccionan los instrumentos que más se ajustan a su estrategia de desarrollo, pero sin apearse estrictamente a uno de los cuatro enfoques descritos.

Tabla 8. Tipos de Políticas Industriales.

Políticas	Objetivos	Instrumentos
Horizontales Pasivas	No discriminación de actividades	a) Políticas de competitividad: <ul style="list-style-type: none"> • Macroeconomía estable. • Garantías para el cumplimiento de contratos. • Facilidad para la apertura de nuevos negocios. • Protección de inversiones y construcción de infraestructura. b) Políticas comerciales y de atracción de IED: <ul style="list-style-type: none"> • Acciones de apertura unilateral generalizada. • Suscripción de acuerdos bilaterales o multilaterales que no distinguen o protegen sectores específicos. • Apertura al capital extranjero.
Horizontales Activas	Corregir fallas de mercado	a) Políticas para impulsar el desarrollo científico y tecnológico y la innovación: <ul style="list-style-type: none"> • Apoyos directos para las actividades privadas de I+D. • Promoción de proyectos conjuntos de I+D que permitan internalizar externalidades b) Políticas orientadas a la formación de recursos humanos y la capacitación empresarial: <ul style="list-style-type: none"> • Financiamiento para la formación de recursos humanos especializados. • Programas públicos para la actualización de competencias. c) Políticas de apoyo a las pymes y microempresas. d) Políticas de apoyo en materia de acceso al crédito. e) Políticas para corregir problemas derivados de información imperfecta: <ul style="list-style-type: none"> • Organización de eventos, ferias y encuentros. • Directorios empresariales. • Seminarios y conferencias f) Políticas de protección de propiedad intelectual.
Políticas para el cambio estructural sin desafiar ventajas comparativas	Impulso de estrategias de desarrollo basadas en ventajas comparativas ya existentes	a) Políticas de acción directa del Estado: <ul style="list-style-type: none"> • Proporcionar información sobre industrias nuevas, consistente con las ventajas comparativas. • Coordinar inversiones en industrias relacionadas y mejorar la infraestructura. • Subsidios fiscales directos. • Exenciones tributarias no focalizadas. • Crédito dirigido y con tasas de interés subsidiadas. • Catalizar el desarrollo de industrias nuevas a través de la incubación y/o la atracción de inversión extranjera directa. • Aranceles sobre el comercio exterior.
Políticas para el cambio estructural que crean nuevas ventajas comparativas	Modificar y desafiar ventajas comparativas	Los instrumentos de política industrial utilizados para este enfoque combinan todos los anteriores con instrumentos de intervención directa del Estado en materia de financiamiento, estímulos fiscales, inversión y compras públicas, entre otros. Cabe destacar que bajo este enfoque la política industrial debe confluir con las políticas macroeconómicas, sociales y laborales para alcanzar el cambio estructural.

Fuente: Elaboración propia con información de (Buiges & Sekkat, 2009)(Kosacoff & Ramos, 1999)(CEPAL, 2012)(CEPAL, 2014).

En América Latina, incluso en los años ochenta y noventa, cuando el llamado Consenso de Washington ejerció su mayor influencia, persistió la ejecución de políticas industriales que iban más allá de las horizontales pasivas, como por ejemplo instrumentos de apoyo a la PYME y de

fomento a la ciencia, tecnología e innovación. Asimismo, continuó el apoyo a sectores estratégicos (minería, automotor, software y petróleo, entre otros) o actividades productivas con orientación exportadora (políticas selectivas) (CEPAL, 2014). Sin embargo, ninguno de los países que siguieron estrictamente el Consenso de Washington ha logrado un éxito significativo en términos de actualización tecnológica, crecimiento económico y reducción de la pobreza (H. Chang, 2009; Rodrik, 2004).

En esencia, la política industrial apunta en cierta manera a complementar los mecanismos propios del mercado, aún con la universalidad de sus imperfecciones, que aunado a la legitimidad de los criterios de inversión, que van más allá de la eficiencia microeconómica, la cuestión no es el aplicar o no una determinada política industrial, sino el cómo hacerlo (Rodrik, 2004).

Los críticos señalan varias formas en las que los grupos de interés abusan con frecuencia de la política industrial; esto debido a las denominadas “fallas de gobierno”, que ocurren cuando los tomadores de decisiones anteponen sus propios intereses o los de un grupo a los intereses de la comunidad (Bianchi & Labory, 2011). Mayoritariamente, las objeciones a la política industrial son de tipo práctico, esto es, de aplicación. Naudé (2010) distingue los argumentos que enfatizan los retos o las restricciones de información, de aquellos que apuntan a la búsqueda de rentas y la corrupción, como las dos objeciones más comunes al diseño y aplicación de una política industrial activa. En el primer caso, se argumenta que la existencia de fallas de mercado no es motivo suficiente para la intervención del Estado en la economía y que los gobiernos carecen de información y experiencia como para conducir apropiadamente una política industrial. En el segundo caso, se afirma que la búsqueda de rentas y la corrupción pueden generar políticas de protección a determinadas empresas, actividades o bienes cuya producción no es rentable, respondiendo a intereses privados. Por lo que mantener estas “fallas de gobierno” al mínimo es, de hecho, un gran desafío.

Para hacer frente a este desafío, se deben aplicar tres principios básicos de formulación de políticas industriales eficaces al diseñar e implementar políticas industriales (Altenburg et al., 2008; Rodrik, 2014):

1. **Vinculación.** Los formuladores de políticas deben estar estrechamente relacionados con el sector privado y otras partes interesadas para obtener una comprensión profunda de cómo funcionan los sectores económicos específicos, cuál es la lógica comercial de los actores

privados relevantes y dónde existen cuellos de botella que impiden las mejoras. Hasta qué punto es necesaria la intervención del gobierno y qué instrumentos son los más adecuados para superar las fallas del mercado depende de la brecha entre lo que lograrían los actores privados autoorganizados y los resultados óptimos en el interés público. Es probable que esto sea muy específico del contexto y que cambie con el tiempo. Por lo tanto, la política industrial debe concebirse como un proceso de descubrimiento colaborativo en el que actores públicos y privados interactúan estrechamente y negocian y adaptan continuamente sus contribuciones al desarrollo de la industria respectiva.

2. **Disciplina.** Obviamente, tal arraigo conlleva riesgos de colusión y captura por parte de intereses privados. Para minimizar estos riesgos, los gobiernos necesitan mantener plena autonomía en la toma de decisiones. Hacer y poder usar dispositivos disciplinarios contra el abuso (Evans, 1995). Los gobiernos deben trazar una línea clara entre la colaboración en el interés público y el favoritismo. Esto presupone objetivos claramente definidos que se desglosan en indicadores de desempeño medibles. Además, requiere rutinas de monitoreo y evaluación para verificar continuamente el desempeño de las empresas y los programas de apoyo en comparación con los puntos de referencia existentes. Los gobiernos deben tener la independencia para ajustar o incluso retirar los paquetes de incentivos sin ser presa de los cabilderos. La desagregación de los roles de formulación de políticas, financiamiento, implementación y evaluación puede ser útil para aislar tales sistemas basados en el desempeño contra la interferencia política. Poner a licitación la implementación, fomentar la competencia entre los proveedores de servicios y monitorear su desempeño a través de agencias independientes mejora aún más la efectividad. Las reglas claras y transparentes, así como las cláusulas de condicionalidad y extinción, también son útiles para mantener bajo control el comportamiento de búsqueda de rentas.
3. **Responsabilidad.** Los responsables de la formulación de políticas y los organismos de ejecución deben ser responsables de sus políticas industriales. Esto se puede lograr utilizando diversos requisitos de informes y obligaciones de divulgación, así como controles y balances democráticos más generales por parte de las autoridades centrales de auditoría, partidos políticos, tribunales independientes y una prensa libre. La

responsabilidad no solo sirve para prevenir la corrupción, el favoritismo y otras formas de comportamiento colusivo, sino que también ayuda a legitimar las políticas industriales apropiadas.

Tradicionalmente, la política industrial se ha centrado en la mejora de la productividad como el mecanismo clave que garantizaría los rendimientos crecientes del capital y el trabajo y, por lo tanto, permitiría el crecimiento económico y la prosperidad. Además de que los gobiernos generalmente ponen el crecimiento económico por encima de los objetivos ambientales, argumentando que parte de los ingresos generados pueden utilizarse para limpiar en una etapa posterior. Sin embargo, cada vez más, los objetivos de la política industrial se han ampliado. En la actualidad, la política industrial adopta medidas para influir en el cambio estructural para reducir las disparidades regionales, se alientan las industrias con gran densidad de mano de obra o las pequeñas empresas y/o la economía se vuelva ambientalmente más sostenible (Altenburg & Lütkenhorst, 2015). De igual manera, adicional a las políticas industriales citadas anteriormente, existen dos tipos de políticas que se relacionan directamente con la política industrial y que vinculan los aspectos ambiental y energético; estas son: la política verde y la política energética. Y de las cuales se hablará en las secciones siguientes.

3.1.1. La Política Industrial Verde

En la actualidad, la economía global se encuentra en un camino insostenible. Desde la revolución industrial, la economía mundial ha crecido a expensas del medio ambiente. Los recursos naturales se han explotado sin permitir que las poblaciones se regeneren, los contaminantes se hayan acumulado en la biosfera, los ecosistemas se hayan degradado gravemente y la biodiversidad se haya perdido a un ritmo alarmante. El calentamiento global es la amenaza más pronunciada para el desarrollo humano y el medio ambiente. El Panel Internacional sobre Cambio Climático predice que, si continuamos administrando nuestras economías de la misma manera, la temperatura media global de la superficie aumentará de 3.7 ° C a 4.8 ° C en 2100 en comparación con el promedio de 1850 a 1900 (IPCC, 2014). La fusión del hielo polar y la descongelación de los suelos del permafrost son dos aceleradores peligrosos del cambio ambiental global. Pero existen otras grandes amenazas para el Sistema Terrestre que requieren acciones urgentes, incluida la pérdida de biodiversidad, el agotamiento del ozono, la acidificación de los océanos, la escasez de agua, la

degradación del suelo, la acumulación de nitrógeno en los ecosistemas acuáticos y la acumulación de residuos químicos y plásticos (Rockström et al., 2009; WBGU, 2014). Estas amenazas fundamentales para la humanidad deben tenerse en cuenta al pensar en un mayor crecimiento y un cambio estructural de las economías. La forma en que se organizan actualmente las transacciones económicas ignora en gran medida el costo social del agotamiento de los recursos y la contaminación (Fay et al., 2015). Para contrarrestar estas amenazas, se han hecho esfuerzos para importantes para innovar tanto productos como procesos, con tal de aumentar la eficiencia de los recursos, es decir, una menor cantidad de recursos naturales es necesaria para producir la misma unidad de producción. Sin embargo, dicho aumento ha sido insuficiente, ya que el crecimiento del PIB a nivel mundial ha superado con creces el aumento de la eficiencia (Jackson, 2016; Wiedmann et al., 2015).

En esencia, el bienestar humano y el progreso económico deben estar desconectados del consumo de recursos no renovables y las emisiones (UNEP, 2011). Para que el desarrollo económico sea sostenible, la eficiencia de los recursos debe aumentar al menos al mismo ritmo que la producción económica. El mayor desafío es cómo lograr la pronunciada disminución de las emisiones de GEI necesarias para mantener el aumento de la temperatura global por debajo de 2°C. Para lograr esto, la intensidad global de carbono tendría que reducirse en un 6.3% cada año a 2100, mucho más rápido que la modesta disminución anual del 1.3% alcanzada entre 2000 y 2014 (PwC, 2015). Hasta ahora, ninguna de las principales economías ha podido lograrlo. Sin embargo, el "desacoplamiento absoluto" no es imposible. Los enormes avances en la eficiencia de los recursos son tecnológicamente factibles: con el cambio a las energías renovables, el uso de tecnologías de ahorro de energía y, por último, los cambios en el comportamiento del consumidor. La generación de electricidad necesita cambiar completamente de fuentes fósiles a renovables; a medida que la generación de energía se descarboniza, el transporte, la calefacción y otros sectores que utilizan energía deben ser electrificados, incluido el tráfico vial; y la eficiencia de los recursos debe incrementarse radicalmente en todas las industrias, incluido el cambio a economías circulares donde los desechos se reducen, reutilizan o reciclan (Fay et al. 2015). Algunos de estos cambios ya están en pleno desarrollo, otros aún están por venir. Los sistemas de energía global y todas las actividades relacionadas de fabricación y servicio relacionadas con la generación, transmisión y almacenamiento de energía ya están experimentando un cambio rápido y radical. Las tecnologías de energía renovable se han adoptado ampliamente en todo el mundo. La electricidad proveniente

de fuentes hidroeléctricas, geotérmicas y ciertas biomásas ahora puede competir con la electricidad basada en combustibles fósiles, al igual que la energía eólica y solar en buenas ubicaciones, y se esperan mayores reducciones de costos. Mientras que hace 15 años las instalaciones de energía de energía renovable desempeñaban un papel insignificante en la generación de electricidad global, el mundo ahora agrega más capacidad de energía renovable cada año que la capacidad neta de todos los combustibles fósiles combinados (IRENA, 2017). En los sistemas de energía, las nuevas tecnologías permiten el desarrollo de mini redes descentralizadas donde los clientes pueden responder de manera flexible a las señales de precios, suministrar energía o reducir la demanda cuando el precio en la red es alto y consumir energía cuando es bajo (Nathaney et al., 2016).

En resumen, el reconocimiento de los límites del sistema ambiental ya se ha convertido en un punto importante para el desarrollo económico. Los sistemas de incentivos están cambiando, todavía muy lentos desde una perspectiva ambiental, mientras se experimenta con una gran cantidad de productos y procesos. No obstante, para acelerar las innovaciones tecnológicas y de modelo de negocio requeridas, los incentivos económicos deben establecerse de manera muy diferente. Sobre todo, los costos ambientales deben reflejarse mucho mejor en los precios, las regulaciones deben ser más estrictas y los subsidios para los combustibles fósiles y otros bienes y prácticas insostenibles deben ser eliminados (Altenburg & Assmann, 2017). Es aquí donde entran en juego la política industrial verde.

Como se mencionó en la sección anterior, la política industrial consiste en anticipar las tendencias relevantes a largo plazo de la tecnología y el desarrollo del mercado y ofrecer incentivos para adaptar la estructura de una economía nacional de manera que pueda aprovechar el cambio. Como la mitigación del cambio climático y otros desafíos ambientales, antes citados, influyen cada vez más en la dirección futura del desarrollo económico, las consideraciones ambientales deben convertirse en una parte clave de la formulación de políticas industriales. De esto se trata la política industrial verde (Hallegatte et al., 2013; Lütkenhorst et al., 2014; A. Pegels, 2014; World Bank, 2012). Los límites entre la política industrial verde y la política ambiental no están bien definidos. Las políticas medioambientales tienen como objetivo proteger y utilizar de forma sostenible nuestro entorno natural. Intencionalmente o no, algunas de estas políticas impulsan algún cambio estructural. Por ejemplo, los precios del carbono cambian las inversiones de combustibles fósiles a energías renovables (S. Evans, 2018; Foster et al., 2017); los ambiciosos estándares de emisiones de automóviles aceleran la sustitución del combustible tradicional por vehículos eléctricos que a

su vez requieren diferentes tipos de industrias proveedoras (Teng et al., 2015)(McKinsey & Company, 2011); las reformas fiscales ambientales que imponen impuestos al consumo ambiental en lugar de a la mano de obra pueden reducir la competitividad internacional de las industrias intensivas en recursos y hacer que las actividades intensivas en mano de obra sean más competitivas (Pearce, 1991). Otras políticas ambientales inducen principalmente innovaciones en los procesos y, por lo tanto, tienen poco efecto en el cambio estructural, como las nuevas actualizaciones de la tecnología de control de la contaminación en las industrias existentes. Las políticas ambientales y energéticas que empujan deliberadamente el cambio estructural en la dirección deseada se consideran parte de la política industrial verde. Al igual que las políticas que mejoran los beneficios nacionales de la transformación verde en términos de mayores ingresos y mejores oportunidades de empleo (Altenburg & Assmann, 2017). Derivado de lo anterior, se puede definir a la **política industrial verde** como: *la inclusión de cualquier medida gubernamental dirigida a acelerar la transformación estructural hacia una economía de baja en carbono y eficiente en el uso de recursos de manera que también permita mejoras de productividad en la economía.*

Al igual que en la política industrial convencional, el cambio a nuevas industrias verdes requiere apoyo público y, por lo tanto, necesita encontrar formas de lidiar con los "perdedores" y suavizar la adaptación de las empresas y la fuerza laboral (Fay et al., 2015), con tal de generar un mayor valor agregado y una mayor productividad. Esta es la razón por la que los investigadores y profesionales interesados en la transformación verde pueden aprender muchas lecciones de las discusiones conceptuales sobre la política industrial y sus éxitos y fracasos de implementación. Sin embargo, la política industrial verde va más allá de la noción tradicional de políticas industriales en al menos seis formas importantes (Lütkenhorst, W., Altenburg, T., Pegels, A., & Vidican, 2014):

1. El enfoque en las externalidades ambientales como una falla de mercado adicional y particularmente dañina.
2. Una distinción clara y predecible entre tecnologías "buenas" y "malas", según sus impactos ambientales y, por lo tanto, la dirección sistemática del comportamiento de inversión en una dirección acordada socialmente.

3. La urgencia de lograr un cambio estructural en un corto período de tiempo, para evitar el riesgo de catastróficos puntos de inflexión ambiental.
4. Mayor incertidumbre debida a los horizontes a largo plazo de algunas transformaciones, así como la dependencia de los cambios de política.
5. Interfaces de políticas adicionales y, por lo tanto, la necesidad de una coordinación de políticas que abarque particularmente.
6. Una motivación para administrar los bienes comunes globales, como la atmósfera y los océanos, para la sostenibilidad a largo plazo, que puede no estar siempre alineada con los intereses nacionales inmediatos.

Finalmente, las políticas industriales verdes bien diseñadas son cruciales, no solo para que el desarrollo económico regrese al espacio operativo seguro para la humanidad, sino que también pueden servir como un programa de inversión para ganancias de productividad a largo plazo.

En conclusión, los gobiernos necesitan avanzar en el cambio estructural hacia una mayor productividad, al mismo tiempo que disocian el bienestar humano y el progreso económico del consumo de recursos y las emisiones. Esto implica la necesidad de integrar mejor las políticas industriales y medioambientales: repensar las primeras desde una perspectiva ambiental y explorar cómo éstas pueden lograr un mejor equilibrio entre los objetivos ambientales y el desarrollo industrial, contribuyendo así a una mayor competitividad.

3.2 La Política Energética.

La energía literalmente potencia el desarrollo económico. Por lo tanto, la política energética debe considerarse como una piedra angular de cualquier política industrial, independientemente de los objetivos específicos, el enfoque y la implementación de esta última. La política energética implica intervenciones en los sectores del carbón, la electricidad, el petróleo y el gas, así como la energía nuclear y renovable, y las actividades dirigidas a mejorar la eficiencia energética en el suministro y el consumo (Mcgowan, 1996). El intento de definir la política energética de una manera más precisa enfrenta todos los problemas asociados con la definición de una política. Una distinción simple pero útil puede ser entre la política oficial de energía y las políticas no oficiales que afectan al sector energético (Mcgowan, 1996). Lo primero puede definirse como una estrategia, claramente

elaborada y formulada explícitamente por el gobierno, para gobernar el balance energético actual y futuro (en este contexto se incluyen tanto las decisiones adoptadas para la gestión de la oferta de energía como las adoptadas para la gestión de la demanda de energía). En muchos casos, esto implica un compromiso con una serie de opciones específicas de inversión y tecnología, y la realización de una coordinación de las actividades de diferentes sectores productores de energía. El último involucra todas aquellas políticas que los gobiernos adoptan por un conjunto de razones completamente diferentes, pero que influyen en los sectores de energía, las empresas que operan dentro de ellos y el balance energético, tanto intencional como accidentalmente (Prontera, 2009). A través de su impacto en la disponibilidad de energía en general, y de medidas más específicas dirigidas a la promoción de diferentes fuentes de energía y sus precios relativos, la política energética tiene una fuerte influencia en la competitividad de la economía, el empleo, los patrones de diversificación sectorial, la posición comercial y la trayectoria tecnológica a largo plazo. Este siempre ha sido el caso. Sin embargo, se aplica de manera aún más poderosa en un escenario de escasez de recursos materiales globales y cambio climático que juntos requieren un replanteamiento radical de la manera en que la energía se ha generado, distribuido y consumido hasta el momento. Mientras que las nociones y los conceptos de una Tercera, Nueva o Próxima Revolución Industrial están proliferando actualmente en varias manifestaciones (Andersen, 2012; Dosi & Galambos, 2013; Marsh, 2012), es evidente que una transición a largo plazo hacia un escenario energético descarbonizado debe ser parte integral de la construcción de un futuro sostenible. Al mismo tiempo, la política energética se diseña y aplica invariablemente dentro de un verdadero campo minado de partes interesadas, intereses, conflictos y alianzas. Requiere una perspectiva de planificación a largo plazo y una visión holística de los desafíos y escenarios políticos, sociales, económicos y tecnológicos (IISD, 2014).

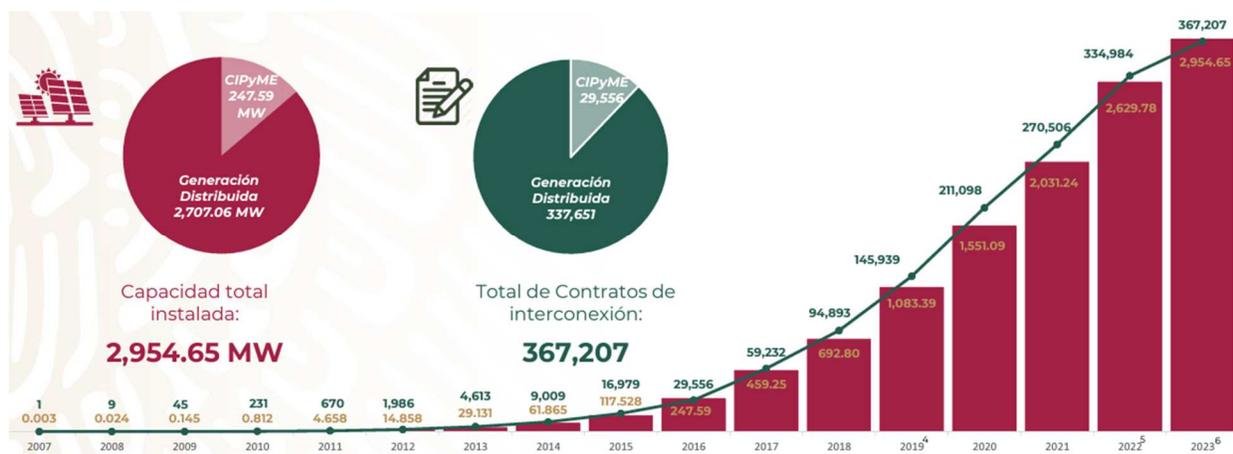
En resumen, la política energética determina fundamentalmente la infraestructura básica futura de un país para las próximas décadas y, por lo tanto, crea un fuerte bloqueo en los efectos y la dependencia del camino. Es un campo de la política económica que no se presta a frecuentes cambios y reorientaciones, a menos que las grandes inversiones se conviertan en activos varados y perdidos.

3.2.1 La Generación Distribuida como política energética para el desarrollo de la industria fotovoltaica en México.

La Generación Distribuida (GD) está definida en la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) como: la generación de energía eléctrica realizada por un propietario de una o varias centrales eléctricas con una generación menor a 0.5 MW (generador exento), la cual debe realizarse en una central eléctrica que se encuentre interconectada a un circuito de distribución y que dentro de sus actividades se encuentran la venta de excedentes y la compra de faltantes que resulten de su operación. Además de que para la operación de dicha central no se requiere de permiso de generación, expedido por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), como sucede con las centrales con capacidad mayor a 0.5 MW y el cual requiere de trámites y estudios adicionales (DOF, 2014)(DOF, 2014c). Sin embargo, para la instalación de un central de GD se requiere hacer la solicitud ante la CRE y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) mediante un *contrato de interconexión* (DOF, 2016b). Así mismo, la Ley de Transición Energética define a la GD como Generación Limpia Distribuida (GLD) siendo aquella que cumple lo indicado en la LIE y que además se realiza a partir de energías limpias, como es el caso de la energía fotovoltaica (DOF, 2015).

En años recientes la GD ha tenido un crecimiento muy dinámico, alcanzando al primer semestre de 2023 una capacidad instalada de 2,954.65 MW a través de la expedición de 367,207 contratos, como se muestra en la Figura 22.

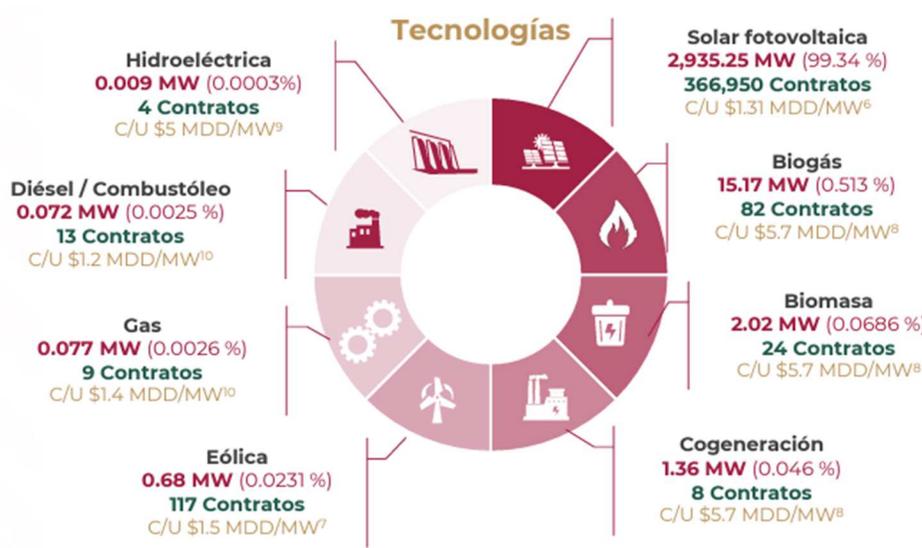
Figura 22. Evolución de la Generación Distribuida en México al primer semestre de 2023.



Fuente: (CRE, 2023).

De dicha capacidad, la energía solar fotovoltaica es la dominante con un 99%, seguida por la generación con biomasa y biogás con un 0.5% y 0.1% respectivamente (Figura 23).

Figura 23. Participación de las diferentes tecnologías de Generación Distribuida en México al primer semestre de 2023.



Fuente: (CRE, 2023).

En línea con esta tendencia, en un estudio proyectivo sobre la transición hacia un sector eléctrico bajo en carbono (Grande-Acosta & Islas-Samperio, 2017), estiman una capacidad instalada de GD de 17,744 MW hacia el año 2035, con participaciones del 3.7% del sector residencial, 28.3% del sector público y 68% del sector industrial. Lo cual es coincidente con estimaciones realizadas por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) y por Bloomberg New Energy Finance, en conjunto con la Secretaría de Energía (SENER) y la CRE, donde estiman que México tiene el potencial para instalar entre 11,300 y 19,780 MW hacia el año 2030 en sistemas solares fotovoltaicos en generación distribuida (SENER, 2016). Por su parte, la CRE (2017) estima que la GD podría alcanzar una capacidad instalada cercana a los 2.9 GW hacia el año 2023, cifra que, previo a la reforma energética, se esperaba alcanzar hasta el año 2028. De acuerdo con análisis efectuado por la SENER, el instalar SFV en un equivalente al 1% del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) generaría ahorros al Estado de alrededor de 1,500 millones de pesos anuales, la reducción en el consumo de 680 millones de litros de agua y la disminución de 1.3 millones de toneladas carbono equivalente (MtCO₂). Este análisis concluye que la transición hacia

la GD requiere de nuevas políticas públicas que impulsen mecanismos de apoyo y/o estímulos que fomenten la inversión para distribuir de manera justa los beneficios de la GD entre el Estado y los usuarios (SENER, 2017b).

3.2.2 Promoción de la Generación Distribuida en México.

Como resultado de la Reforma Energética, la GD en México ha visto la creación de un nuevo marco normativo que fomenta el despliegue de esta opción de generación. A través de este nuevo marco normativo, el actual modelo del sector energético brinda la oportunidad para el desarrollo de la GD.

En este sentido, la LIE atribuye a la CRE la facultad para expedir normas, directivas y demás disposiciones administrativas en materia de Redes Eléctricas Inteligentes (REI) y GD, atendiendo a la política establecida por la SENER, la cual además fomentará el otorgamiento de créditos y la creación de esquemas de financiamiento para este tipo de generación. De igual forma, establece la garantía de acceso abierto y no indebidamente discriminatorio de las Redes Generales de Distribución (RGD) y a los Mercados para que la GD pueda vender su generación. En materia de planificación, esta Ley contempla la inclusión en los programas correspondientes de la expansión y modernización de las RGD que se requieran para interconectar la GD, además de promover la simplificación de los procedimientos y los trámites de interconexión para los proyectos de GD, apoyando el desarrollo de este modo de generación en donde aporte mayores beneficios al sistema. Así mismo, la LTE mandata proponer a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) mecanismos de apoyo, estímulos fiscales o financieros que permitan promover inversiones en medidas técnicas y económicamente viables en materia de GD.

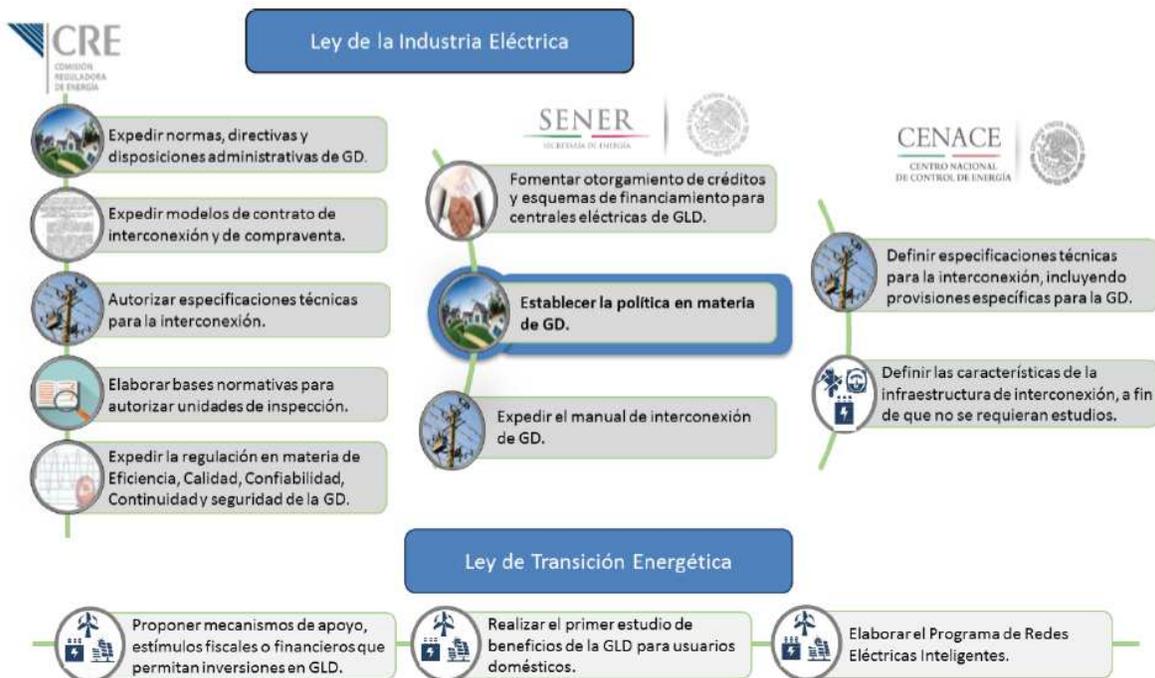
Dentro de este marco normativo se incluye la elaboración del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), el cual se actualiza anualmente y en su más reciente versión, PRODESEN 2019 – 2033, en relación con la GD, indica lo siguiente (SENER, 2019a):

- Se deben incorporar mecanismos para conocer la opinión de los Participantes del Mercado y de los interesados en desarrollar proyectos de infraestructura eléctrica, y considerar la expansión y modernización de las Redes Generales de Distribución que se requieran para interconectar la Generación Distribuida.

- Menciona los apoyos a la GD mediante programas como el Programa de Apoyo a la Generación Distribuida, operado por el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) con recursos del Fondo para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (FOTOASE), ofrece apoyo para la instalación de sistemas fotovoltaicos y cogeneración. El programa está dirigido a usuarios con tarifa Doméstica de Alto Consumo (DAC) y a Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (MiPyMES) y considera un incentivo directo del 10.0% del costo del sistema y financiamiento del 90.0% restante a tasas preferenciales. El Programa de Riesgo Compartido (FIRCO) otorga hasta el 50.0% del valor de los proyectos de generación en el sector agropecuario (sin rebasar el millón de pesos) para la instalación de proyectos fotovoltaicos interconectados a la red. Y el Programa de Mejoramiento Integral Sustentable en Vivienda Existente, operado por el FIDE con recursos del FOTEASE, apoya a familias de bajos ingresos en la instalación de ecotecnologías que incluyen sistemas fotovoltaicos.
- Considera el despliegue de las Redes Eléctricas Inteligentes (REI), el cual debe contribuir a mejorar la eficiencia, confiabilidad, calidad y seguridad del SEN con la incorporación de tecnologías avanzadas de medición, monitoreo, comunicación y operación, entre otras, que facilite el acceso abierto y no indebidamente discriminatorio a la Red Nacional de Transmisión (RNT) y a las Redes Generales de Distribución (RGD), así como permitir la integración de las fuentes de energías limpias y renovables. Además, el Programa de REI deberá identificar, evaluar, diseñar, establecer e instrumentar estrategias, acciones y proyectos en materia de redes eléctricas, entre las que se encuentra el desarrollo e integración de proyectos de Generación Distribuida, incluidos los de generación a partir de fuentes de Energía Renovables.
- Establece que al mes de enero de 2019 la capacidad de alojamiento total acumulada en los 11,338 circuitos en operación a nivel nacional es de 28 GW. Dicha capacidad es única para cada circuito de acuerdo con criterios operativos y debe revisarse periódicamente. Para determinar la necesidad de refuerzos en las RGD para la interconexión de futuras centrales de generación distribuida se requiere conocer con precisión la ubicación, magnitud y tipo de generación que podría interconectarse a las RGD en el futuro a fin de evitar inversiones innecesarias que incrementarían el costo de la tarifa de distribución.

De acuerdo con todo lo anterior, en la Figura 24 se presenta un resumen de las principales atribuciones creadas bajo el nuevo marco normativo, agrupadas en las respectivas instituciones gubernamentales responsables de llevarlas a cabo.

Figura 24. Atribuciones de los actores públicos de acuerdo con el nuevo marco normativo de la Reforma Energética en materia de electricidad.



Fuente: (SENER, 2018)

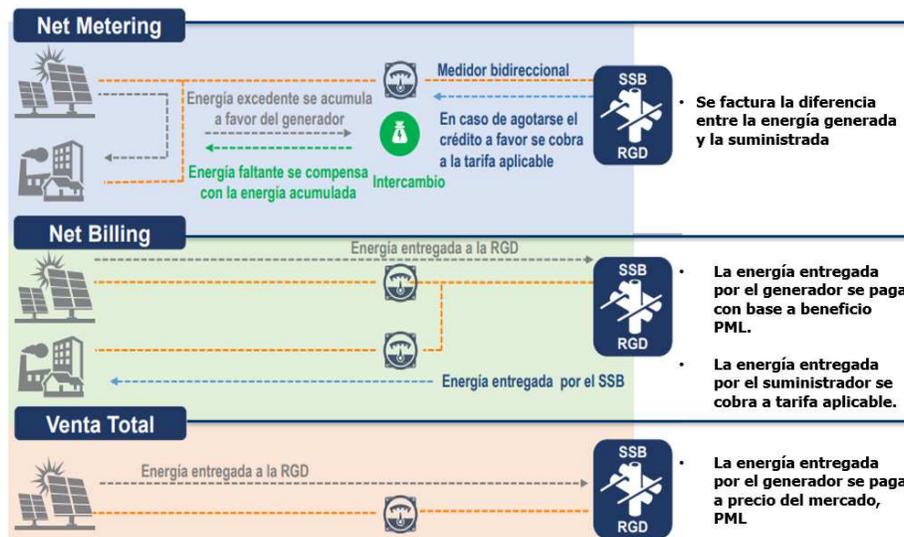
Otro de los mecanismos para la promoción de la GD en México, son los *esquemas de contraprestación*, publicados por la CRE en las Disposiciones Administrativas de Carácter General en materia de GD. Este documento tiene como objetivos establecer los lineamientos generales en materia de GD; definir el modelo de Contrato de Interconexión; establecer las especificaciones técnicas generales relacionadas con la GD; autorizar el modelo de Contrato de Compensación y desarrollar la metodología de Contraprestación (DOF, 2017). Las Disposiciones incluyen nuevas obligaciones y consideraciones, como el derecho al acceso a los mercados para la venta de energía, el pago de créditos vencidos, entre otros. Dichas disposiciones establecen tres mecanismos de compensación con sus respectivos pagos por excedentes o inyecciones a la RGD:

- a) Medición neta de energía (net metering): considera solamente el intercambio de energía en un periodo de facturación, calculando como la diferencia entre la energía total entregada por el Suministrador de Servicios Básicos (SSB) y la energía total generada por el sistema de GD entregada a la RGD. Cuando dicha diferencia es negativa, se considera como un crédito a favor del generador, el cual será abonado en el próximo periodo de facturación hasta por un máximo de 12 meses. Una vez concluido este periodo, se liquida al generador el crédito vencido al valor promedio del Precio Marginal Local³ (PML) durante el intervalo de tiempo en el que se generó el crédito, calculando en el nodo correspondiente al punto de interconexión.
- b) Facturación neta (net billing): la energía consumida se liquida al valor de la tarifa final contratada y la energía alimentada a la red es pagada al generador al PML horario calculado en el nodo correspondiente al punto de interconexión.
- c) Venta total de energía: ocurre en el caso donde no existe un contrato de suministro eléctrico. El total de la generación es inyectada a la red y pagada al PML horario calculado en el nodo correspondiente al punto de interconexión.

La Figura 25 muestra, en resumen, los esquemas de contraprestación antes citados.

³ El Precio Marginal Local (PML) se define como el precio de la energía eléctrica en un Nodo P determinado del Sistema Eléctrico Nacional. Los Precios en Nodos Distribuidos (PND) se definen como los precios medios ponderados en cada Zona de Carga. Para cada hora del Día de Operación correspondiente y para cada Nodo P, el CENACE calcula los PML y los PND del Mercado del Día en Adelanto (MDA) y del Mercado de Tiempo Real (MTR) y sus componentes: energía, congestión y pérdidas. Actualmente el cálculo de los precios del MTR se realiza a partir de simulaciones *ex post*, con base en la demanda y disponibilidad de generación observadas en tiempo real (CENACE, 2020).

Figura 25. Esquemas de contraprestación para la GD.



Fuente: (Madrigal-Martínez, 2017)

Por otro lado, la LIE, en su artículo 46, establece que, si un tercero desea vender energía eléctrica a un usuario final, este intercambio no será considerado como comercialización, siempre y cuando se genere mediante GD dentro de las instalaciones del usuario final. Con lo establecido en dicho artículo se abre la posibilidad a que exista n mercado de arrendamiento de SFV y nuevos esquemas de financiamiento.

Finalmente, considerando todo lo anterior, la SENER una serie de directrices para promover la GD en México, siendo estas directrices generales las siguientes:

- i. Las disposiciones en materia de GD priorizarán las acciones contenidas en los instrumentos de planeación de política energética nacional, con una visión de corto, mediano y largo plazo.
- ii. El desarrollo de la GD se realizará mediante distintas tecnologías, promoviendo de manera especial el uso de energía limpia.
- iii. El crecimiento de la GD deberá contribuir a la democratización de la generación de la energía eléctrica y al acceso universal al servicio eléctrico.
- iv. La GD deberá contribuir con el cumplimiento de las metas de energías limpias, establecidas en la LTE, así como con las metas de reducción de emisiones de GEI, establecidas en la política nacional de cambio climático.

- v. El fomento de la GD incidirá positivamente en el desarrollo de la cadena de valor y de las capacidades nacionales, así como en la calidad y el cumplimiento con estándares reconocidos a nivel nacional e internacional.
- vi. La planeación del SEN deberá establecer condiciones propicias para el desarrollo de la GD.
- vii. Las normas, directivas y demás disposiciones administrativas, que se emitan deberán dar certidumbre y viabilidad para el desarrollo de la GD.
- viii. Se deberá fomentar un vínculo entre la academia y el sector privado para promover la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en materia de GD.

Así mismo, las instituciones públicas relacionadas con el sector eléctrico en coordinación con las empresas productivas del estado, el sector privado, la academia, y la sociedad, promoverán las siguientes acciones como parte la política pública para el desarrollo de la GD, entre las que destacan:

En el corto plazo:

- Desarrollar una metodología para evaluar la capacidad de alojamiento, así como los costos y beneficios de la interconexión de la GD a las RGD. Apoyándose en institutos de investigación a nivel nacional e internacional.
- Promover el diseño y evaluación de mecanismos que permitan distribuir entre los diferentes actores de la industria eléctrica los costos y beneficios asociados a la penetración de la GD en el SEN.
- Identificar y promover esquemas para proyectos de GD que permitan superar las barreras de tipo financiero que inhiben su desarrollo.
- Promover el desarrollo de estándares de competencia laboral para tecnologías de GD, así como los mecanismos para su aplicación y exigibilidad.
- Homologación de los requisitos mínimos de equipos, personas y empresas para participar como proveedores de tecnologías y servicios para la GD en los programas públicos de apoyo e incentivos.
- Desarrollar y promover proyectos para reasignar el subsidio de las tarifas eléctricas hacia la GD, como mecanismo para la optimización de recursos públicos, en beneficio del usuario final.

En el mediano y largo plazo:

- Promover la elaboración de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) aplicables a la GD.
- Coadyuvar en la identificación y desarrollo de las cadenas de asociadas a las diferentes tecnologías de GD.
- Impulsar el desarrollo y acreditación de laboratorios de pruebas aplicables a productos y tecnologías utilizados en GD.
- Analizar y promover en su caso el incremento de umbral de 500 kW para la GD.
- Analizar y promover el desarrollo de la GD mediante un esquema de contraprestaciones y tarifas horarias.
- Incorporar sistemas avanzados de gestión de distribución (ADMS, por sus siglas en inglés) o sistemas de gestión de recursos distribuidos de energía (DERMS, por sus siglas en inglés), para la incorporación en la gestión de las RGD todos los recursos de energía distribuida.

Como se puede observar, la propuesta del desarrollo e integración de un cadena de valor de la industria fotovoltaica en México del presente estudio, está en línea con la política de fomento y de la generación distribuida en México, por lo cual, el desarrollo de este tipo de generación en el país es considerada para el desarrollo de este estudio.

3.3 Políticas Públicas para el desarrollo de la Industria Fotovoltaica: Experiencia Internacional.

En años recientes, varios han sido los países que han establecido diversas políticas para apoyar directamente el desarrollo y la implementación de tecnologías para la generación de energía mediante el aprovechamiento de los recursos renovables con el objetivo de abordar problemas como el suministro de energía, la seguridad energética, la sostenibilidad y la adaptación o mitigación ante el cambio climático. Tales políticas, además de proponer la disminución en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero, proponen aumentar la independencia energética al diversificar las fuentes de energía, atraer inversiones, impulsar el despliegue, fomentar la innovación y alentar una mayor flexibilidad en la infraestructura energética que admite tecnologías habilitadoras como el almacenamiento de energía (IRENA, 2017).

Una amplia gama de políticas brindó apoyo directo e indirecto, orientado al desarrollo económico de toda la economía, la protección ambiental y la seguridad nacional. Los avances tecnológicos, la disminución de los costos y la creciente penetración de las energías renovables en muchos países también han seguido exigiendo que las políticas evolucionen para estimular el despliegue y la integración de las energías renovables con la mayor eficacia posible. Muchos países aprovecharon el impulso generado por el histórico Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) al comunicar sus primeras contribuciones determinadas a nivel nacional (INDCs).

A fines de 2016, se presentaron un total de 117 INDCs, en su mayoría de países que formalizaron los compromisos asumidos en sus contribuciones presentadas antes de la conferencia climática de París. De los 117 INDCs, 55 incluyeron objetivos para aumentar la energía renovable, mientras que 89 hicieron referencia a la energía renovable en general (IRENA, 2017).

A fines de 2016 en la 22ª Conferencia de las Partes (COP22) en Marrakech, Marruecos, más de 100 países se habían unido oficialmente al Acuerdo de París, formalizando sus compromisos con el desarrollo sostenible, a menudo a través de la descarbonización del sector energético (Caballero, 2016).

En la COP22, líderes de los 48 países en desarrollo que constituyen el Foro de Vulnerabilidad Climática (CVF), incluida la nación anfitriona de la COP22 en Marruecos, se comprometieron conjuntamente a trabajar para lograr el 100% de energía renovable en sus respectivas naciones (IRENA, 2017).

La política industrial verde, es uno de los instrumentos particularmente adecuados para lograr una transición radical y de largo plazo necesaria para mantener condiciones de vida aceptables para el futuro. Vincular la protección del medio ambiente a los objetivos tradicionales de la política industrial como la competitividad, la creación de empleos y la innovación como "beneficios complementarios", son objetivos determinantes en este tipo de políticas. Aunque en ocasiones, estos objetivos de política no siempre están en armonía, e incluso cuando lo están, los intereses creados pueden evitar el cambio requerido de actividades económicas contaminantes a limpias. No obstante, la sostenibilidad ambiental por sí sola no ha logrado convertirse en un motor de cambio estructural en la mayoría de los países. Sin embargo, la multiplicidad de objetivos también hace que la elaboración de políticas industriales verdes y la evaluación de su éxito sea un tema complejo.

Además de lo anterior, el sector energético es un excelente ejemplo de los desafíos que enfrenta la formulación de este tipo de políticas. La energía literalmente potencia el desarrollo económico. Por lo tanto, la política energética debe considerarse como la piedra angular de cualquier política industrial, independientemente de los objetivos específicos, el enfoque y la implementación de esta última. A través de su impacto en la disponibilidad de energía en general, y mediante medidas más específicas dirigidas a la promoción de diferentes fuentes de energía y sus precios relativos, la política energética tiene una fuerte influencia en la competitividad de la economía, el empleo, los patrones de diversificación sectorial, la posición comercial y la trayectoria tecnológica a largo plazo (Hake, et al., 2015). Como resultado, la política energética se diseña y aplica invariablemente dentro de un verdadero campo minado de partes interesadas, intereses, conflictos y alianzas. Requiere una perspectiva de planificación a largo plazo y una visión holística de los desafíos y escenarios políticos, sociales, económicos y tecnológicos. Por encima de todo, la política energética determina fundamentalmente la infraestructura básica futura de un país para las próximas décadas y, por lo tanto, crea fuertes efectos de bloqueo y dependencia de la trayectoria (Lecocq & Shalizi, 2014; Unruh, 2000). Es un campo de la política económica que no se presta frecuentemente a cambios y reorientaciones, solamente en aquellos casos en los que las grandes inversiones corran el riesgo de convertirse en activos perdidos y desaprovechados (Rozenberg et al., 2014).

En muchos sentidos, tanto la política industrial verde como la política energética implican un conjunto de objetivos ambiciosos y complejos, así como una evaluación tecnológica adicional y dimensiones de riesgo (Lütkenhorst, 2010; Morris et al., 2012). Los límites ambientales en términos de capacidades de absorción limitadas para emisiones y contaminación (relacionadas con la biodiversidad, la capa de ozono y el clima) y la escasez de recursos (relacionados con las materias primas, el agua y la energía) deben tenerse en cuenta. Esencialmente, esto amplía los horizontes temporales necesarios. en el que deben considerarse las acciones y sus consecuencias. También aumenta el perfil de riesgo de las decisiones de política que involucran compromisos de inversión masiva de fuentes públicas y privadas, definen una trayectoria de desarrollo y crean efectos de bloqueo para las generaciones venideras. Por lo tanto, hay un caso convincente para lograr un consenso social sobre la visión y dirección de desarrollo a largo plazo que se desea (Altenburg & Pegels, 2012).

En la presente sección, analizaremos aquellas políticas públicas que apoyan la implementación de la energía solar fotovoltaica, así como el desarrollo de su industria. Esto desde el punto de vista de las experiencias obtenidas en países como Alemania, China y Estados Unidos de América (EUS), con el objetivo de conocer las diferentes estrategias políticas implementadas.

3.3.1 Alemania.

En Alemania, los gobiernos a lo largo de los últimos 25 años han aceptado el cambio los sistemas de energía basados en combustibles fósiles hacia una mayor proporción de fuentes de energía renovables con el objetivo de alcanzar un futuro global más sostenible. Derivado de esto han presentado una política energética que apoya el desarrollo e integración de las energías renovables (Frondelet al., 2010; 2014). Se han proclamado objetivos ambiciosos en relación con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora de la eficiencia energética (BMW, 2014)(German Federal Government, 2012). Además se de iniciar el proceso de eliminación gradual de la energía nuclear en el corto plazo y la energía del carbón en el mediano plazo. Dicha política energética se conoce como el *Energiewende* (Transición Energética). A pesar de los altos riesgos inherentes a tal transición, Alemania ha asumido un papel pionero en la transformación de su sistema energético y, hoy en día, la *Energiewende* ha alcanzado un nivel que revela sus desafíos. El desarrollo de las políticas energéticas en Alemania se ha convertido así en un foco de observación global, y especialmente en la eficiencia y efectividad de sus instrumentos, en particular la Ley de Fuentes de Energía Renovable (*Erneuerbare-Energien-Gesetz* [EEG]) (Hake et al., 2015). Además, la compatibilidad con el sistema de comercio de emisiones de la Unión Europea (Lehmann & Gawel, 2013), la necesidad de integrar las energías renovables en un sistema eléctrico europeo (Lehmann & Gawel, 2013), o el diseño futuro del mercado de la electricidad (por ejemplo, el papel de los mercados de capacidad o la confiabilidad del suministro de electricidad) (Hake et al., 2015) se han convertido en tema de debate científico y político.

Cualquier discusión sobre la política de energías renovables de Alemania en general, y la política de energía solar fotovoltaica en particular, debe tener lugar dentro del escenario político general establecido por el anuncio a mediados de 2011 de una transición energética fundamental. Esto es cierto incluso a la luz de la adopción anterior de la EEG en el año 2000, que hasta la fecha (con varias enmiendas) sigue siendo la piedra angular de la política energética alemana.

En línea con lo anterior, Alemania apunta a lograr, en el largo plazo, un escenario de generación de energía bajo en carbono con objetivos muy ambiciosos. La participación de la energía nuclear en la generación de electricidad, que en años anteriores se ubicaba cerca del 30%, actualmente es de aproximadamente el 13% (ISE, 2017). Su eliminación completa está programada para completarse en 2022, en comparación con los planes anteriores para prolongar la vida útil de las plantas nucleares en un promedio de 12 años y hacer que funcionen más allá de 2030. Esto pone a Alemania en una posición singular, al ser la única gran economía industrial que abandona la opción nuclear. Como consecuencia, la presión para alcanzar los objetivos de expansión de energía renovable ha aumentado enormemente. Con su enmienda de 2012, la EEG prevé una participación de las energías renovables en el suministro eléctrico total del 50% para 2030 y del 80% para 2050. Un debate feroz sobre la viabilidad y los costos de alcanzar estos objetivos y sobre el papel relativo del carbón y de las tecnologías de gas ha estado activo desde entonces (IISD, 2014).

En lo que respecta a las políticas relacionadas con la energía fotovoltaica, desde 1991, se han implementado esquemas de apoyo gubernamental sistemático para instalaciones fotovoltaicas en Alemania. La Ley de Suministro de Electricidad (Electricity Feed-in Act [Stromeinspeisegesetz], 1991–1999/2000) fue la primera política que otorgó incentivos para la generación de electricidad renovable. La iniciativa de “1000 Techos Solares”, que se aplicó entre 1991 y 1995, fue el primer esquema de soporte específico para energía fotovoltaica, y fue seguida en 1999-2003 por la iniciativa de “100,000 Techos Solares”, que de manera similar proporcionó préstamos a bajas tasas de interés para instalaciones fotovoltaicas. Estos préstamos fueron otorgados por el banco estatal de desarrollo alemán (KfW, por sus siglas en alemán) (Grau et al., 2012).

En general, las políticas de promoción de electricidad renovable en Alemania se basan en el concepto de tarifas de suministro o Feed-in tariff (FiT, por sus siglas en inglés), cuyos elementos centrales se establecieron como parte del EEG en 2000, sufriendo modificaciones en 2004, 2009 y 2017 (Grau et al., 2012; Sternkopf, 2017).

La EEG se aplica a la generación de energía a partir de fuentes de energía renovables, entre ellas, la solar. A las tecnologías compatibles se les otorga una tarifa de suministro o un estímulo, con el objetivo de incentivar la demanda de las tecnologías renovables. Siendo este más alto, si la electricidad es producida por dispositivos fotovoltaicos. Estas tarifas se clasifican según la capacidad del sistema fotovoltaico (con umbrales de 30 kW, 100 kW y 1000 kW) y los tipos de instalación (instalaciones sobre techo o sobre el suelo). Las tarifas de suministro se pagan por un

periodo de 20 años. Sin embargo, dichas tarifas se han reducido aproximadamente en un 30% entre 2010 y 2017, esto como consecuencia de la disminución en los precios de los sistemas fotovoltaicos. Además, las tarifas de suministro para sistemas fotovoltaicos instalados sobre campos agrícolas, fue suspendida en julio de 2010 (Grau et al., 2012; Sternkopf, 2017).

En 2016 hubo tres diferentes modelos de FiT activos (IEA, 2016a):

- FiT clásico: los propietarios de sistemas pueden elegir este modelo para sistemas <100 kWp en edificios residenciales o no residenciales (FiT inferior), el FiT depende del tamaño del sistema. Todas las tarifas FiT están garantizadas por un período de operación de 20 años. Incluye una tasa de reducción adaptada mensual de la FiT, que depende de la capacidad fotovoltaica instalada anteriormente. A partir de 2017, las tasas de depresión mensual cambiarán ligeramente si las instalaciones en los últimos meses están por debajo de un promedio anual de 2,6 GW.
- Modelo de integración de mercado: este modelo se puede utilizar para sistemas en edificios residenciales o no residenciales (FiT inferior) de hasta 10 MWp. La electricidad se vende en el mercado, se paga una prima de suministro (calculada como la diferencia entre el precio promedio del mercado y el FiT correspondiente) al productor de electricidad en la parte superior.
- Licitaciones: Son llevadas a cabo para todos los sistemas que no coincidan con las limitaciones de los modelos de FiT (principalmente sistemas montados en tierra y sistemas > 10 MWp).

Con el objetivo de incentivar la oferta, Alemania decidió invertir en la industria fotovoltaica por razones ambientales y económicas. El mercado fotovoltaico alemán se desarrolló gracias a las sinergias resultantes del éxito de las políticas de impulso a la tecnología y de atracción del mercado (Yu, 2014). Alemania apoyó la industria fotovoltaica con una generosa financiación principalmente del gobierno federal alemán, la UE y los estados federados individuales. El banco de desarrollo alemán (KfW), de propiedad estatal, proporciona programas de estímulo al mercado a través de los siguientes programas de préstamos para inversiones en energía fotovoltaica (IEA, 2016a) (Grau et al., 2012).

- a) Préstamos para inversiones privadas en energía fotovoltaica (Erneuerbare Energien Standard);
- b) Préstamos para inversiones fotovoltaicas por parte de las comunidades y sus empresas (Kommunal investieren);
- c) Préstamos para inversión en la infraestructura de las comunidades para ahorro de energía y cambio a energías renovables (KfW — Kommunalkredit).
- d) Préstamos para impulsar la instalación de sistemas de almacenamiento estacionarios locales en conjunto con pequeños sistemas fotovoltaicos <30 kWp.

Lo anterior se complementa con diferentes programas de incentivos a la inversión que se pueden clasificar en tres grupos (Grau et al., 2012):

- Subvenciones/incentivos en efectivo (incluidos el Programa de Tareas Conjuntas y el Programa de Subsidios a la Inversión).
- Préstamos a interés reducido (a nivel nacional y estatal).
- Garantías públicas (a nivel estatal y estatal / federal combinado).

Las mismas condiciones se aplican a los inversores alemanes y extranjeros. El financiamiento es proporcionado por el gobierno federal alemán, la Unión Europea (UE) y los estados federales individuales de Alemania. La UE proporciona el marco legal y financiero para la financiación pública en todos los Estados miembros de la UE. Las industrias elegibles, las formas de inversión y los requisitos generales del programa se definen en cada programa de incentivos. Los criterios específicos dentro de cada programa determinan las tasas de incentivos de inversión individuales. Los niveles de incentivo más altos generalmente se ofrecen a las pequeñas y medianas empresas (PYMEs).

Con respecto al apoyo para investigación y desarrollo (I+D), se llevan a cabo en el marco del Sexto Programa de Investigación de Energía "*Investigación para un suministro de energía factible, ecológico y económico*", que entró en vigor en agosto de 2011. Con la responsabilidad del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU). La investigación y el desarrollo en diferentes aspectos de la energía fotovoltaica cuenta con el apoyo del BMU, así como del BMBF (Ministerio Federal de Educación e Investigación)

Las partes principales del programa son administradas por la agencia de financiamiento Project Management Jülich (PtJ) (IEA, 2016a).

En diciembre de 2014, BMWi lanzó una nueva licitación, que refleja los objetivos del sexto programa de investigación de energía. Con respecto a la energía fotovoltaica, la licitación se dirige a seis puntos focales que están todos conectados a la investigación aplicada:

- Tecnología de obleas de silicio,
- Tecnologías de capa fina, especialmente basadas en calcopiritas (CIS/CIGS),
- Control de calidad y tiempos de vida,
- Tecnología de sistemas tanto para la conexión a la red descentralizada como para los sistemas insulares,
- Conceptos alternativos de celdas solares,
- Temas transversales como Edificios Integrados con SFV (BIPV, por sus en inglés), reciclaje o investigación sobre el Impacto ecológico de los sistemas fotovoltaicos.

En 2016, el apoyo de BMWi para proyectos de I+D en energía fotovoltaica ascendió a aproximadamente 57.8 millones de euros compartidos por 366 proyectos en total. Ese año se contrataron 166 nuevas becas. El financiamiento para estos proyectos asciende a 116.6 millones de euros en total.

Entre 2013 y 2015, el BMBF financió proyectos fotovoltaicos en el marco del programa "*Investigación de materiales para la transición energética*" con el objetivo de apoyar la I+D a largo plazo, que es complementaria a la financiación de BMWi. A partir de septiembre de 2015, el BMBF relanzó su financiación relacionada con la energía bajo la iniciativa *Kopernikus*. Bajo este esquema se abordarán investigaciones cooperativas sobre cuatro temas centrales de la Energiewende: *almacenamiento de energía renovable en exceso, desarrollo de redes flexibles, adaptación de procesos industriales a la oferta de energía fluctuante y la interacción de energías convencionales y renovables*.

Para respaldar el impulso estimulado por la *Alianza de innovación en energía fotovoltaica* de 2010, se lanzó una nueva iniciativa conjunta de BMWi y BMBF en 2013. El objetivo de este programa de 3 años *I+D para la energía fotovoltaica* es apoyar las actividades de I+D, especialmente con la participación de la industria fotovoltaica alemana en los campos de:

- Operación económica de soluciones de sistemas fotovoltaicos conectados a la red y fuera de la red, incluida la gestión de la energía y los sistemas de almacenamiento.
- Conceptos de producción eficientes y rentables, incluida la introducción de nuevos materiales y sistemas de control de producción.
- Introducción de nuevos conceptos de módulos fotovoltaicos con un enfoque especial en la calidad, la fiabilidad y la vida útil.

Los 13 proyectos conjuntos en ejecución son financiados por los ministerios BMWi y BMBF con un presupuesto total de aproximadamente 50 millones de euros.

En resumen, el escenario de la política de energías renovables de Alemania se puede caracterizar como un modelo de suministro de energía seguro, limpio y asequible que excluye explícitamente la energía nuclear y se concentra en las fuentes de energía renovable para el año 2050. Con una combinación de un marco legal y político sólido, un financiamiento sostenido de un conjunto diversificado de instituciones de investigación y un énfasis en los incentivos de inversión basados en precios en lugar de en cuotas (Anna Pegels & Lütkenhorst, 2014).

3.3.2 China

La generación de energía solar fotovoltaica de China comenzó en la década de 1960, pero su enorme progreso comenzó a partir del año 2003 (Zhao et al., 2013). El primer apoyo político para promover el despliegue de energía solar fotovoltaica se implementó a través de programas de electrificación rural fuera de la red, el Programa *Brightness* en 1996 y el Programa de Electrificación Municipal (*Township Electrification Program*), implementado en 2002 (Ying et al., 2006). En 1998, la energía solar fotovoltaica fue incluida en el Directorio de Industrias, Productos y Tecnologías Clave para el Desarrollo Promovido por el País (*Directory of Key Development Industries, Products and Technologies Encouraged by the Country*). No obstante, la implementación seria de instrumentos de política para la promoción del despliegue de energía fotovoltaica comenzó con la entrada en vigor del Plan para el Desarrollo de Nuevas Industrias de Energía y Energías Renovables (*Plan for the Development of New energy and Renewable Energy Industry*), entre los años 2001 y 2005. Durante este período, el gobierno chino comenzó a transferir

su atención hacia políticas que consideren al lado de la demanda, con el objetivo de construir un mercado de energía solar fotovoltaica, al proponer una política para el suministro de energía. En 2005, promulgó la Ley de Energía Renovable de la República Popular China (*Renewable Energy Law of the People's Republic of China*) para acelerar el desarrollo de la energía solar. La ley propone cinco medidas importantes (Xie et al., 2012) (S. Zhang & He, 2013):

1. Objetivos nacionales para el desarrollo de energía renovable, lo que significa que el gobierno garantiza una cierta escala de mercado y es crucial para dirigir la inversión;
2. Una política de conexión y compra obligatoria, según la cual las compañías encargadas de la red deben firmar un acuerdo con los generadores de electricidad renovable en su jurisdicción para comprar toda la electricidad generada por los generadores y proporcionar servicios de conexión a la red;
3. Un precio de la electricidad en la red para renovables, similar a un sistema nacional de tarifas de suministro, que paga a los generadores de electricidad renovable una cantidad fija adicional por cada kWh de electricidad generada, por encima del precio mayorista de la electricidad generada por carbón desulfurado;
4. Mecanismo de costos compartidos: el costo de la generación de energía renovable y la conexión a la red se dividen entre las empresas de servicios públicos y los usuarios finales de electricidad, lo cual está respaldado por un recargo en las ventas de electricidad;
5. El Fondo especial para el desarrollo de energía renovable, que ofrece apoyo financiero adicional para actividades tales como investigación de ciencia y tecnología para renovables, establecimiento de estándares, proyectos piloto, utilización rural de renovables y evaluaciones de recursos renovables.

Además, el gobierno chino emitió varios proyectos nacionales para promover el desarrollo de la industria manufacturera y estimular la transferencia de tecnología. En 2003, el Ministerio de Ciencia y Tecnología y el Ministerio de Comercio publicaron el Directorio de Productos de Alta y Nueva Tecnología (*Directory of High and New Technology Products Encouraging Foreign Investments*) para promover el desarrollo de la industria manufacturera y estimular la transferencia de tecnología, fomentando la inversión extranjera en la fabricación de componentes para los SFV. En 2005, la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma emitió proyectos especiales sobre la industrialización de lingotes de silicio para la elaboración de componentes de alta eficiencia y bajo

costo para los SFV. Mientras tanto, el gobierno expresó su plan para mejorar las políticas de I+D, proyectos demostrativos, impuestos fiscales, precios de productos, mercadotecnia y ventas, impuestos a las importaciones y exportaciones para promover el desarrollo de productos solares fotovoltaicos (Zhi et al., 2014).

A partir de 2006, las políticas públicas prestaron mayor atención a promover la aplicación en el mercado de la generación de energía solar para promover el proceso de comercialización de la industria de la energía solar fotovoltaica mediante el uso de instrumentos de políticas, como fondos especiales para energías renovables, subsidios a las tarifas de alimentación y transacciones de cuotas. Impuesto sobre la renta preferencial para empresas de alta y nueva tecnología, ayuda financiera para aplicaciones fotovoltaicas, licitaciones de concesión, precios gubernamentales para las tarifas de alimentación de energía solar y proyectos de demostración. Estas políticas incluyen la aplicación de la Medida Administrativa Provisional sobre Precios y Participación en los Costos para la Generación de Energía de Energía Renovable (*Administrative Measure on Pricing and Cost Sharing for Renewable Energy Power Generation*) y el Método Tentativo de Gestión para el Fondo Especial de Desarrollo de Energía Renovable (*Tentative Management Method for Renewable Energy Development Special Fund*) en 2006, el Plan de Desarrollo de Energía Renovable a Mediano y Largo Plazo (*Medium and Long-term Renewable Energy Development Plan*) en 2007 y el 11° Plan Quinquenal de Desarrollo de Energías Renovables (*11th Five-year Plan of Renewable Energy Development*) en 2008. Un punto importante para considerar es que la amplia aplicación de la energía solar en Europa a partir del 2004 impactó de manera importante en dos aspectos de la política china de energía solar fotovoltaica. Por un lado, el enfoque cada vez mayor en el desarrollo de energía renovable estimuló la fabricación fotovoltaica china e impulsó al gobierno a apoyar el desarrollo de la industria con la exención de impuestos y el subsidio a la alta tecnología. Por otro lado, la práctica de políticas en estos países promovió el aprendizaje de políticas en China, como el experimento de inversión pública, arancel de suministro, etc. Estos dos aspectos convirtieron la política fotovoltaica china en una política orientada a la demanda del mercado (Yu, 2014; Zhi et al., 2014).

Durante el año 2009, con el fin de hacer que la industria fotovoltaica solar del país dejara de depender de los mercados extranjeros, en medio de las crecientes fricciones comerciales con EUA y la UE, el gobierno chino implementó medidas para impulsar su mercado solar interno e inició dos programas nacionales con subsidio a la energía solar: el Programa de Techo Subsidiado

(*Rooftop Subsidy Program*) y el Programa de Demostración *Golden Sun*. El primero, proporciona una subvención del 50% del precio de la oferta para el suministro de componentes críticos para un SFV, como inversores, módulos y baterías de almacenamiento de plomo ácido. Mientras que el segundo tenía como objetivo instalar más de 500 MW módulos fotovoltaicos y apoyar la demostración de tecnologías clave en la industria fotovoltaica. El programa proporciona el 50% del costo total para los sistemas interconectados a la red y el 70% del costo total para los sistemas fuera de la red. Para sistemas interconectados a la red, se recomienda el consumo en el sitio. El exceso de electricidad podría venderse a la empresa de servicios públicos de electricidad a la tarifa local de la generación por medio de carbón desulfurado. A partir de 2012, ambos programas han pasado por cuatro fases. Y bajo el Programa de Demostración *Golden Sun*, 455 proyectos en total han sido aprobados, con una capacidad total de 2872 MW. Estos dos programas de subsidios demuestran claramente la determinación de China de apoyar la adopción de la energía solar fotovoltaica (Grau et al., 2012; S. Zhang & He, 2013; Zhi et al., 2014).

Así mismo, entre 2009 y 2010, China llevo a cabo dos licitaciones públicas, agregando un total de 290 MW de capacidad instalada. Si bien los postores seleccionados debían completar la construcción de las plantas en 24 meses, tendrían el derecho exclusivo de operar la planta durante 25 años y suministrar energía a un precio establecido. Estos programas de incentivos gubernamentales llevaron a una ola de entusiasmo a nivel nacional por la energía solar fotovoltaica, y crearon un aumento en el mercado de energía solar fotovoltaica de China. Sin embargo, en esta etapa el creciente mercado de energía solar fotovoltaica solo fue considerado una fase experimental por el gobierno chino, y los proyectos fueron solo para fines de demostrativos (S. Zhang & He, 2013).

Finalmente, a partir del año 2011, la industria fotovoltaica se convirtió en la industria estratégica emergente en China. La Administración Nacional de Energía emitió el 12° Plan Quinquenal para el Desarrollo de Energías Renovables (*Twelfth Five-Year Plan for the Development of Renewable Energies*), proponiendo objetivos de desarrollo de la capacidad instalada de energía solar de hasta 21 millones de kW para 2015 y hasta 50 millones de kW para 2020. En 2012, la Administración Nacional de Energía emitió el 12° Plan Quinquenal para el Desarrollo de la Generación de Energía Solar (*Twelfth Five-Year' Plan for the Development of Solar Power Generation*), que fue el primer plan quinquenal específico para la generación de energía solar. En 2013, el Consejo de Estado emitió el 12° Plan Quinquenal de Desarrollo Energético (*Twelfth Five-Year Plan for Energy*

Development), proponiendo nuevamente el objetivo de generación de energía solar de 21 millones de kW para 2015, con un incremento promedio anual del 89,5%. Durante este período, la política de atracción de la demanda fue mejorada. En agosto de 2011, la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma emitió el Aviso sobre el perfeccionamiento de la política de tarifas de suministro para la generación de energía solar fotovoltaica, lo que determinó una Tarifa de Suministro de referencia para la generación de energía solar fotovoltaica unificada a nivel nacional. Aunque finalmente, la generación eléctrica a nivel nacional se dividió en tres áreas, basadas en el recurso solar, implementando una tarifa de suministro diferente para cada área (S. Zhang & He, 2013; Zhi et al., 2014). Además de lo anterior, en respuesta a la solicitud del gobierno para apoyar a la industria local de energía solar fotovoltaica, la State Grid Corporation of China, la mayor empresa eléctrica estatal de China, anunció que a partir del 1 de noviembre de 2012, proporcionará servicios de conexión gratuita para los productores de electricidad fotovoltaica distribuida que se encuentran cerca de los clientes y con capacidades instaladas de menos de 6 MW cada uno. Los servicios cubren asistencia tecnológica que incluye pruebas de equipos, desarrollo de planes de integración, entre otros. Este es un paso crucial para eliminar los obstáculos que han contenido el desarrollo de la industria solar de China. Anteriormente, el State Grid Corporation of China solo conectaba plantas de energía solar a gran escala, que se concentran principalmente en áreas occidentales con suficientes recursos de luz solar. El costo de conectar tantas plantas de electricidad distribuidas a la red es mucho mayor porque están dispersas en todas partes y son demasiado pequeñas para alcanzar la máxima eficiencia (Zhi et al., 2014).

En lo respecta al tema de I+D, el Ministerio de Ciencia y Tecnología emitió el 12° Plan Quinquenal Especial para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología de Generación de Energía Solar (*Twelfth Five-Year Special Plan for the Development of Solar Power Generation Science and Technology*), donde se propone: dominar los procesos y equipos clave para los materiales solares, dispositivos y tecnologías básicas; la construcción de los laboratorios nacionales clave y las bases de industrialización; optimizar el sistema de estándares técnicos y llevando a cabo proyectos de demostración de integración de sistemas. Posteriormente, China emitió varios estándares de tecnología, como el Código para la Construcción de Centrales de Generación de Energía Fotovoltaica, el Código para el Diseño de Centrales Eléctricas Fotovoltaicas, el Código para el Diseño de las Organizaciones de Construcción de Proyectos de Generación de Energía Fotovoltaica, el Código para la Operación y Mantenimiento de la Construcción de un Sistema

Fotovoltaico Montado y el Directorio de Estándares Industriales, para normalizar aún más el desarrollo tecnológico de la industria. Además, en 2011, el gobierno emitió el Proyecto de Financiamiento Cooperativo de China y Europa para la Conservación de la Energía y la Investigación Científica para la Reducción de Emisiones de Medianas y Pequeñas Empresas. El proyecto cubre 18 subproyectos en total y proporciona asistencia financiera gratuita para todos los proyectos sobre tecnologías relacionadas con la generación de energía distribuida y el almacenamiento de energía, como la generación de energía eólica y la generación de energía fotovoltaica en el ámbito de la I+D. El presupuesto central previsto es de 4.5 millones de dólares. En resumen, el gobierno chino ha sido muy cauteloso al implementar nuevas políticas de la industria fotovoltaica. El año 2004 es el hito más importante tanto para la industria fotovoltaica china como para la política fotovoltaica. Antes de 2004, el alto costo de la generación de energía solar fotovoltaica solo se utilizaba como la generación de energía fuera de la red en China. El factor más importante en 2004 que influyó en la industria y la política fotovoltaicas de China es la política promulgada en Alemania. La Ley de Energía (EEG), que estableció el mecanismo de tarifas de alimentación y estimuló el rápido crecimiento del mercado fotovoltaico en Europa. Mientras tanto, la práctica política en Alemania y en otros países europeos, por otro lado, promovió el desarrollo de la política fotovoltaica china, y se convirtió en el ejemplo que aprendió el gobierno chino. Como resultado, la prioridad de la política fotovoltaica china pasó de la política de energía renovable genérica relacionada y la política de fabricación de alta tecnología a la política específica de energía solar. La política del lado de la demanda comenzó a destacarse, como la licitación de concesiones, el Golden-Sun y los proyectos a gran escala. Los años de 2008 y 2009 son el período clave para la política fotovoltaica china. Debido a la crisis financiera en 2008 y al rápido aumento de la fabricación de energía solar en China, el gobierno se preocupó por la situación de la industria solar fotovoltaica y lanzó el proyecto de licitación de concesión. En 2009, el gobierno aumentó la escala de Financiamiento para el Desarrollo de Energía Renovable y organizó una cartera específica de desarrollo de energía solar. Este cambio habilitó los proyectos Golden Sun y a gran escala. Sin embargo, el gobierno encontró que estas políticas de subsidio a la inversión pública no eran eficientes para construir un mercado dinámico. Después de 2011, la política cambió para usar el proyecto de referencia FiT para reemplazar los proyectos de inversión pública y comenzó a promover la generación de energía fotovoltaica distribuida. La política orientada a la demanda del mercado comenzó a formarse. Por otro lado, limitada por el sistema de energía y las diferencias

locales, la política actual de FiT sigue siendo una política que combina el proyecto público y la evaluación comparativa de precios, que necesita continuar orientada hacia el mercado.

3.3.3 Estados Unidos de América

El uso escalable de la energía solar en los Estados Unidos comenzó en 2005, cuando se promulgó la Ley de Política Energética (*Energy Policy Act*) (Holt & Glover, 2006), aunque el interés en la industria fotovoltaica surgió ya en la Ley Nacional de Energía de 1978 a través de la Ley de Investigación, Desarrollo y Demostración de Energía Solar Fotovoltaica (Peters & Woolley, 1978). El presidente Obama firmó la Ley de Reinversión y Recuperación de los Estados Unidos de 2009 el 17 de febrero de 2009, que otorgó 43.4 mil millones de dólares para desarrollar energía limpia y eficiente, como elemento básico de las estrategias nacionales (ICF, 2009). La combinación de instrumentos de política que se siguió también fue sistemática, incluyendo Energía Solar Distribuida, Finanzas e Impuestos, Despliegue de Energía Renovable, etc. Los gobiernos federal y estatal utilizaron la combinación de políticas de varias maneras según las diferentes situaciones de cada estado, con diferencias considerables entre ellos.

Los Estados Unidos de América, emplea estándares de interconexión y medición neta. El Gobierno federal, a través de la Comisión Federal Reguladora de Energía (FERC, por sus siglas en inglés), tiene jurisdicción sobre la interconexión de proyectos solares de generación distribuida que involucran la venta de electricidad a una empresa de servicios públicos. En 2005, la FERC emitió estándares para procedimientos de interconexión de pequeños generadores aplicables a proyectos que generan 20 MW o menos (Chernyakhovskiy et al., 2016). La Ley de Derechos de Oportunidad Solar y Acceso Local (SOLAR, por sus siglas en inglés) (Cardoza, 2007) estableció el derecho de cada estadounidense a operar un sistema de energía solar en su propia propiedad. Ayudó a restringir las tarifas locales excesivas de permisos solares, y estableció los estándares nacionales de medición e interconexión de redes, los derechos de acceso a la energía solar y una autoridad de contratación de energía del gobierno por 30 años. En Estados Unidos, 42 estados han aceptado el esquema de Medición Neta.

El gobierno de los Estados Unidos apoya principalmente a los consumidores en forma de garantías de préstamos, créditos fiscales a la inversión, exenciones fiscales a los impuestos solares y financiamiento de terceros. El Programa de Tesorería 1603 es un mecanismo financiero neutral

desde el punto de vista tecnológico que permite a los desarrolladores de proyectos de energía renovable y solar recibir una subvención federal directa en lugar del Crédito Tributario para Inversiones (ITC). Con respecto a las exenciones fiscales, 38 estados ofrecen exenciones fiscales a la propiedad para las energías renovables. En Nevada, una de sus exenciones de impuestos a la propiedad de energía renovable permite a las empresas solicitar una reducción del impuesto a la propiedad de hasta el 55 por ciento por hasta 20 años para la propiedad real y personal que se utiliza para generar energía solar. Mientras tanto, hay 29 estados que ofrecen exenciones del impuesto sobre las ventas para las energías renovables (U.S. Department of Treasury, 2009). En los EUA, 21 gobiernos estatales otorgaron préstamos preferenciales durante un período máximo de 20 años, con un interés máximo del 7.5% por año. Finalmente, la financiación de terceros de la energía solar se produce principalmente a través de dos modelos en los Estados Unidos. Un cliente puede firmar un contrato de arrendamiento tradicional y pagar por el uso de un sistema solar o firmar un acuerdo de compra de energía (PPA) para pagar una tarifa específica por la electricidad que se genera cada mes. En 2011, se financiaron más sistemas solares residenciales en California a través de desarrolladores externos que a través de compras tradicionales en efectivo y el ochenta por ciento de las instalaciones solares residenciales en Colorado en los primeros meses de 2012 fueron financiadas por un modelo de terceros (CPUC, 2017).

Adicional a lo anterior, el gobierno de los EUA emitió estándares para las energías renovables y políticas de incentivos basados en el rendimiento. Más de la mitad de todos los estados de los EUA tienen algún tipo de estándar u objetivo de energía renovable. Por ejemplo, en Hawai es del 40% para 2030, y en California del 33% para 2020 (SEIA, 2018). Para el enfoque de incentivos basados en el desempeño, un ejemplo es la Iniciativa Solar de California (California Solar Initiative), donde los incentivos se pagan mensualmente durante un período de 5 años (60 pagos en total) basados en la energía real (kWh) producida por el sistema de energía solar (CSI, 2017).

Por el lado de la oferta, Estados Unidos enfatiza principalmente dos aspectos: fabricación y tecnología. Para respaldar la fabricación fotovoltaica, el gobierno de EUA emplea diversos instrumentos de políticas, entre los que se incluyen el crédito fiscal y la exención de impuestos, el apoyo financiero, así como la garantía de préstamo. La Ley de Reinversión y Recuperación Estadounidense de 2009 (ARRA) incluyó un crédito fiscal competitivo con un límite máximo de 2.3 mil millones en gastos fiscales totales para proyectos avanzados de fabricación de energía. 183 proyectos separados recibieron premios por un total de más de 8 mil millones de dólares. Mientras

que ARRA agotó el presupuesto y expiró en 2010, la Ley de Seguridad y Fabricación de Energía, promulgada en 2011, asignó 5 mil millones de dólares adicionales a los proyectos del Colaborativo del Tecnológico de Massachusetts (MTC, por sus siglas en inglés), poniendo más énfasis en la fabricación que en el montaje (Platzer, 2012). El Departamento de Energía de los EUA garantizó un préstamo de aproximadamente 13.3 mil millones de dólares para proyectos fotovoltaicos, incluidos 1.3 mil millones de dólares a fabricantes de productos fotovoltaicos (incluida la notoria Solyndra, quien anunció la quiebra a fines de 2011, con 535 millones de dólares en préstamos en mora) y los 12 mil millones de dólares restantes a proyectos de granjas solares. 16 proyectos fotovoltaicos se beneficiaron de esta garantía de préstamo, incluidos 4 proyectos de manufactura. Este proyecto tuvo como objetivo facilitar la fabricación avanzada, crear empleos y mejorar la competitividad de Estados Unidos dentro del segmento de energía renovable; Mientras tanto, el proyecto también abordó el problema de la garantía que la inversión privada no pudo resolver y mitigó la tecnología general y los riesgos de mercado de la industria fotovoltaica (China Global Trade, 2012). El gobierno del estado de California también promulgó una Exclusión de Impuestos sobre las Ventas y el Uso para el Transporte Avanzado y el Programa de Fabricación de Energía Alternativa, con un presupuesto de proyecto anual de 100 millones de dólares, proporcionando créditos fiscales y exenciones para las actividades de diseño, fabricación y ensamblaje en los segmentos de transporte avanzado y energía renovable. En el aspecto de la tecnología, para asegurar la competitividad de los costos de la energía fotovoltaica sobre la energía térmica tradicional cuando no hay subsidios, el Departamento de Energía de los Estados Unidos estableció Iniciativas que permitieron a los fabricantes avanzados formar y ampliar su capacidad. Este programa otorgó 1.1 mil millones en subsidios durante la primera fase (Zhi et al., 2014).

3.4 La transferencia tecnológica como política para el fomento de la industria fotovoltaica.

Cómo se mencionó anteriormente, el sistema fotovoltaico es la tecnología que se encarga de convertir la radiación solar en energía eléctrica, siendo el módulo fotovoltaico el dispositivo principal para llevar a cabo este proceso y donde el polisilicio y la celda fotovoltaica son los elementos centrales en un módulo fotovoltaico. El primero es la materia prima clave en la fabricación de obleas de silicio y celdas fotovoltaicas y el último determina directamente la eficiencia de conversión de los módulos fotovoltaicos (Sánchez-Juárez et al., 2017).

La fabricación de polisilicio y obleas silicio, es intensiva en tecnología, así como en capital (Basore, Chung, & Buonassisi, 2015) y el poder adquirir ventajas de costos absolutas (Weil, Schipper, & Francis, 2014) requiere de un dominio amplio de las tecnologías, lo que crea barreras para la integración de este eslabón. Siendo el principal motivo por el que su producción todavía está concentrada en un pequeño grupo de empresas y países (Fu et al., 2015).

Con respecto a las celdas y módulos fotovoltaicos, su fabricación es intensiva en mano de obra (dependiendo del grado de automatización del proceso) (Woodhouse et al., 2019), y la barrera es la economía de escala, ya que esta tiene que aprovecharse al máximo para reducir los costos (Alan Goodrich, Powell, James, Woodhouse, & Buonassisi, 2013). En estos eslabones, el punto de equilibrio (Weil et al., 2014) es más bajo que el de los otros eslabones, generando ganancias en un periodo de tiempo menor (Ng, 2011). Otro punto a favor de estos eslabones es que la inversión en las innovaciones tecnológicas y las mejoras en la eficiencia tecnológica puede evitarse. Sin embargo, la amplia variedad de productos similares en el mercado puede provocar una competencia de precios bajos y un exceso de capacidad, y donde la calidad del producto final juega un papel importante, dificultando la integración de estos eslabones (Zou et al., 2017).

Por lo que, la integración de la cadena de valor de la industria fotovoltaica implica ya sea el dominio o el conocimiento amplio de la tecnología.

En este aspecto, existen dos maneras de alcanzar el dominio o conocimiento tecnológico, mediante *investigación y desarrollo autofinanciada (auto I+D)* (Koga, 2005) o la *transferencia tecnológica*. Para las empresas con suficientes capacidades tecnológicas y financieras, la estrategia de auto I+D es una buena opción para crear sus propias innovaciones como patentes y procesos. Sin embargo, lleva tiempo, es costoso y arriesgado, ya que es imposible recuperar los esfuerzos en caso de falla

(Park & Lee, 2011). Mientras que la transferencia tecnológica puede ser una manera asequible de conocer y dominar la tecnología.

La transferencia de tecnología puede entenderse como un proceso de comunicación (Robinson, 1991) y cooperación (Heaton, Banks, & Ditz, 1994) a través de una colaboración activa y duradera entre las partes (know-who) para desarrollar las habilidades y los recursos (know-what) para utilizar, adaptar (know-how) y adoptar las tecnologías a las condiciones y objetivos contextuales específicos en los que se emplearán las tecnologías (know-why), fomentando la gestión de la tecnología a largo plazo (Lundvall & Borrás, 1997)(Carud, 1997). De esta manera, la transferencia tecnológica puede darse a través de varios mecanismos convencionales y no convencionales, incluido la venta de equipos, la inversión extranjera directa, proyectos conjuntos (joint-venture), acuerdos de licencia y patentes, cooperaciones en I+D, contratos llave en mano, así como por movilidad laboral. Los factores explicativos tradicionales que influyen en la transferencia de tecnología incluyen la brecha tecnológica entre el que transfiere la tecnología y el que la recibe, los ciclos de vida de los productos, la internalización, la relación entre las necesidades y los recursos y el mercado interno (F. Zhang & Gallagher, 2016) (J. Hsu & Chuang, 2014).

En este sentido, países asiáticos como China, Taiwán y Corea del Sur, han perfeccionado la aplicación de la transferencia tecnológica, la cual ha fluido en los últimos 30 años de países como EUA, Alemania y Japón; en sectores como la ingeniería pesada y la industria automotriz (Amsden & Chu, 2003); en las industrias de tecnología de la información, semiconductores y pantallas planas (J.-Y. Hsu, Poon, & Yeung, 2008) (K. Lee & Lim, 2001)(J. A. Mathews & Cho, 2000); y en la última década, en la industria fotovoltaica (Jia, Sun, & Koh, 2016)(Zhao et al., 2013)(John A. Mathews, Hu, & Wu, 2011) representando el último desafío industrial de estos países, que a partir de la transferencia tecnológica se han establecido como actores importantes en la industria fotovoltaica, no solo como productores, si no como inversionistas e incluso exportadores.

De acuerdo con lo expresado por (Hong, Zhou, Wu, Wang, & Marinova, 2019)(IRENA, 2019a) (Sandor, Fulton, Engel-Cox, Peck, & Peterson, 2018)(OMPI, 2017)(Zou et al., 2017)(Huang, Negro, Hekkert, & Bi, 2016)(Azmeah & Nadvi, 2014)(Hsu & Chuang, 2014)(Hu & Yeh, 2013) (Jiankun, Zhiwei, & Da, 2012) (Wu & Mathews, 2012) (John A. Mathews et al., 2011) (Park & Lee, 2011) (Hufbauer, G., Schott, J.J., Cimino, C., 2003) el dominio de dichos países asiáticos dentro de la industria fotovoltaica se puede resumir a través de las siguientes acciones:

- a) Identificar las industrias donde haya potencial de crecimiento y una tecnología dominante, que pueda producirse en masa y esté libre en gran medida de restricciones de propiedad intelectual.
- b) Asegurar el acceso a la tecnología para la manufactura a través de vínculos contractuales ya sea desde la concesión de licencias de tecnologías, la compra de equipos y fábricas llave en mano hasta la adquisición de pequeñas empresas ricas en tecnología.
- c) Integrar verticalmente la cadena de valor lo más rápido posible, lo que permite reducir los costos y contribuye a superar la escasez de materia prima y componentes críticos.
- d) Formar un grupo de empresas complementarias que provean equipos y materiales, que, combinada con una regla de contenido local, obliga a las empresas avanzadas a establecer relaciones más estrechas con sus proveedores y que a su vez permite la difusión de capacidades Sutton (2005). Así mismo, buscan promover la producción local de equipos lo más rápido posible, nuevamente para reducir los costos y promover complementariedades que puedan crecer en grupos.
- e) Impulsar la manufactura nacional a través de la promoción de una demanda interna y como un medio para establecer estándares exigentes que los fabricantes deberán cumplir.
- f) Buscar dar el salto para dejar de ser receptores de tecnología y pasar a ser transferentes de esta. Esto, a través de la innovación, con el apoyo de los institutos públicos de investigación o la academia como promotores colectivos del conocimiento patentado, compartiendo y difundiendo las patentes involucradas a la industria emergente e impulsando la adopción de capacidades tecnológicas a través de alianzas estratégicas entre las empresas locales y los actores existentes (inversionistas, banca de fomento, etc.), como canales para la difusión de tecnología.

Otros países, como Brasil (Hansen, Nygaard, Morris, & Robbins, 2020)(ITAPU, 2018) y Argentina (Castelao Caruana, 2019)(Costantini & Di Paola, 2019) ya han intentado aplicar de igual manera alguna de las estrategias mencionadas para el desarrollo de su industria fotovoltaica, sin tener éxito esperado. Mientras que países como India (O. Johnson, 2016), Egipto (MENA, 2015) o Irlanda (SEAI, 2017), se encuentran en el desarrollando las mismas y los resultados aún no se vislumbran.

México se encuentra entre los países que están intentado desarrollar una industria fotovoltaica nacional y cuenta con ciertas ventajas que puede aprovechar para impulsar dicho desarrollo; cuenta

con un marco establecido para definir el desarrollo de estrategias que impulsen el fomento industrial de cadenas productivas locales; cuenta con un mercado interno regulado; cuenta con una posición geográfica estratégica y 12 acuerdos comerciales que le dan acceso a 46 países y permiten la entrada de las exportaciones nacionales de mercancías con un mínimo de restricciones a futuros mercados potenciales de demanda, además de que la industria nacional está incluida en el grupo de naciones con fuerte participación en industrias de alta tecnología y altas exportaciones (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2017). Asimismo, los sectores llamados emergentes, cómo los que son intensivos tecnológicamente, representan otra ventaja para México, gracias a su inserción en la innovación tecnológica y la apertura a las inversiones. Éstos cuentan con alto potencial de crecimiento, además incorporan un fuerte componente de investigación, innovación y desarrollo en procesos, productos o servicios, así como nuevas aplicaciones tecnológicas. A pesar de que estas ramas de la manufactura se encuentran en desarrollo en el país, requieren de políticas que consoliden su estancia y desarrollo dentro del territorio mexicano (Valdez-Juárez, Solano-Rodríguez, & Martín, 2018)(Pérez Hernández, Lara Gómez, & Gómez Hernández, 2017)(Hernández Chavarria, 2017). Además de que el desarrollo de una industria fotovoltaica nacional y la integración de su cadena de valor puede resultar de interés para el estado mexicano, ya que puede contribuir a la seguridad energética.

Capítulo 4. Beneficios socio-económicos de la industria fotovoltaica.

Como hemos visto hasta ahora, la última década ha visto un aumento en el desarrollo a gran escala de la tecnología fotovoltaica. Los aspectos clave que han impulsado esta expansión han sido la seguridad energética, el cambio climático y el acceso a la energía (IRENA, 2019b)(European Commission, 2018)(Okioga et al., 2018). Dado que muchas economías se enfrentan a un bajo crecimiento, los beneficios socioeconómicos han ocupado un lugar destacado en el debate sobre la formulación de políticas y las decisiones estratégicas de los países (como se vio en la sección anterior). Además, muchos países ven una oportunidad en el desarrollo de un sector de energía renovable, con potencial para aumentar los ingresos, mejorar la balanza comercial, contribuir al desarrollo industrial y crear empleos (IEA, 2019)(IRENA, 2019). El último informe de IRENA sobre energías renovables y empleos, estima que los empleos relacionados con la energía fotovoltaica alcanzaron los 3.6 millones en 2018 (IRENA, 2019c).

En relación con lo anterior, es esencial comprender cómo se puede medir el valor económico del desarrollo de la tecnología fotovoltaica y dónde se puede crear valor dentro de los diferentes segmentos de la cadena de valor de la industria fotovoltaica.

Desde una perspectiva de desarrollo sostenible, el término creación de valor es más amplio que su definición económica tradicional. Abarca una amplia gama de efectos socioeconómicos, como la creación de empleo, la reducción de la pobreza o la reducción de los impactos ambientales negativos. De acuerdo con el Instituto de Sistemas Aplicados (IIASA, por sus siglas en inglés) Institute for Applied Systems, *“las energías renovables ofrecen ventajas en términos de apoyar todos los objetivos relacionados con el crecimiento económico, la seguridad energética, los beneficios ambientales locales y regionales, la salud y mitigación del cambio climático. Todas estas ventajas implican la creación de valor que debe incorporarse en la evaluación de diferentes opciones energéticas ”* (GEA, 2012).

Varios de los beneficios citados pueden ser difíciles de cuantificar y, por lo tanto, su análisis sigue siendo en gran medida cualitativo. Entre los que pueden cuantificarse, es posible que algunos no tengan las mismas unidades de medida y existe el riesgo de que se produzcan dobles recuentos o efectos superpuestos. Además, a los mismos efectos se les pueden asignar diferentes niveles de prioridad de acuerdo con los objetivos nacionales (IRENA, 2014) (Borbonus, 2017). Para evitar estos errores, el Instituto Fraunhofer ISI y el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación

de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania (BMU, por sus siglas en alemán) hicieron uno de los primeros intentos de formular estos conceptos desde una perspectiva de formulación de políticas, a través de un marco conceptual. En él, los efectos socioeconómicos del desarrollo de las energías renovables se dividen en cuatro categorías principales (BMU, 2013)(Fraunhofer ISI, 2012):

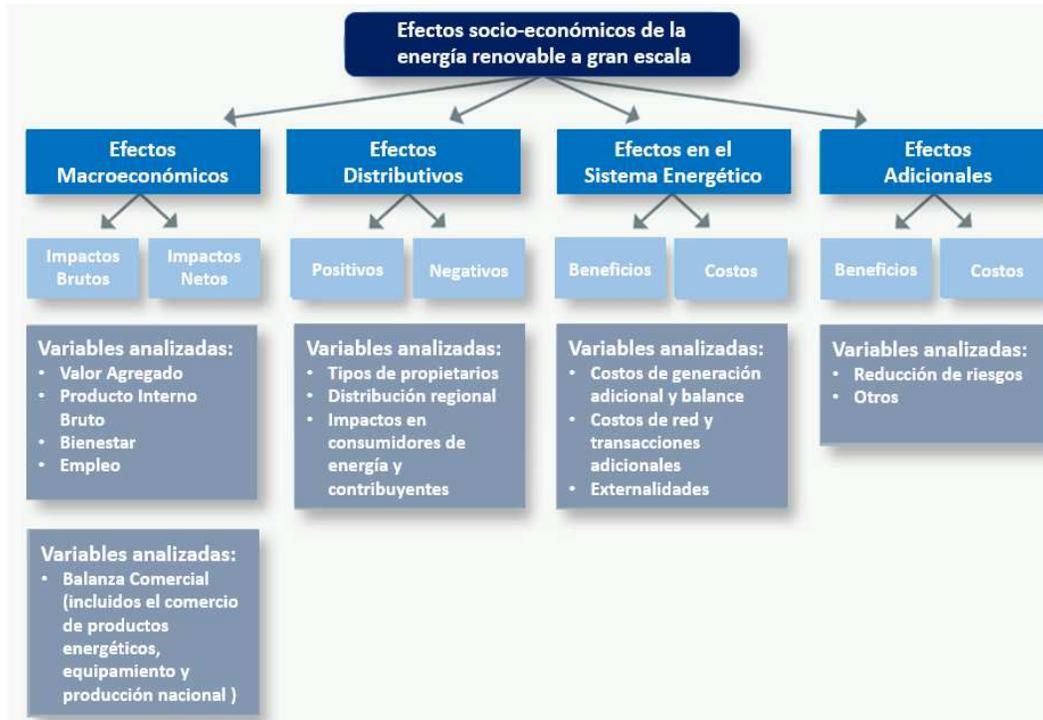
- I. **Efectos Macroeconómicos:** Estos efectos se refieren a los elementos tradicionalmente estudiados dentro de la disciplina de la macroeconomía. Pueden evaluarse dentro de la energía renovable y sectores relacionados (impactos brutos), o dentro de la economía en su conjunto (impactos netos). El análisis de los efectos macroeconómicos puede incluir las cuatro variables clave: valor agregado, PIB, bienestar y empleo. Otras variables macroeconómicas son las asociadas con la balanza comercial. En el caso de la energía renovable, se relaciona con temas como el comercio de productos energéticos, el comercio de equipos relacionados con las tecnología de energías renovables, la producción nacional y otros bienes y servicios relacionados.
- II. **Efectos Distributivos:** Se refieren a la asignación de beneficios y costos a diferentes partes interesadas dentro del sector energético. Pueden ser fiscales, pero también pueden relacionarse con otros aspectos como el tipo de estructura de propiedad (incluso si los instrumentos fiscales se han utilizado tradicionalmente con fines distributivos). Los efectos distributivos pueden ocurrir: a) entre las partes interesadas dentro del propio sector de energía renovable (p. ej., entre tipos de propietarios de plantas de energía renovable); b) dentro del sector energético en su conjunto (p. ej., efectos distributivos entre fuentes de energía renovables y convencionales y entre diferentes tipos de consumidores de energía); c) en toda la economía a nivel municipal, subnacional, nacional, regional o incluso global; d) entre diferentes conjuntos de agentes (p. ej., hogares de diferentes niveles de ingresos, empresas, gobiernos); o e) más generalmente entre diferentes generaciones (es decir, relacionado con el debate de equidad intergeneracional en el marco del desarrollo sostenible). Estos efectos distributivos son positivos para los beneficiarios y negativos para quienes tienen que soportar la carga correspondiente.
- III. **Efectos relacionados con el Sistema Energético:** Esta categoría contiene los beneficios y costos (directos e indirectos) de la penetración de energía renovable al sistema energético,

incluidos los costos adicionales de generación (p. ej., debido a variaciones más frecuentes, lo que implica un mantenimiento más frecuente), los costos de balance adicionales (p. ej., la necesidad de respaldo capacidad), los costos adicionales de la red (p. ej., para acomodar la energía generada por una central fotovoltaica recientemente instalada), los costos de transacción adicionales (p. ej., los costos de previsión solar), los beneficios de la reducción de pérdidas de energía (algunos de estos efectos pueden también clasificarse dentro de las cuestiones de la balanza comercial) y los beneficios de reducir las externalidades ambientales negativas.

- IV. **Efectos Adicionales:** Estos efectos adicionales cubren todos los beneficios y costos restantes que pueden estar asociados con la implementación de energías renovables. No son menos importantes que los anteriores, pero debido a que se pueden clasificar en más de una categoría, se han agrupado en una separada para minimizar la doble contabilización. Uno de los principales efectos adicionales del despliegue de energía renovable a gran escala es la reducción de riesgos. Incluye: a) la mitigación de posibles accidentes asociados con fuentes de energía convencionales (p. ej., accidentes nucleares, derrames de petróleo, etc.); b) los menores riesgos técnicos asociados a un sistema energético más descentralizado; y c) la reducción de los riesgos geopolíticos y financieros asociados a la dependencia energética en los países importadores. Estos últimos riesgos se suelen denominar *seguridad energética* en la literatura. Dado que incluyen un efecto de balanza comercial, incluirlos en los efectos macroeconómicos conduciría a una doble contabilización. Cabe señalar que el marco conceptual que aquí se presenta no está completo. Sin embargo, es un primer paso para proporcionar una clasificación completa de los efectos socioeconómicos de la penetración de la energía renovable en un contexto energético moderno.

La Figura 26 muestra de manera simplificada los efectos que pueden analizarse, derivados del desarrollo de las energías renovables.

Figura 26. Marco Conceptual para el análisis de los efectos socioeconómicos del despliegue de energías renovables a gran escala.



Fuente: (BMU, 2013)(Fraunhofer ISI, 2012)

Al analizar la creación de valor del desarrollo de las energías renovables, es necesario identificar las diferentes variables que se pueden utilizar y las áreas en las que se crea valor. Tomando en cuenta lo anterior, a continuación, definiremos las variables relacionadas con los efectos macroeconómicos consideradas para el presente, a saber, valor agregado y empleo. Posteriormente, las oportunidades para la creación de valor a lo largo de los segmentos de la cadena de valor de la industria fotovoltaica son analizadas.

4.1 Valor agregado.

La creación de valor está en el centro de la actividad económica, ya sea de empresas, sectores o países. Desde el punto de vista de una empresa o de cualquier empresa privada, la captura de valor es la fuente de las ganancias del propietario de la empresa y de los sueldos o salarios de los empleados. A nivel microeconómico, el valor agregado puede definirse como la cantidad de dinero

que permanece en la empresa después de que se liquidan todos los pagos por insumos materiales, servicios de otros, intereses sobre préstamos e impuestos (IEA-RETD, 2014). Si estamos hablando de un país, sector económico o región, el valor agregado es siempre interno. En términos de salarios, aumenta los ingresos de la fuerza laboral en el país, mientras que en términos de ganancias aumenta la riqueza de los propietarios de empresas. Tanto los salarios como las ganancias se pueden gastar dentro del país y, por lo tanto, crear valor adicional en otros sectores, como el consumo de bienes o servicios, que por sí mismos crean un valor agregado adicional (efectos inducidos). Además, la demanda de un sector de insumos materiales de otro sector crea valor agregado. Cuantos más pasos de producción a lo largo de la cadena de valor se integren con éxito y eficiencia a nivel nacional, mayor será la contribución de un sector a la creación de valor general en la economía. La suma de todo el valor agregado de los sectores económicos arroja el nivel más alto de agregación.

En lo que respecta a la industria fotovoltaica, de acuerdo con (IEA, 2019), las ventas totales del sector fotovoltaico en 2018 ascendieron a alrededor de 132 mil millones de dólares. A nivel mundial, el valor comercial de la energía fotovoltaica en comparación con el PIB representó entre el 0.4% y el 0.05%. Australia duplicó su valor al 0.40% en 2018 debido a su aceptación del mercado. En China, el valor comercial relativo de la energía fotovoltaica se redujo a alrededor del 0.28% del PIB, desde el 0.35% del año 2017, debido a la contracción del mercado. Japón lo sigue con un 0.25%, manteniéndose estable en comparación con 2017. Turquía cayó ligeramente al 0.25%, mientras que Holanda duplicó su valor al 0.21%. Bélgica, Suiza, EUA, Tailandia y Austria se sitúan entre el 0.05% y el 0.10%, con ligeras tendencias al alza o a la baja. Israel aumentó notablemente su desempeño del 0.035% al 0.095%, mientras que Francia experimentó una ligera caída del 0.045% al 0.035%. En pocas palabras, la participación de la energía fotovoltaica en el PIB de estos países creció ligeramente con algunas contribuciones más altas en algunos países. Lo que muestra que la inversión en la transición energética, incluso si estos números se multiplicaran por un factor de 10, se mantendría en un rango razonable y no cambiaría significativamente la disponibilidad de recursos financieros.

4.2 Empleo.

Este es uno de los efectos que el desarrollo de las energías renovables más controversia ha causado, la cual radica en si la generación empleo derivada de la energía renovable es mayor que las pérdidas incurridas en el sistema de energía convencional basado en combustibles fósiles, y en qué medida los posibles aumentos en los precios de la electricidad relacionados con las energías renovables podrían conducir a pérdidas de empleo. En otras palabras: ¿la penetración de energías renovables genera ganancias o pérdidas netas de empleo? Algunos argumentan que los costos monetarios relativamente más altos de implementar energías renovables (que ya no es cierto en muchos casos donde se logra la paridad de red) reducirán el poder adquisitivo y, en consecuencia, el empleo. Otros sostienen que la naturaleza descentralizada del despliegue de energías renovables aumentará el número total de puestos de trabajo (IEA-RETD 2014; IRENA, 2019c). Estos argumentos subrayan la necesidad de más análisis y datos específicos de cada país y enfoques confiables para estimar el potencial de creación de valor económico a partir del despliegue de energía renovable.

Los empleos en el sector de las energías renovables se clasifican como *directos*, mientras que los trabajos en industrias de apoyo, como la del acero, se denominan *indirectos*. Los trabajos en todos los demás sectores que se benefician de cualquiera de las diversas reacciones macroeconómicas (por ejemplo, los gastos de consumo de los empleados en las industrias directas o indirectas) se definen como *inducidos* (IRENA, 2019c). Tener en cuenta los empleos indirectos además de los empleos directos puede elevar las estimaciones de empleo entre un 50% y un 100% (IRENA, 2014). Este hallazgo es ampliamente consistente con los resultados de una comparación reciente entre países (Nathani, Schmid, & Resch, 2012). En él, la proporción de empleos indirectos sobre los directos estaba entre el 30% y el 170%, pero la mayoría de los países mostraban una proporción de alrededor del 60-80%. Lo cual resalta la importancia de considerar también los empleos indirectos.

La relación de empleos indirectos sobre directos puede entenderse como una medida de la división del trabajo entre el sector de las energías renovables y sus industrias de apoyo. Esta relación puede diferir entre industrias en el mismo país y/o entre países para la misma industria. Incluso puede diferir entre empresas individuales de la misma industria en un solo país. Algunos expertos sugieren que depende en gran medida de la estructura industrial de cada empresa o país y del nivel de fabricación nacional de equipos de energía renovable. Cuanto mayor sea el nivel de fabricación

nacional (y su complejidad), mayor será el número de proveedores involucrados y, por tanto, mayor será el empleo indirecto (en igualdad de condiciones). Sin embargo, este puede no ser el caso si los suministros se importan (IRENA, 2014). Además de la distinción entre *directo* e *indirecto*, el empleo también se puede clasificar en función de su durabilidad. Por ejemplo, los trabajos de operación y mantenimiento (O&M) son necesarios durante toda la vida útil de un proyecto, mientras que los trabajos de construcción son temporales y solo se necesitan una vez por proyecto. Cuando los países implementan políticas predecibles de desarrollo de energía renovable a largo plazo, promueven una expansión de las tecnologías de energía renovable que puede conducir a la creación de empleos sostenibles para todas las etapas del ciclo de vida de las tecnologías de energía renovable (IRENA, 2014).

Finalmente, en relación con esta variable, (IEA, 2019) y (IRENA, 2019c) reportan que, en 2018, China, como el principal productor de productos fotovoltaicos y el mercado de instalación más grande del mundo, lidera notablemente el empleo en la industria fotovoltaica, con alrededor de 2.2 millones de empleos, lo que representa aproximadamente casi el 70% de los puestos de trabajo de esta industria en todo el mundo. Por debajo, en un orden de magnitud, EUA ocupa el segundo lugar con alrededor de 225,000 puestos de trabajo. India y Japón se encuentran en el tercer y cuarto lugar respectivamente, con cifras de alrededor de 115,000 y 76,000. La Unión Europea participa en este rubro con un total de alrededor de 118,000.

La dinámica del empleo en la industria fotovoltaica está evolucionando en línea con los cambios en los mercados y la industria fotovoltaica. Las tendencias reflejan el estado del desarrollo del panorama de la industria fotovoltaica y cómo la cadena de suministro se está volviendo más globalizada y diferenciada geográficamente (IEA, 2019). Cuando se enfoca específicamente en las actividades de desarrollo e instalación de la cadena de valor de esta industria, que son más intensivas en mano de obra que la manufactura, se puede observar que la intensidad promedio de empleo por MW instalado es de alrededor de 10. Pero estos números varían considerablemente de un país a otro y adicionalmente de un segmento de mercado a otro (IEA, 2019) y (IRENA, 2019c). La generación distribuida genera más puestos de trabajo que la generación centralizada en general. Las actividades de operación y mantenimiento generan muchos trabajos manuales, mientras que toda la cadena de valor fotovoltaica crea trabajos de buena calidad, desde los centros de investigación hasta la fabricación.

Con un total estimado de 3,6 millones de puestos de trabajo en el sector de la energía solar fotovoltaica en todo el mundo en 2018, la energía fotovoltaica emplea alrededor de un tercio de la fuerza laboral total de energía renovable y sigue siendo el número uno en el ranking de empleo del sector mundial de energía renovable.

El surgimiento de la energía fotovoltaica como tecnología convencional despierta el apetito por la fabricación local y la creación de empleo en todos los niveles de la cadena de valor. Varios países han impulsado en los últimos años diferentes esquemas de fabricación local: Canadá, Francia, Marruecos, Turquía y Estados Unidos. Mientras que otros países han logrado que muchos fabricantes produzcan componentes fotovoltaicos en su país, como Malasia, que es el ejemplo más exitoso hasta la fecha. Otros como Chile o Sudáfrica están buscando posibilidades. Por esto es que es importante que en México se desarrolle la parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica.

A pesar de su uso prolongado y predominio en el análisis de políticas, las dos variables analizadas aquí tienen claras fortalezas y debilidades (Tabla 9) que deben ser considerados antes de evaluar el desarrollo de las energías renovables.

Tabla 9. Fortalezas y debilidades del uso del valor agregado y el empleo como efectos para analizar el desarrollo de las energías renovables.

Variable	Fortalezas	Debilidades
Valor Agregado	<ul style="list-style-type: none"> Indicadores bien establecidos Los datos suelen estar disponibles a través de las oficinas oficiales de estadística Comparación internacional y temporal posible 	<ul style="list-style-type: none"> No cubre bienes y activos que no son de mercado (es decir, externalidades negativas o positivas, como impactos ambientales) No contiene información sobre el bienestar de una sociedad (por ejemplo, cómo se distribuyen los recursos) Las implicaciones negativas sobre el medio ambiente o las personas podrían contarse como contribuciones positivas al PIB (por ejemplo, un derrame de petróleo que requiere más producción de petróleo y contratación de servicios de limpieza) Falta de datos desglosados sobre energías renovables en las estadísticas nacionales
Empleo	<ul style="list-style-type: none"> Indicador bien establecido Importante en los debates políticos y públicos 	<ul style="list-style-type: none"> El número total de trabajos no contiene información sobre la calidad de los trabajos Falta de datos desglosados sobre el empleo en energías renovables en las estadísticas nacionales

Fuente: (IRENA, 2014)

4.3 Seguridad Energética.

La seguridad energética es uno de los objetivos más importantes a alcanzar en varios países del mundo, y que, junto con la eficiencia energética y la sustentabilidad, constituyen los principales objetivos de cualquier política energética. No obstante, para conseguirla es fundamental brindar un acceso a suministros adecuados, fiables y asequibles de energía que mantengan en funcionamiento a las economías y aumenten el bienestar de la población, lo que incrementa el desafío. Por lo que una conceptualización clara de la seguridad energética es esencial para una búsqueda eficiente y eficaz de este objetivo político. Sin embargo, su significado puede ser amplio y difiere de acuerdo con las perspectivas individuales y geopolíticas en que se presente. Por ejemplo, la Agencia Internacional de Energía, que se formó en la década de los 70's para coordinar una respuesta sólida a las interrupciones en el suministro de petróleo, define la seguridad energética como la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible (Ayoo, 2020). Siguiendo con esta línea, Winzer (2012), Valentine (2011), Jun et al. (2009), Kruyt et al. (2009), Grubb et al. (2006) y Andrews (2005), la definen como la disponibilidad a un suministro de energía que satisfaga la demanda de manera confiable y asequible, que sea resistente a la volatilidad de los precios, de manera que no comprometa los principales valores y objetivos nacionales. En un contexto más amplio, Intharak et al. (2007) considera que la seguridad energética se compone de tres aspectos fundamentales: la seguridad energética física, que es la disponibilidad y accesibilidad de fuentes de suministro de energía; la seguridad energética económica, que es la asequibilidad de la adquisición de recursos y el desarrollo de la infraestructura energética; y, la sostenibilidad ambiental que implica el uso de los recursos energéticos de manera que satisfagan las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades y ambientalmente benignos con el usuario final (Badea et al., 2011).

Considerando lo anterior, se puede decir, que, sin considerar los efectos que trae consigo la volatilidad de los precios, las economías que dependen de una cartera limitada de recursos energéticos fósiles, cuentan con una menor seguridad energética, comparadas con aquellas que gozan de una abundancia de recursos energéticos diversos, por lo que los sistemas energéticos diversificados, son más resistentes y adaptables a las perturbaciones en los suministros de energía. Por lo que la diversificación de la generación de energía eléctrica es un área en la que varios países

se están enfocando cada vez más para mejorar su seguridad energética general (European Commission, 2018)(Okioga et al., 2018)(García-Gusano & Iribarren, 2018)(B. Wang et al., 2018), impulsados por el aumento de la demanda de electricidad debido a factores como el crecimiento de la población, el mayor uso de aparatos y equipos eléctricos y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Es por esto que se ha propuesto el uso de las energías renovables como un medio para diversificar la matriz energética para la generación de electricidad (Grande-Acosta & Islas-Samperio, 2017)(García-Gusano, Iribarren, & Garraín, 2017), con el objetivo de mejorar la seguridad energética. Los principios detrás de estas recomendaciones son que las fuentes de energía renovable se generan de manera local, tienen costos operativos bajos y para el caso de la energía solar, así como para otras fuentes de energía renovable, el costo marginal del recurso energético es igual o cercano a cero (IRENA, 2019b)(IRENA, 2017)(Sandor, Fulton, Engel-Cox, Peck, & Peterson, 2018), por lo que no está sujeto al mismo grado de variaciones de costos por influencias geopolíticas que los combustibles fósiles (Shum, 2019).

Si bien la disponibilidad de recursos solares es variable, esta variabilidad se basa en fuerzas naturales que pueden predecirse y adaptarse en gran medida (Brancucci Martinez-Anido et al., 2016), por lo que el costo de la energía renovable depende principalmente de los costos de capital e instalación, con costos de operación fijos y costos variables bajos o inexistentes, incluidos los costos del recurso energético (Powell et al., 2015)(IRENA, 2019a).

Aunque esto puede llevar a la conclusión de que las fuentes de energía renovables tienen un bajo riesgo para la seguridad energética, esta conclusión puede no ser válida durante todas las etapas de su desarrollo, en particularmente durante su expansión (Johansson, 2013). Dos factores identificados por Yergin (2006), para las fuentes de energía fósil, también pueden aplicarse a las tecnologías que aprovechan las fuentes de energía renovable, como la solar fotovoltaica, siendo: la globalización y la protección de toda la cadena de suministro. La política y el mercado no pueden alterar al sol, a diferencia del suministro de petróleo y gas. Sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica requiere el uso de módulos fotovoltaicos, cuyo costo depende de cadenas de suministro globales, las cuales pueden tomar acciones que, directa o indirectamente, influyan en el acceso global a materiales y componentes. Ejemplo de esto, es el suministro de polisilicio, material elaborado a base de silicio de alta pureza, del cual dependen totalmente las tecnologías

de energía solar fotovoltaica y donde casi el 90% de su producción es dominada por un limitado número de empresas a nivel mundial y aún más por país.

En este aspecto, Brown et al. (2014), consideran que la seguridad energética también tiene que ver con la concentración regional de recursos energéticos y las implicaciones del manejo estratégico y geopolítico de la energía. No obstante, la industria fotovoltaica se ha vuelto más competitiva y los gobiernos han tomado medidas y han trabajado para promover de manera sustancial el desarrollo de esta industria (Klitkou & Coenen, 2013)(Dewald & Truffer, 2011), a través de la implementación de la política industrial verde, la cual tiene como objetivo aumentar la competitividad de las fuentes de energía renovables frente a los combustibles fósiles y el promover políticas de crecimiento sectorial, para desarrollar la cadena de valor “aguas arriba” de esta industria (Gallagher et al., 2018)(SEAI, 2017), a través de requisitos de contenido local (Johnson, 2016) e incentivos nacionales como el acceso preferencial al financiamiento (Meckling & Hughes, 2018).

En el contexto nacional, para México, al igual que para la mayoría de los países en el mundo, la seguridad energética es un tema de vital importancia, visualizándola como uno de los tres elementos necesarios para alcanzar un sistema energético integral y considerándola como la capacidad para mantener un superávit energético que brinde la certidumbre para continuar con el desarrollo de actividades productivas (SENER, 2013). Sin embargo, México ha dejado de ser un país exportador neto de energía, perdiendo la autosuficiencia. El indicador de independencia energética nacional (índice utilizado a nivel internacional para medir, de forma general, el grado en que un país puede cubrir su consumo de energía derivado de su producción; si es mayor a uno, el país se considera independiente de energía) ha disminuido más del 50% en 15 años, pasando de un nivel de arriba de 1.4 en 2003 a 0.7 en 2018 (SENER, 2019)(de la Vega-Navarro, 2017). Por lo que el país debe generar alternativas que mejoren la seguridad energética nacional. En este sentido, se han propuesto, entre otras actividades, ampliar la participación de energías limpias; promover la eficiencia energética, así como la responsabilidad social y ambiental; optimizar la operación y expansión de la infraestructura; fortalecer las actividades de apoyo, la generación de conocimientos, la capacitación, el financiamiento y la proveeduría de insumos primarios para las cadenas productivas (DOF, 2014a)(DOF, 2016a).

Considerando lo mencionado en los párrafos anteriores, el desarrollo de una industria nacional estratégica que impulse la diversificación de la matriz energética a través del uso de las energías renovables, específicamente la energía solar fotovoltaica, para la generación de electricidad podría mejorar la disponibilidad y accesibilidad a la energía, favorecer el crecimiento económico al integrar localmente la cadena de suministro de esta industria, asegurando el acceso a los insumos y componentes necesarios, brindando asequibilidad de recursos y contribuyendo así con la mejora de la seguridad energética nacional. Lo que concuerda con la definición de seguridad energética y está en línea con lo que se intenta mostrar en el presente estudio, la integración de una cadena de valor de la industria fotovoltaica en México hacia 2040.

Capítulo 5. Marco Normativo para el desarrollo de cadenas de valor relacionadas con la industria eléctrica.

En la actualidad, la política energética mexicana busca, mediante una diversificación energética y económica eficiente, atraer inversiones a la industria eléctrica nacional, promoviendo la apertura y la competitividad comercial con el exterior. Así como el establecer instrumentos que fomenten la integración de cadenas productivas eficientes. En este sentido, las principales leyes derivadas de la reforma energética de 2013, la Ley de la Industria Eléctrica (LIE) y la Ley de Transición Energética (LTE), hacen énfasis en el desarrollo de las cadenas de valor ligadas a la industria eléctrica, entre ellas la cadena de valor de la industria fotovoltaica. La LTE, en conformidad con su artículo 90, indica que es facultad de la Secretaría de Economía, con la opinión de la Secretaría de Energía, definir las estrategias para el fomento industrial de Cadenas Productivas Locales y para el fomento de la inversión directa en la Industria Eléctrica, con especial atención a las pequeñas y medianas empresas. Con respecto al fomento de las cadenas productivas locales, la LIE propone de manera general lo siguiente (DOF, 2014a):

- a) Identificar los sectores industriales y las regiones en que se enfocará la estrategia, alineados a la demanda de la industria eléctrica.
- b) Integrar, administrar y actualizar un catálogo de proveedores nacionales para la industria eléctrica, en el que se registren las empresas nacionales interesadas en participar en la industria y sus necesidades de desarrollo.
- c) Implementar programas para el desarrollo de proveedores y contratistas nacionales, a partir de la detección de oportunidades de negocio.
- d) Impulsar el cierre de brechas de capacidad técnica y de Calidad de las empresas, a través de programas de apoyo para asistencia técnica y financiera.
- e) Integrar un consejo consultivo, encabezado por la Secretaría de Economía, con representantes de la Secretaría, la Comisión Reguladora de Energía, académicos y representantes del sector privado o de la industria.

Mientras que, para fomentar la inversión directa, en la LIE se propone lo siguiente:

- a) Fomentar la participación directa de empresas mexicanas para llevar a cabo, por sí mismas, las actividades en la industria eléctrica;
- b) Promover la asociación entre empresas mexicanas y extranjeras, para llevar a cabo las actividades en la industria eléctrica;
- c) Promover la inversión nacional y extranjera para que se realicen actividades de permanencia en México directamente en la industria eléctrica, o bien en la fabricación de bienes o prestación de servicios relacionados con esta industria, e
- d) Impulsar la transferencia de tecnología y conocimiento.

De igual manera y con el objeto de colaborar con el cumplimiento de lo previsto en dicho artículo, la Secretaría de Economía se apoyará en el *Fideicomiso Público para Promover el Desarrollo de Proveedores y Contratistas Nacionales de la Industria Energética*, el cual se enfoca en promover el desarrollo y competitividad de proveedores y contratistas locales y nacionales, a través de esquemas de financiamiento y de programas de apoyo para capacitación, investigación y certificación, con el fin de cerrar las brechas de capacidad técnica y de calidad, dando especial atención a pequeñas y medianas empresas.

En relación con la LTE, esta se enfoca en el aspecto sustentable del desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con la industria eléctrica, mencionado en su artículo 84 que es obligación de la Secretaría de Economía, en coordinación con la Secretaría de Energía, diseñar e instrumentar una Hoja de Ruta para promover el desarrollo de Cadenas de Valor de las Energías Limpias, en condiciones de sustentabilidad económica. Y en su artículo 86 indica que dicha Hoja de Ruta debe de contener los siguientes elementos (DOF, 2015):

- a) Instrumentos específicos para la promoción del desarrollo de cadenas de valor nacionales de las Energías Limpias.
- b) Apoyos directos a pequeñas y medianas empresas para el desarrollo de cadenas de valor, utilizando los mecanismos de apoyo existentes a cargo de la Secretaría de Economía, y

- c) Promover la inversión en desarrollo tecnológico e innovación en materia de Energías Limpias, de acuerdo con las competencias de la Secretaría, la Secretaría de Economía y otras dependencias de la Administración Pública Federal.

En línea con lo anterior, y para lograr una congruencia con la política industrial nacional así como la inserción de los sectores de la industria nacional a las cadenas de valor con base en la productividad, innovación, desarrollo regional y capital humano se elabora el *Plan Nacional de Desarrollo 2013 – 2018*, que toma los principios de la Política de Fomento Industrial para desarrollar diversas estrategias para el fomento industrial de cadenas productivas locales en la industria eléctrica y energías limpias, donde se propone lo siguiente (SE, 2013):

- a) En materia de desarrollo económico, propone incorporar el objetivo de contribuir a incrementar de manera competitiva el contenido nacional a lo largo de las cadenas productivas nacionales al integrar un mayor número de empresas nacionales a estas cadenas, con especial atención a pequeñas y medianas empresas; y a fortalecer y alinear programas de apoyo para los sectores afines.
- b) En materia energética considera programas de innovación y de generación de su propio ecosistema con base en las mejores prácticas nacionales e internacionales y el consenso entre los principales actores del sector para fomentar la cultura de innovación en el país.
- c) Así mismo, la estrategia en materia energética incorpora los objetivos del Programa de Regionalización y contribuye a la democratización de la productividad, al impulso al crecimiento económico sostenible, sustentable y equilibrado en las diferentes regiones, a través del fomento de la inversión, productividad, competitividad, empleo y mejor distribución del ingreso. En específico, se desarrollan políticas especiales en concordancia con el potencial y vocaciones productivas de las regiones, buscando generar un cambio de estructuras económicas a sectores y actividades de mayor productividad.
- d) Finalmente, se incorporan programas de desarrollo de capital humano que permitirán a la industria y a empleadores obtener la oferta de capital humano suficiente para cubrir sus puestos con base en la capacitación y la adaptación de los programas educativos para cumplir con las necesidades que demanda la industria mexicana. Bajo este enfoque del

esfuerzo educativo orientado a la capacitación para el trabajo y la vinculación con el sector productivo de la industria energética incrementará la productividad y generará actividades de mayor valor agregado.

Con la apertura del sector eléctrico se genera una gran oportunidad para que las empresas nacionales formen parte de las cadenas productivas. Derivado de la apertura del Mercado Eléctrico Mayorista y la modernización de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se espera lograr un aprovechamiento de la transferencia de tecnología que vendrá asociada a esas inversiones y una mayor integración de la cadena de proveeduría nacional en el sector eléctrico y de energías limpias.

Para poder aprovechar las oportunidades en el sector eléctrico del país, la Secretaría de Economía plantea una estrategia para el desarrollo de proveedores para este sector basada en la identificación de la demanda prospectiva de bienes y servicios que la industria necesitará para llevar a cabo sus actividades, lo cual revelará aquellos que son críticos en las cadenas productivas. Además, la estrategia toma en cuenta la identificación de las empresas nacionales que son proveedoras del sector y las que potencialmente podrían serlo en el corto y mediano plazo, de acuerdo con sus capacidades y nivel de madurez. Además, se consideran programas transversales para fomentar las habilidades técnicas y certificaciones internacionales necesarias para la inclusión de proveedores locales en las cadenas productivas, y el acercamiento con otros países y empresas internacionales, tanto para la atracción de inversión extranjera, como para la búsqueda de asistencia técnica en temas relacionados con el sector energético.

De esta manera, la propuesta que se hace en presente estudio de desarrollar e integrar de manera ascendente una cadena de valor de la industria fotovoltaica en México, esta línea con las estrategias propuestas por el Gobierno Federal para el desarrollo de cadenas de valor relacionadas con la industria eléctrica.

Capítulo 6. La Industria Fotovoltaica en México.

Contrario a lo que pudiera pensarse, la industria fotovoltaica en México no es nueva y tuvo sus inicios en la década de los 70s en el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (Cinvestav) con la obtención de fondos, debido a crisis del petróleo, para apoyar el programa de celdas solares, siendo estratégicas para este proyecto, la visión, audacia e iniciativa del Dr. Esteban Javier Pérez y la constancia y dedicación del Dr. Juan Luis del Valle (CINVESTAV, 2020). Fue entonces cuando el Cinvestav tomó la decisión de producir de manera independiente celdas solares de silicio cristalino. Los primeros módulos fotovoltaicos fabricados contenían 36 celdas solares de 2 pulgadas de diámetro y generaban una potencia de 7 Watts-pico (Wp). Gracias a esto, en 1976 se instaló la primera aplicación fotovoltaica práctica en México para alimentar sistemas de radiotelefonía rural y televisión educativa en el poblado de Bienvenido de Galeana, en la sierra del estado de Puebla (Figura 26a) (Flores-Macías, 2016)(Morales-Acevedo, 2007).

Para 1982, el Cinvestav contaba con una planta piloto de celdas solares (Figura 27), cuyos principales objetivos fueron: demostrar la factibilidad de fabricación de celdas solares en México; promover la conversión y aplicación de la energía fotovoltaica a nivel nacional; investigar y desarrollar nuevos materiales para su uso en dispositivos fotovoltaicos; y la formación de recursos humanos. La planta llegó a contar con una capacidad de producción de 24,000 watts anuales en la que se produjeron más de 100,000 celdas solares (CINVESTAV, 2020)(Morales-Acevedo, 2007) para fabricar módulos fotovoltaicos que fueron utilizados para diversos proyectos como electrificar telesecundarias, albergues infantiles del Instituto Nacional Indigenista (INI-SEP), repetidores para telefonía rural, estaciones meteorológicas y sistemas de bombeo de agua, en diversas comunidades y para apoyo docente en escuelas y universidades (Figuras 28b, 28c, 28d).

Desafortunadamente, como consecuencia de la crisis económica que vivió el país a finales de 1982 y hasta 1985; y a que no existía entonces un mercado que diera sustento a la etapa de fabricación comercial de celdas y módulos fotovoltaicos la planta piloto del Cinvestav para la fabricación de celdas y módulos fotovoltaicos detuvo sus operaciones (CINVESTAV, 2020). A partir de ese momento, toda actividad de la parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México que involucrara cualquier tipo de manufactura y/o proceso de fabricación de componentes como CFV y MFV fue nula en México y la demanda de dispositivos fotovoltaicos fue cubierta mediante importaciones, principalmente de EUA. Esta situación continuó por más de

15 años, prácticamente hasta el año 2003, cuando vuelve a instalarse en el país una planta para ensamblado de MFV. A partir de ese año hasta el presente diversas empresas tanto de capital nacional como extranjero han manufacturado tanto CFV como MFV en el país. Hasta 2018, existen en México 9 empresas en conjunto cuenta con una capacidad total de manufactura de MFV en de 1,180 MW.

Figura 27. Planta piloto para la fabricación de celdas y módulos fotovoltaicos del CINVESTAV

a) Instalaciones de la planta piloto



b) Caracterizado de los módulos fotovoltaicos

c) Módulos fotovoltaicos terminados



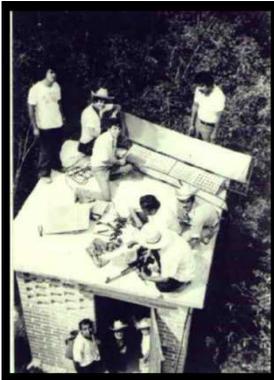
Fuente: (Morales-Acevedo, 2007).

Por el lado descendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, una vez identificada la tecnología fotovoltaica como parte de una política social, comenzaron a desarrollarse diversos programas específicos para incrementar la participación de esta tecnología en el país. Entre estos programas destacan la electrificación básica rural con tecnología fotovoltaica por parte del gobierno federal a través del PRONASOL 1988 – 1994 (Programa Nacional de Solidaridad) instalándose del orden de 1.4 MWp de módulos solares. Así mismo, Teléfonos de México (siendo todavía empresa pública) instaló en el mismo periodo alrededor de 1.3 MWp. Se estima que

durante el periodo de 1980 a 1992, la potencia acumulada fue aproximadamente de 3.7 MWp (Sánchez-Juárez, Martínez-Escobar, Santos-Magdaleno, Ortega-Cruz, & Sánchez-Pérez, 2017).

Figura 28. Primeras aplicaciones de módulos FV fabricados en México.

a) Radiotelefonía rural en la sierra de Puebla.



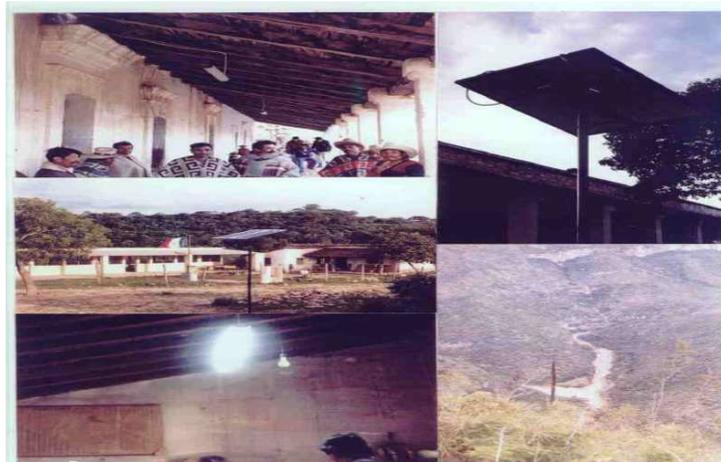
b) TV educativa e iluminación en Oaxaca.



c) Educación y radiotelefonía rural.



d) Iluminación en albergues del INI-SEP.

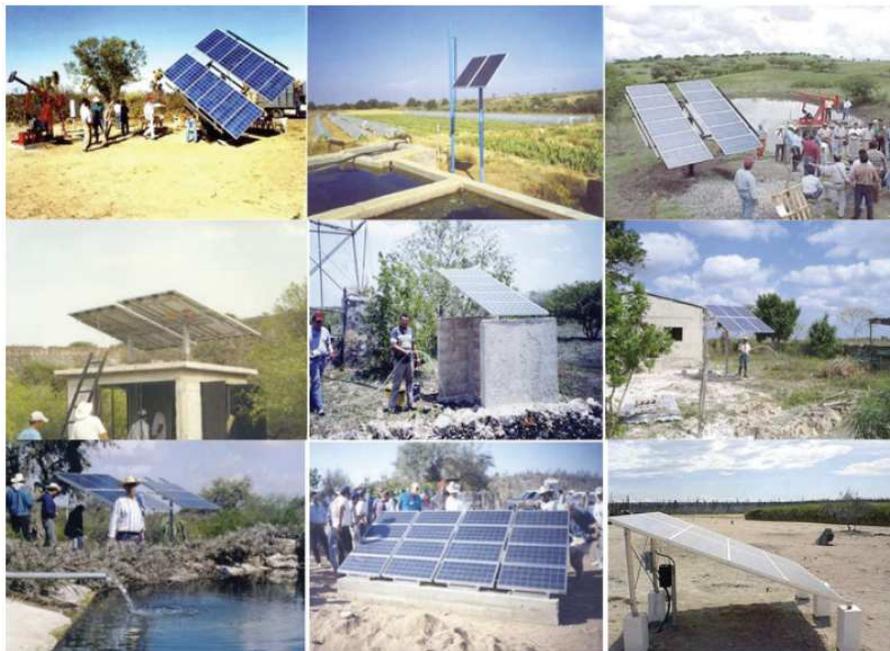


Fuente: (Morales-Acevedo, 2007).

El Programa de Energías Renovables para México (MREP, por sus siglas en inglés) 1994 – 2004, financiado por la Agencia de desarrollo de EUA (USAID, por sus siglas en inglés), a partir del cual el Fideicomiso de Riesgo Compartido, dependencia técnica de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Alimentación y Pesca (FIRCO-SAGARPA), adoptó el uso y promoción de la tecnología fotovoltaica para aplicaciones agropecuarias, específicamente para

bombeo de agua, instalándose con éxito 195 sistemas de bombeo de diversas capacidades (Sánchez-Juárez, Martínez-Escobar, Santos-Magdaleno, Ortega-Cruz, & Sánchez-Pérez, 2017). El Programa de Energía Renovables para la Agricultura (PERA) 2000 – 2006 , instrumentado igualmente por FIRCO-SAGARPA y financiado por el Global Environment Facility a través del Banco Mundial. Este programa buscaba fortalecer los cuadros técnicos para el desarrollo de proyectos productivos agropecuarios y la promoción y difusión de la tecnología fotovoltaica, resultando en más de 40 técnicos de FIRCO capacitados instructores para la promoción, fomento, desarrollo, implementación, y evaluación técnica y económica de proyectos fotovoltaicos aplicados a los agronegocios; más de 1500 técnicos de diferentes instituciones gubernamentales, proveedores, estudiantes y usuarios de la tecnología fotovoltaica y alrededor de 1,900 sistemas de bombeo fotovoltaico instalados en diferentes partes país y que han servido de sistemas demostrativos para instalar más sistemas de bombeo fotovoltaico (Figura 29) (Sánchez-Juárez, Martínez-Escobar, Santos-Magdaleno, Ortega-Cruz, & Sánchez-Pérez, 2017).

Figura 29. Ejemplos de sistemas de bombeo fotovoltaico instalados en México a través de los programas MREP y PERA entre 1994 y 2006.



Fuente: (Sánchez-Juárez, Martínez-Escobar, Santos-Magdaleno, Ortega-Cruz, & Sánchez-Pérez, 2017).

El Programa de Bioeconomía 2011, ejecutado por los organismos sectorizados en SAGARPA: Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA), FIRCO y Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero (FND), así como su sucesor Bioeconomía a partir de 2015 (SAGARPA, 2016). El Programa de Servicios Integrales de Energía de la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la electrificación rural mediante redes aisladas con sistemas 100% dependientes de sistemas fotovoltaicos, con el se pretendía electrificar 50,000 viviendas, en beneficios de 250,000 habitantes. El financiamiento duró cuatro años y concluyó en 2015, también a cargo del Global Environment Facility a través del Banco Mundial (ASF, 2011).

Además de los proyectos fotovoltaicos autónomos, antes citados, a fines de la década de los 90, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) estableció alianzas estratégicas con la CFE y la extinta compañía Luz y Fuerza del Centro para analizar el comportamiento de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red para aplicaciones residenciales.

Con la reforma a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) en 1992, posibilitó el desarrollo de proyectos privados en diferentes escalas y su interconexión a la red. Derivado de esto, en el 2005 se instala el primer sistema fotovoltaico interconectado a la red de distribución de Luz y Fuerza en el Distrito Federal con una potencia de 30.0 kW en un restaurante vegetariano llamado The Green Corner, y el cual ha sido monitoreado desde entonces por el IIE (Sánchez-Juárez, Martínez-Escobar, Santos-Magdaleno, Ortega-Cruz, & Sánchez-Pérez, 2017).

Como se observó, durante muchos años, el motor principal para el desarrollo de una industria fotovoltaica en México, así como de su mercado fueron los programas gubernamentales. Sin embargo, primeramente con la publicación de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) en 2008 que se posibilitó un esquema de regulación y la entrada de políticas específicas para que las empresas privadas y sociales invirtieran en nuevas tecnologías de generación de energía renovable, como la fotovoltaica, y posteriormente con la Reforma Energética en el año 2013, y la entrada en vigor en el 2014 de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), que deroga a la LSPEE, se da un impulso al desarrollo del mercado de la generación de energía, en particular al de las energías renovables y entre ellas a la fotovoltaica, con la aplicación de una de las políticas más efectivas para este fin, la realización de *subastas de energía*. Las subastas de energía brindan certidumbre al mercado en el largo plazo, al garantizar un ingreso a los generadores, lo que reduce riesgos y el costo de

financiamiento de los proyectos de generación, además de que contribuyen a enfrentar la volatilidad de los precios de los combustibles en el corto plazo.

Como resultado de las reformas energéticas en 1992 y 2013 se desarrollaron iniciativas que derivaron en una apertura del sector eléctrico. Dando como resultado que en años recientes la demanda de la industria fotovoltaica se haya incrementado notablemente, derivando en un desarrollo notable de la parte descendente de la cadena de valor de esta industria. De acuerdo con la Secretaría de Economía (SE, 2018) existen alrededor de 730 empresas que proveen bienes y servicios a la Industria Eléctrica, distribuidos en tres rubros: Ingeniería, Construcción de la Central y Operación y Mantenimiento (SE, 2017). Dichos bienes y servicios pueden proveídos, en algunos casos, por una sola empresa o por distintas empresas. Lo anterior ha hecho posible que actualmente existan en México más de 160,000 techos solares y 72 centrales fotovoltaicas, que en conjunto significan una capacidad instalada mayor a los 6,000 MW e inversiones directas de alrededor de 8,550 millones de dólares, además de la generación de más de 64 mil empleos (ASOLMEX, 2020) (CRE, 2020).

Sin embargo, a pesar de que la política energética mexicana ha buscado mediante una diversificación energética y económica eficiente, atraer inversiones hacia el sector eléctrico nacional, promoviendo la apertura y la competitividad comercial con el exterior. Así como el establecer instrumentos que fomenten la integración de las cadenas productivas locales (DOF, 2014).

El desarrollo de una industria fotovoltaica en México y de su respectiva cadena de valor, así como de sus beneficios, ha sido evaluado en diversos estudios; desde una perspectiva ascendente y descendente (ICM & INEEL, 2019)(SENER, 2017a)(IMP, 2017)(International, 2014)(IMP, 2001); solo ascendente (Castellanos et al., 2018) y solo descendente (CESPEDES & PwC, 2015). No obstante, los primeros no muestran ampliamente los beneficios económicos derivados del desarrollo de esta industria; el segundo evalúa la competitividad de la integración de la cadena de valor en base a un escenario arancelario, más no los beneficios socioeconómicos de dicha integración; mientras que el último evalúa los beneficios socioeconómicos macroeconómicos en base a un escenario de incremento de capacidad instalada de generación de electricidad fotovoltaica que no involucra el desarrollo de la industria fotovoltaica el país.

Como puede observarse, ninguno de los estudios antes mencionados, evalúa de manera exhaustiva la integración ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México,

determinando costos de fabricación, precios de venta, contenido nacional y beneficios socioeconómicos derivados de dicha integración; como se pretende el presente estudio.

6.1 Situación actual de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

Como se mencionó anteriormente, México dejó las actividades de manufactura de la cadena de valor de la industria fotovoltaica por más de 15 años. Fue hasta el año 2003 que se funda la empresa **ERDM**, por iniciativa de un grupo de empresarios alemanes que deciden invertir en México. **SAYA (Saya Energy)**, fue fundada en el año 2006 y cuenta con planta de manufactura de 96 MW anuales localizada en Aguascalientes. En 2009 **SOLARTEC** inició operaciones en Irapuato, Guanajuato; en 2014, adquirió a la francesa Tournaire Solaire Energie para reubicarla en Houston, Texas, con el propósito de tener mayor presencia en Estados Unidos, así como a la alemana Bosch Solar para operar bajo el nombre de Semicon y a la belga Photovoltech, mismas que llevó al Parque Industrial Apolo en Guanajuato. **SOLAREVER**, empresa fundada en 2012, cuenta con planta de manufactura de 100 MW anuales, la cual se asienta en Tepeji del Río, Hidalgo. En 2013 se crea **IUSASOL**, del grupo IUSA, con la proyección de llegar a producir 500 MW, a través de cuatro líneas de manufactura de paneles fotovoltaicos de 125 MW cada una. **SOLARSOL** fabrica módulos en su planta de Mérida, Yucatán, con una cuota de 20 MW anuales. **SOLARVATIO** es otra empresa que ensambla módulos en México, localizada en el sur, en San Felipe del Agua, Oaxaca. Cabe mencionar que todas las empresas citadas se dedican únicamente al ensamblaje de MFV, con excepción de **SOLAREVER**, quien también fabrica celdas fotovoltaicas.

Además de las empresas mencionadas, las cuales son todas de capital nacional, también se instalaron empresas de capital extranjero en el país. En 2004 la japonesa **KYOCERA** inició la producción de módulos FV en Tijuana, anunciando en 2007 la expansión de su capacidad a 35 MW y con el plan de crecer a 150 MW anuales al 2011; pero en 2016 detuvo su producción y se enfocó industria automotriz. **SANYO ENERGY**, subsidiaria de Sanyo Electric ahora **Panasonic**, estableció en 2009 una planta ensambladora de módulos HIT con capacidad de 75 MW anuales en el municipio de General Escobedo, Nuevo León, trasladando en años posteriores su planta de producción a Malasia y Japón. **JABIL CIRCUIT** anunció en 2010 la producción de 45 MW anuales en su planta de Chihuahua, para surtir el mercado estadounidense; sin embargo, al 2018 ya no reporta producción. En 2012 la española **SILIKEN** cerró su fábrica de Tijuana, tan solo 19 meses después de ponerla en

marcha. En 2015, la maquiladora Flextronics ensamblaba módulos FV para **SunEdison** con una producción de 450 MW anuales y ocupando cerca de 1,100 obreros; sin embargo, en 2016 cayó en bancarrota y detuvo la producción vendiendo sus activos a Flextronics. Sin embargo, esta ya no reporta operaciones.

Actualmente, México solo participa dentro del último eslabón de la parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, con un total de 9 empresas que se dedican al ensamblaje de módulos fotovoltaicos (con excepción de SOLAREVER que también fabrica CFV) que en conjunto cuentan una capacidad instalada de producción de casi 1,180 MW (Tabla 10).

Tabla 10. Empresas productoras de módulos solares en México en 2018.

No.	Empresa	Estado	Capacidad de Producción (MW)
1	ERDM Solar	Veracruz	200
2	IUSASOL	Estado de México	500
3	Solarever	Hidalgo	100
4	Xtender Solar	Baja California	150
5	SAYA	Aguascalientes	100
6	Solartec	Guanajuato	100
7	Solarsol	Yucatán	20
8	Solarvatio	Oaxaca	5
9	Sydemex Solar	Colima	4

Fuente: (Bellini, 2018) (SE, 2018) (Sitios Web de las empresas)

El lado descendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica es el que más se ha desarrollado. De acuerdo con la Secretaría de Economía (SE, 2018) existen 730 empresas que proveen bienes y servicios a la Industria Eléctrica. En específico, existen 49 bienes y servicios que pueden ser proveídos a la Industria Fotovoltaica y los cuales se encuentran clasificados en tres grandes rubros: Ingeniería, Construcción de la Central y Operación y Mantenimiento (SE, 2017). Dichos bienes y servicios pueden proveídos, en algunos casos, por una sola empresa o por distintas empresas (Tabla 11). La Figura 30, muestra la concentración de estos bienes y servicios a nivel nacional.

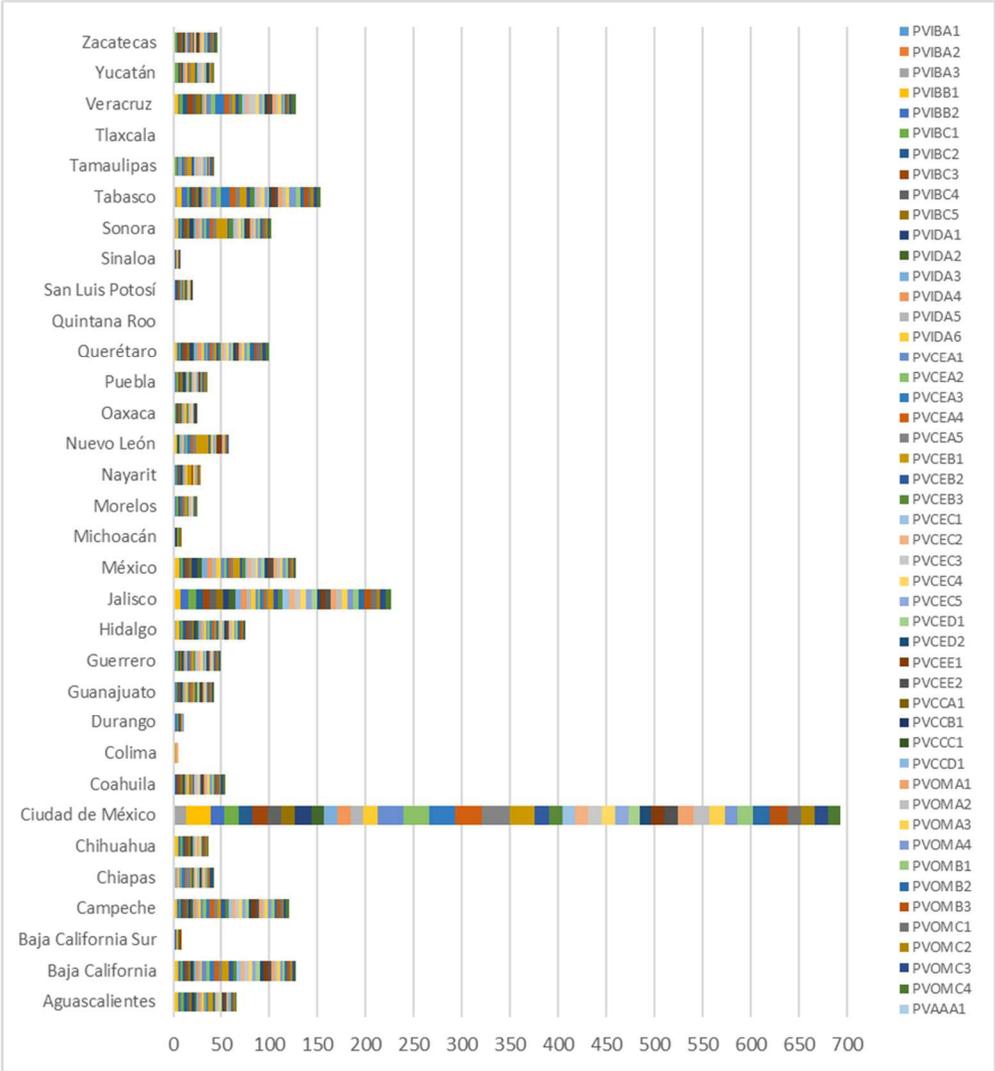
Tabla 11. Clasificación de Bienes y Servicios proveídos a las Industria Fotovoltaica.

Código	Bien o Servicio
Ingeniería	
PVIBA1	Estudio Topográfico
PVIBA2	Estudio Hidrológico
PVIBA3	Estudio Geotécnico
PVIBB1	Servicios de Gestoría
PVIBB2	Verificación NOM-001-SEDE-2012
PVIBC1	Dimensionamiento de sistema fotovoltaico (SIFOVI) y memoria de cálculo
PVIBC2	Desarrollo de diagramas eléctrico de BLOQUES y TRIFILAR
Código	Bien o Servicio
Ingeniería	
PVIBC3	Desarrollo de sembrado de módulos en sitio de construcción del SIFOVI
PVIBC4	Plano de estructuras de montaje del SIFOVI
PVIBC5	Análisis de producción del SIFOVI utilizando herramientas profesionales de simulación
PVIDA1	Planos y diagramas para instalación eléctrica de sistema fotovoltaico
PVIDA2	Detalles de cajas de combinación en CC
PVIDA3	Detalles de Tableros en CA
PVIDA4	Plano de canalizaciones y conductores con medidas, calibres, etc.
PVIDA5	Plano de detalles de sujeción de estructuras de montaje
PVIDA6	Plano de arquitectura del sistema de monitoreo
Construcción de la Central	
PVCEA1	Despalme y limpieza del terreno, remoción y desalojo de la capa de terreno vegetal
PVCEA2	Cerca perimetral, Maya ciclónica
PVCEA3	Construcción de Caminos
PVCEA4	Suministro de estructura de montaje en acero galvanizado
PVCEA5	Estructura de montaje en acero galvanizado
PVCEB1	Paneles solares
PVCEB2	Junction box
PVCEB3	Montaje del generador fotovoltaico
PVCEC1	Gabinetes y envolventes
PVCEC2	Protecciones eléctricas en baja tensión
PVCEC3	Conductores
PVCEC4	Tuberías y canalizaciones
PVCEC5	Accesorios
PVCED1	Materiales para línea de media tensión aérea
PVCED2	Transformador elevador de media tensión
PVCEE1	Suministro de inversor de corriente central
PVCEE2	Instalación de inversor de corriente central (incluye puesta en marcha)
PVCCA1	Mano de obra de baja tensión
PVCCB1	Mano de obra de media tensión
PVCCC1	Pruebas y puesta en servicio
PVCCD1	Instalación y configuración del sistema de monitoreo
Operación y Mantenimiento	
PVOMA1	Monitoreo remoto a través del portal del fabricante del inversor
PVOMA2	Envío de correo diario con reporte de principales indicadores
PVOMA3	Revisión diaria de parámetros meteorológicos locales
PVOMA4	Disponibilidad de personal 24 x 365
PVOMB1	Inspección y mantenimiento a inversores de corriente
PVOMB2	Inspección y mantenimiento al tablero principal, incluye análisis termográfico de clemas, conexiones y conductores

Fuente: (SE, 2017)

Donde la Ciudad de México es el estado que concentra la mayor cantidad de bienes y servicios, proveyendo un total de 693, seguido por el estado de Jalisco con 226. Los estados con menos concentración de bienes y servicios son Baja California Sur, con 8; Sinaloa con 7; Colima con 5; Tlaxcala con 2 y finalmente Quintana Roo, que no cuenta con ningún proveedor de bienes y servicios para la Industria Fotovoltaica.

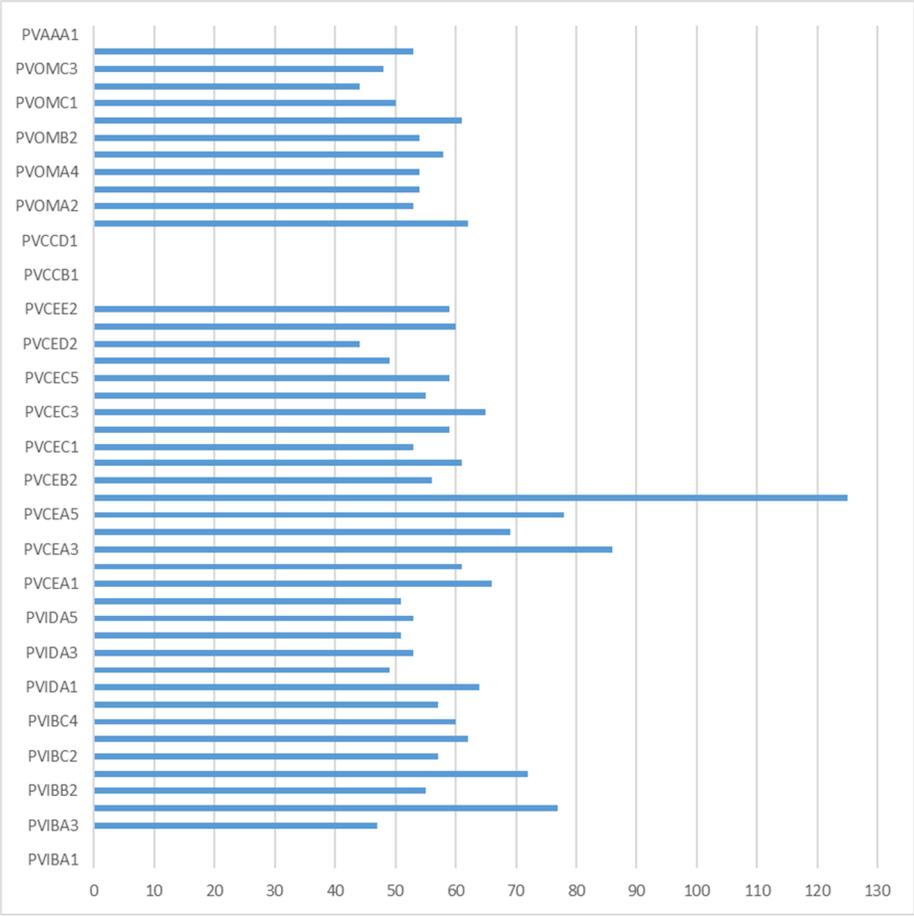
Figura 30. Concentración de Bienes y Servicios para la Industria Fotovoltaica a nivel Nacional, 2023.



Fuente: Elaboración propia con información de (Secretaría de Economía, 2023)

En lo que respecta a los bienes y servicios, el que se provee por una mayor cantidad de empresas es el respectivo al suministro de Paneles Solares (PVCEB1), los cuales los proveen un total de 125 empresas en todo el país. Mientras que servicios como estudio topográfico (PVIBA1), estudio hidrológico (PVIBA2), mano de obra de baja tensión (PVCCA1), mano de obra de media tensión (PVCCB1), pruebas y puesta en servicio (PVCCC1) e instalación y configuración del sistema de monitoreo (PVCCD1) aparecen como no suministrados por alguna empresa (Figura 31).

Figura 31. Número de empresas según el bien o servicio suministrado a la Industria Fotovoltaica, 2023.



Fuente: Elaboración propia con información de (Secretaría de Economía, 2023).

En cuanto a la demanda, desde la publicación del Primer Contrato de Interconexión para Fuente de Energía Solar en Pequeña Escala, así como la entrada en operación de la primera Central Fotovoltaica de gran escala, se han instalado un total de 102 centrales fotovoltaicas en 17 Estados

del país, que suman una capacidad instalada acumulada de 7,544 MW. Siendo el Estado de Sonora el que cuenta con el mayor número de centrales, con 15; mientras que Coahuila, a pesar de contar con solo 5 centrales, concentra una capacidad instalada mayor a 840 MW, como se puede apreciar en la Tabla 12.

Tabla 12. Centrales fotovoltaicas en México

Estado	Capacidad Instalada (MW)	No. de centrales
Aguascalientes	1,201.5	9
Baja California ^a	50.7	3
Baja California Sur ^a	103.8	5
Chihuahua	850.4	17
Coahuila	841.7	5
Durango	427.1	16
Estado de México	20.0	3
Guanajuato	344.0	6
Hidalgo	116	1
Jalisco	390.9	4
Puebla	220.8	1
Querétaro	1.4	1
San Luis Potosí	235.0	3
Sonora	1,357.1	15
Tlaxcala	420	2
Yucatán	51.8	2
Zacatecas	410.3	4
Total	7,544.2	102

^aEstos Estados cuentan con las únicas centrales fotovoltaicas propiedades de la empresa productiva del Estado, CFE: Cerro Prieto con una capacidad de 3 MW en B.C. y Santa Rosalía con una capacidad de 1 MW en B.C.S.

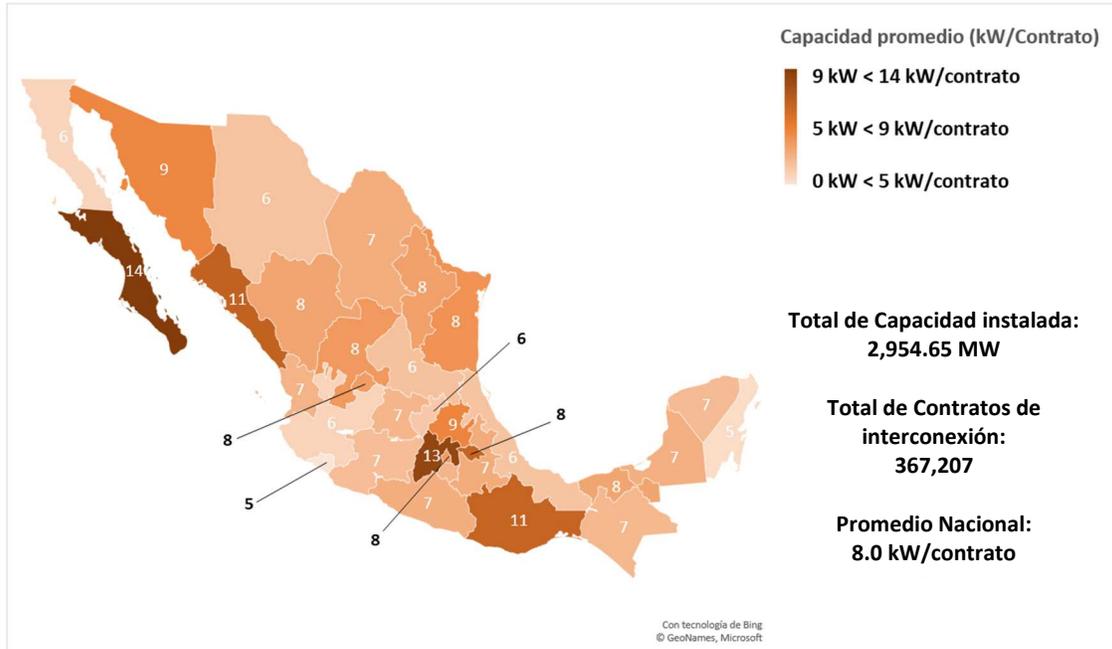
Fuente: (CRE, 2023)(ASOLMEX, 2023)

Con dicha capacidad se generaron alrededor de 10,379 GWh de electricidad durante 2019, lo que representó el 3.1 % del total de energía eléctrica generada en México.

Además de la capacidad instalada relacionada a la generación centralizada, en México existe una capacidad instalada de 2,954.65 MW de generación distribuida a largo del país derivados de 367,207 contratos de interconexión, con un promedio de 8.0 kW instalados por contrato. Siendo Baja California Sur y el Estado de México los Estados con el mayor promedio con 14 kW/contrato y 13 kW/contrato, respectivamente; seguidos por los Estados de Oaxaca, Sinaloa y Tlaxcala con un promedio de 11 kW/contrato; Hidalgo y Sonora con 9 kW/contrato; Aguascalientes, CDMX, Durango, Nuevo León, Tabasco, Tamaulipas y Zacatecas con 8 kW/contrato; Campeche, Chiapas, Coahuila, Guanajuato, Guerrero, Michoacán, Morelos, Nayarit, Puebla y Yucatán con 7 kW/contrato; Baja California, Chihuahua, Jalisco, Querétaro, San Luis Potosí y Veracruz con 6

kW/contrato; por último, con el menor promedio de capacidad instalada por contrato, se encuentra el Estado de Colima con 5 kW/contrato, como se muestra en la siguiente Figura 32.

Figura 32. Promedio de capacidad instalada de generación distribuida por contrato de interconexión en México.



Fuente: (CRE, 2023).

Dicha generación significó alrededor 1.4% (4,064 GWh) de toda la electricidad generada en el país en 2022. Sin embargo, la capacidad de generación distribuida antes mencionada representa apenas el 10.5% de la capacidad total de alojamiento que permite la Red General de Distribución del país, la cual es de 28 GW (SENER, 2019a).

En suma, tanto la generación centralizada como la generación distribuida representan en conjunto una capacidad instalada de 10,479 MW, lo que representó una generación de electricidad de alrededor de 14,443 GWh durante 2022, aproximadamente el 4.5% de la generación total de electricidad en el país (SENER, 2022a). Así mismo, de acuerdo con las proyecciones nacionales, la CRE estima que la generación distribuida podría incrementar su capacidad instalada a una tasa anual del 17%, mientras que la SENER estima que la generación de electricidad puede incrementarse a una tasa anual del 3.4% y donde la energía fotovoltaica representaría cerca del 8% de dicha generación. Lo que significa que la demanda interna de energía fotovoltaica, tiene amplias

posibilidades de convertirse en un impulsor significativo para el desarrollo de una cadena de valor integrada de la industria fotovoltaica en México.

Capítulo 7. Escenarios de desarrollo e integración ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

7.1 Metodología General.

Atendiendo a la problemática ya antes referida de desarrollar e integrar una cadena de valor de la industria fotovoltaica que contribuya a la seguridad energética y a propiciar beneficios económicos, sociales y ambientales en la generación eléctrica, el presente estudio desarrolla una metodología y un modelo económico que considera el progreso de la tecnología fotovoltaica y las economías de escala para la construcción de dos escenarios que simulan un desarrollo de la cadena ascendente de valor de la industria fotovoltaica en México (CVIFM) hacia el año 2040; un escenario base que considera un incremento en la capacidad de producción de la CVIFM, basado en la situación actual de esta industria en el país, en la cual únicamente se lleva a cabo el proceso de ensamblaje final de módulos fotovoltaicos y donde el uso de materiales e insumos importados domina dicho proceso. Y un escenario alternativo que además del incremento en la capacidad de producción, considera también la integración gradual de la parte ascendente de una cadena de valor de la industria fotovoltaica en México (CVIFM), desde la elaboración de silicio metálico (MG-Si) hasta la fabricación del módulo fotovoltaico, con la mayor aportación posible de materiales de origen nacional. Lo anterior se realiza con el objetivo de estimar y contrastar los potenciales beneficios de los escenarios propuestos a través de los siguientes pasos. Primero, se estiman el costo de fabricación y el precio mínimo requerido para sostener financieramente la operación de la CVIFM, a manera de que puedan presentarse, ya sea los incrementos de capacidad de producción y/o la integración de los eslabones ascendentes de la cadena de valor de la industria fotovoltaica según los escenarios propuestos. Segundo, la proporción de contenido nacional es calculada de acuerdo con el número de eslabones que contiene la CVIFM en cada escenario. Tercero, así mismo, son estimados los beneficios socioeconómicos de cada escenario, enfocándose en la generación de empleos y de valor agregado. Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se analizan las opciones de políticas públicas que favorezcan el desarrollo e integración de una CVIFM que contribuya a la seguridad energética y la transición hacia un futuro energético sostenible en México.

7.2 Construcción de escenarios.

Como se mencionó en la sección anterior, a partir del establecimiento de un año de referencia, dos escenarios que simulan el desarrollo e integración ascendente de una CVIFM en México para el periodo 2018 – 2040 son construidos. Un Escenario Base que simula solamente un incremento en la capacidad de ensamblaje de MFV, en función del crecimiento histórico que ha presentado dicha capacidad en México. Y un Escenario Alternativo que simula, en el mismo periodo de tiempo, una completa integración de los procesos ascendentes de la cadena de valor de la industria fotovoltaica para la fabricación de paneles fotovoltaicos basados en silicio monocristalino, considerándose los siguientes eslabones: (i) silicio de grado metálico (MG-Si), (ii) polisilicio (Poly-Si), (iii) lingote y obleas de silicio (Lingote), (iv) celdas fotovoltaicas (CFV) y (v) módulos fotovoltaicos (MFV). La construcción tanto del año de referencia como de los escenarios propuestos se explica a continuación.

7.2.1 Año de referencia

- a) El año 2018 se establece como el año de referencia ya que para este año se cuenta con información suficiente sobre la capacidad instalada de plantas fotovoltaicas de generación centralizada (GC) y generación distribuida (GD) en México, siendo esta de 5,377 MW y 916 MW, respectivamente (SENER, 2019b)(CENACE, 2019)(CFE, 2019a)(CRE, 2020). Así como para representar adecuadamente la estructura y capacidad actual de la parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México, basada únicamente en el proceso de ensamblaje de MFVs, y la cual tiene una capacidad de 1.18 GW/año de MFVs (Bellini, 2018) (SE, 2018).
- b) El costo de ensamblar un MFV, así como la proporción de contenido nacional en el año de referencia son estimados a partir de la información de la siguiente Tabla 13. Así mismo, el MSP para el año de referencia se estima de acuerdo con la proporción del costo de manufactura sobre el MSP, la cual es en promedio del 87% (Woodhouse et al., 2019). De acuerdo con lo anterior, para el año de referencia, el costo de ensamblar un MFV en México es de 0.217 USD/W; con un MSP de 0.249 USD/W. Mientras que la proporción de contenido nacional en el año de referencia es de 0.08.

Tabla 13. Variables técnicas y económicas para determinar el costo de fabricación de un módulo fotovoltaico en México en 2018.

Variable/Insumo	Costo/Parámetro		Referencia
Eficiencia del módulo	18.4	%	
Consumo total de Poy-Si	0.1	g/μm	
Uso de Poly-Si por celda	3.0	g/W	(Woodhouse, et al., 2019); (VDMA, 2020)
Grosor de la Celda FV	160	Mm	
No. De Celdas FV por módulo	60	Celdas	
Potencia del MFV	310	Wp	
Celda FV	0.094	USD/W	(PVinsights, 2020); (FerroAlloyNet, 2020);(USGS, 2020)
Marco de aluminio	1.25	USD/m	
Sellador de silicón	0.06		
Hoja Posterior (EVA)	2.3	USD/m ²	(Woodhouse et al. 2019), (Alibaba, 2020)
Encapsulante	1.1		
Hoja de vidrio	3.9		
Cintas conectoras	0.9		
Caja de conexiones y cables	3.4		
Pasta adherente	1.3	USD/módulo	
Electricidad	0.058	USD/kWh	
Salario de Operador	0.6	USD/h	(CFE, 2019b); (SNE, 2019); (INEGI, 2020)
Salario de Técnico	0.8		
Salario de Supervisor	2.6		
Rendimiento total de los equipos	96	%	(Woodhouse et al. 2019); (VDMA, 2020)

Fuente: Elaboración propia

7.2.2 Escenario Base

- a) El Escenario Base se construye considerando que la estructura ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica existente en México en el año 2018 permanece sin cambios en su proporción de contenido nacional y limitada al ensamblaje de MFVs durante el periodo 2018 – 2040. Y la cual incrementará su capacidad de producción a lo largo del periodo en función de su crecimiento histórico y de su capacidad financiera para autofinanciar dicho incremento.
- b) La capacidad acumulada de manufactura de MFV en el año de referencia es proyectada basada en los datos históricos presentados en la Tabla 14. De acuerdo con estos datos, se estima que el crecimiento promedio de la capacidad de producción es del 4.6% anual y la cual se asume constante hacia el final del periodo de estudio.

Tabla 14. Datos históricos sobre la capacidad de producción de la CVIFM.

Año	Capacidad Acumulada de Producción (MW)	Promedio acumulado de producción (MW)	TCA ^a
2006	100	100	0.000
2007	300	400	3.000
2008	300	350	-0.125
2009	550	417	0.190
2010	550	450	0.080
2011	550	470	0.044
2012	650	500	0.064
2013	655	522	0.044
2014	1180	604	0.157
2015	1180	668	0.106
2016	1180	720	0.077
2017	1180	761	0.058
2018	1180	796	0.046

^a TCA = Tasa de crecimiento anual del promedio acumulado de producción.

Fuente: Elaboración propia (Bellini, 2018) (SE, 2018) (Sitios Web de las empresas)

- c) La demanda de tecnología fotovoltaica para el país es estimada a partir de la capacidad instalada de plantas fotovoltaicas en de acuerdo con las prospectivas nacionales y en línea con las metas establecidas en la Contribución Prevista Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) presentada en el Acuerdo de Paris, donde se establece que México debe generar el 50% de su energía eléctrica a través del uso de energías limpias hacia el año 2050 (SEMARNAT, 2020) (Gobierno de la República, 2015). Así mismo se considera que dicha capacidad instalada está compuesta por plantas fotovoltaicas de generación centralizada (GC) y de generación distribuida (GD). Con base en esta información, se establece la demanda de tecnología fotovoltaica y la cual es cubierta, en parte, con la capacidad de producción de la CVIFM estimada a lo largo del periodo de estudio.
- d) Los costos de manufactura en el escenario base son calculados ajustando el costo total de fabricación del año de referencia de acuerdo con el progreso tecnológico de la industria fotovoltaica y a los incrementos en la capacidad de manufactura de la CVIFM efectuados a lo largo del periodo de estudio (Tabla 15). Para estar en línea con las tendencias internacionales, los incrementos en la capacidad de fabricación serán del orden de 1GW (TERI, 2019). El MSP para el escenario base es calculado utilizando la misma proporción que guarda el costo sobre el valor final que en el año de referencia y la cual se asume constante para todo el periodo de análisis. Dicho precio es calculado con el único objeto de ser comparado con el precio de

referencia a nivel internacional, para así poder determinar la viabilidad del escenario propuesto. Como precio de referencia se considera el precio spot internacional de un MFV totalmente ensamblado, siendo este de 0.196 USD/W para 2018 y el cual disminuirá a lo largo del periodo de estudio de acuerdo con la curva de aprendizaje del precio de la tecnología fotovoltaica (VDMA, 2020).

Tabla 15. Costos de inversión de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, 2018.

Eslabón	Costo (USD/W)		Referencia
	Equipo	Instalaciones	
MFV	0.05	0.04	(Maycock and Bradford, 2007); (Photon
CFV	0.08	0.06	International, 2008); (Goodrich, James, and
Lingote y Oblea	0.05	0.02	Woodhouse, 2011); (Goodrich, Hacke, et al.,
Poly-Si	0.14	0.05	2013) (Powell et al., 2015)(Woodhouse et al.,
MG-Si	0.02	0.01	2019) (PCC, 2020) (Missisipi Silicon, 2020)

Fuente: Elaboración propia

- e) Para asegurar la sostenibilidad financiera de la CVIFM, los incrementos en la capacidad de fabricación dependerán tanto de las ganancias generadas por la operación de la CVIFM como de la venta de los MFV manufacturados a lo largo del periodo de estudio. Donde el costo relacionado a los incrementos de capacidad de fabricación y las ganancias generadas son simulados a través de un flujo de efectivo descontado. De manera anual, las ganancias son retenidas y reinvertidas una vez que estas alcanzan un valor igual o mayor a la inversión requerida para incrementar la capacidad de producción de la CVIFM. Para lo cual, se considera que la totalidad de la producción anual es vendida.
- f) Con el objetivo de satisfacer la demanda nacional de tecnología fotovoltaica a largo del periodo, la diferencia entre la capacidad de producción de la CVIFM y dicha demanda será cubierta por medio de importaciones, adquiridas con base en el precio spot internacional de esta tecnología. Así mismo, en caso de existir excedentes anuales de producción, estos serán agregados a la capacidad de producción del año siguiente, con el objetivo de disminuir las importaciones a través del periodo de estudio.
- g) Finalmente, los beneficios socioeconómicos asociados al escenario base son determinados evaluando el impacto del desarrollo e integración de la CVIFM sobre la generación de valor agregado y la creación empleo, ambos de manera directa e indirecta. La generación directa

tanto de valor agregado como de empleo son determinados a partir del efecto que tienen las inversiones para incrementar la capacidad de producción e integrar los procesos de la CVIFM. Mientras que el valor agregado y el empleo generados de manera indirecta, son evaluados, a través de un análisis matricial insumo-producto basado en la información del Sistema de Cuantías Nacionales proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (INEGI, 2017); considerando aquellas industrias que tengan una relación directa con la fabricación de materias primas necesarias para llevar a cabo los procesos de manufactura de la CVIFM. Dicha selección de industrias se muestra en la siguiente Tabla 16.

Tabla 16. Industrias consideradas y relacionadas con el suministro de materias primas a la parte ascendente de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

Eslabón de la cadena de valor de la industria fotovoltaica				
MG-Si	Poly-Si	Oblea	CFV	MFV
Relacionadas con los procesos de transformación				
1133 - Tala de árboles				
2121 - Minería de carbón mineral				
2122 - Minería de minerales no metálicos			2122 - Minería de minerales metálicos	3222 - Fabricación de productos de cartón y papel
2131 - Servicios relacionados con la minería			2131 - Servicios relacionados con la minería	3255 - Fabricación de pinturas, recubrimientos y adhesivos
2222 - Suministro de gas por ductos al consumidor final		3259 - Fabricación de otros productos químicos	3251 - Fabricación de productos químicos básicos	3261 - Fabricación de productos de plástico
3241 - Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	3259 - Fabricación de otros productos químicos	3271 - Fabricación de productos a base de arcillas y minerales refractarios	3259 - Fabricación de otros productos químicos	3272 - Fabricación de vidrio y productos de vidrio
3251 - Fabricación de productos químicos básicos			3313 - Industria básica del aluminio	3313 - Industria básica del aluminio
3331 - Fabricación de maquinaria y equipo agropecuario, para la construcción y para la industria extractiva				
3335 - Fabricación de maquinaria y equipo para la industria metalmecánica				
Relacionadas con la construcción de las plantas				
				2362 - Edificación no residencial
				2371 - Construcción de obras para el suministro de agua, petróleo, gas, energía eléctrica y telecomunicaciones
				2372 - División de terrenos y construcción de obras de urbanización
				2379 - Otras construcciones de ingeniería civil

2381 - Cimentaciones, montaje de estructuras prefabricadas y trabajos en exteriores

2382 - Instalaciones y equipamiento en construcciones

2383 - Trabajos de acabados en edificaciones

2389 - Otros trabajos especializados para la construcción

3353 - Fabricación de equipo de generación y distribución de energía eléctrica

3359 - Fabricación de otros equipos y accesorios eléctricos

Otras

4311 - Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos

4611 - Comercio al por menor de abarrotes y alimentos

5621 - Manejo de residuos y desechos, y servicios de remediación

Fuente: (INEGI, 2017)

7.2.3 Construcción del Escenario Alternativo.

- a) El Escenario Alternativo se construye asumiendo que la CVIFM se encuentra completamente integrada de manera ascendente hacia el año 2040. De igual forma, se asume que, durante este periodo, la CVIFM va presentando incrementos en su capacidad de producción. Dicho desarrollo se da en función de la capacidad financiera de la propia CVIFM para autofinanciar tanto la integración ascendente como los incrementos de capacidad de producción a lo largo del periodo de estudio. Y donde a medida que se va presentando la integración de eslabones a la CVIFM, se estima la proporción de contenido nacional, considerando el abastecimiento de materiales de producción de origen nacional.
- b) Los costos de fabricación del escenario alternativo, son calculados a partir del costo de fabricación del año de referencia, el cual es ajustado considerando la evolución del costo de fabricación derivado del progreso de la tecnología fotovoltaica reflejado en cada uno de los eslabones de la CVIFM de acuerdo a (VDMA, 2020) y del cambio en las variables económicas derivado de los incrementos en la capacidad de fabricación (Carvalho, Dechezleprêtre, & Glachant, 2017)(Kavlak, McNerney, & Trancik, 2018)(Jean, Woodhouse, & Bulovic, 2019) a lo largo del periodo de estudio. El ajuste en el costo de fabricación al realizarse de manera progresiva dependerá del año en el que se lleven a cabo tanto la integración como el incremento en la capacidad de fabricación. Lo que a su vez modifica progresivamente el valor del MSP (para más información, véase el material suplementario).

- c) Para que la integración de eslabones a la CVIFM así como los incrementos en la capacidad de fabricación puedan realizarse y autofinanciarse, se realiza el mismo procedimiento descrito en el escenario base, donde las ganancias son calculadas a lo largo del periodo a través de la simulación de un flujo de efectivo descontado que involucra la estimación del MSP a partir del cual se determinan los ingresos de la CVIFM y posteriormente dichas ganancias son retenidas y reinvertidas hasta que estas alcanzan un valor igual o mayor a la inversión requerida para integrar el siguiente eslabón y/o incrementar la capacidad de producción de la CVIFM (para más información, véase el material suplementario). Al igual que en el escenario base, se considera que: los incrementos en la capacidad de fabricación en este escenario alternativo son del orden de 1GW (TERI, 2019); la totalidad de la producción es vendida; los faltantes para satisfacer la demanda nacional de MFV son cubiertos con importaciones; y los excedentes de producción utilizados para disminuir las importaciones. Así mismo, el MSP resultante en este escenario, es comparado con el precio spot internacional.
- d) De igual forma, los beneficios socioeconómicos asociados a este escenario son estimados. Y finalmente, los resultados son analizados con el objetivo de delinear los desafíos y oportunidades que trae consigo este escenario y proponer las políticas públicas que propicien su desarrollo.

7.3 Modelos de Cálculo.

Esta sección se presentan los modelos de cálculo utilizados en los escenarios propuestos para evaluar el desarrollo e integración de una CVIFM.

7.3.1 Modelo de Costos.

El modelo de costos utilizado es un modelo tipo bottom-up que nos permite suponer la construcción, expansión y operación de distintas plantas que se integran para conformar una hipotética cadena de valor aguas arriba de la industria fotovoltaica en México para la producción de MG-Si, Poly-Si, lingotes y obleas de silicio monocristalino (mono-Si), celdas y módulos

fotovoltaicos en México. El modelo considera los costos⁴ involucrados en cada uno de los procesos de manufactura, siendo estos los costos de los materiales, electricidad, mano de obra, mantenimiento, electricidad, operación y depreciación; los cuales son expresados en términos de costos nivelados, *dólares por watt* (USD/W). De esta manera, el costo de fabricar el bien final de cada eslabón (CPB_i), así como el costo total de fabricación para toda la CVIFM es determinado mediante la siguiente ecuación:

$$CT_{CVIFM} = \sum_i^n CPB_i = \sum_i^n \left(\frac{CPB_i}{W} \right) = \sum_i^n \sum_h^i \left(\frac{C_{hi}}{W} \right) \quad (1)$$

Donde:

CT_{CVIFM} = Costo total de fabricación de toda la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

CPB_i = Costo de fabricación del bien final del eslabón i de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

C_h = Tipo de costo (materiales, O&M, mano de obra, electricidad, etc.) considerado para elaborar los productos del eslabón i .

i = Eslabón de la cadena de valor de la industria fotovoltaica.

n = Número de eslabones considerados para la cadena de valor de la industria fotovoltaica: 1) silicio de grado metálico (MG-Si), 2) Polisilicio (Poly-Si), 3) lingote de silicio y obleas de silicio, 4) celdas fotovoltaicas y 5) módulos fotovoltaicos.

W = Capacidad total anual de fabricación de la planta integrada en Watts (W).

Cómo se mencionó, el costo de producción para los años posteriores al año de referencia, es ajustado mediante el uso de un factor de reducción de costos (f). Para el cálculo de dicho factor se debe considerar que esta deriva de las reducciones generadas del progreso tecnológico y la

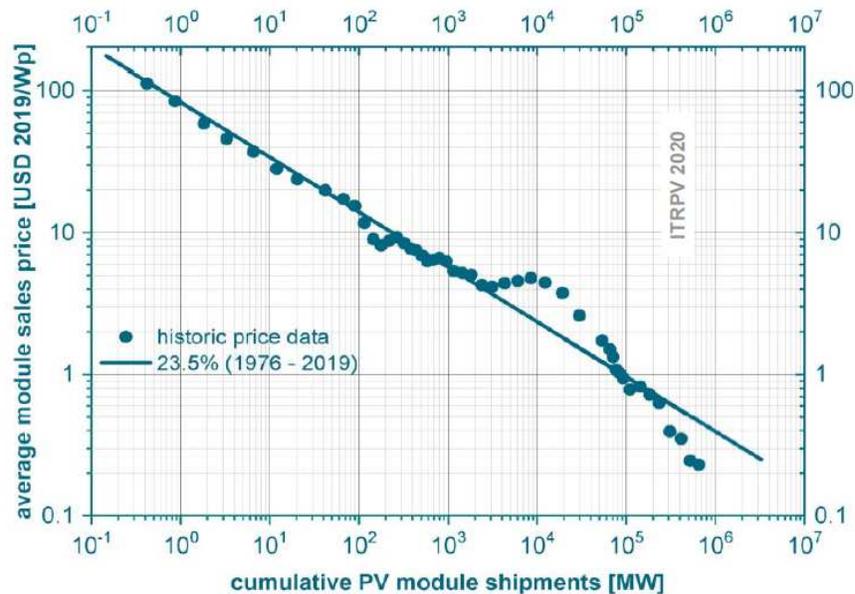
⁴ Los datos y resultados relacionados con costos y precios son expresados en unidades de dólares constantes de 2013 (USD).

integración de eslabones (f_{int}), así como de los incrementos en la capacidad de producción (f_{prod}) de la CVIFM. Por lo que f viene definido por:

$$f = f_{int} + f_{prod} \quad (2)$$

Para el Escenario Base f_{int} se determina a partir de la curva de experiencia de precio para módulos fotovoltaicos (MFVs) (Figura 33), la cual indica que, por cada duplicación acumulada en la demanda global de MFVs, el precio de venta promedio de esta tecnología fotovoltaica disminuye según una cierta tasa de aprendizaje (LR).

Figura 33. Curva de aprendizaje del precio de módulo FV en función de la demanda global.

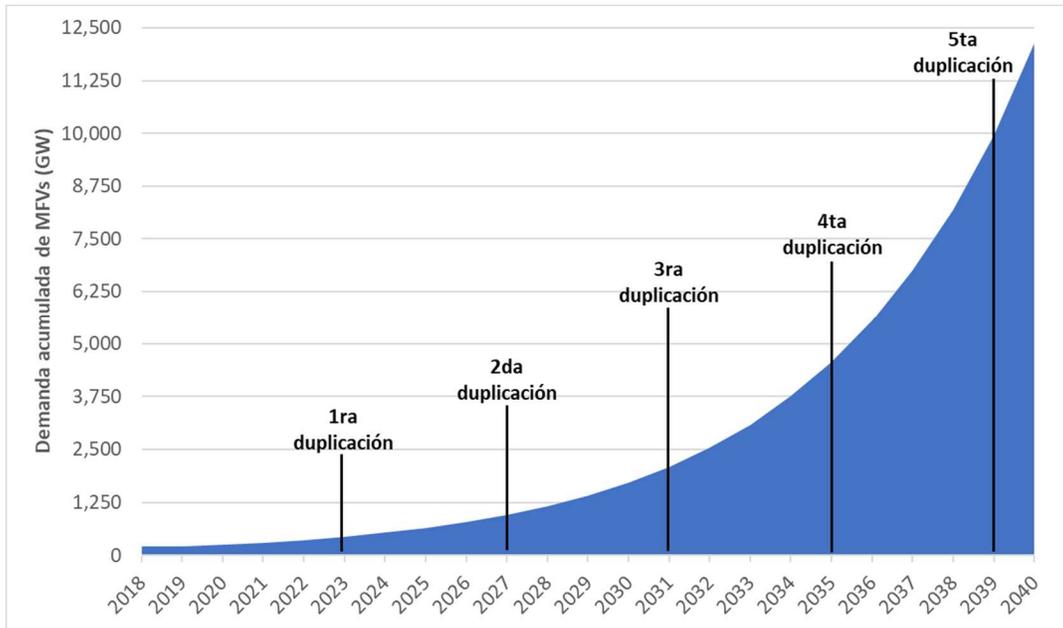


Fuente: (ITRPV, 2019) (ITRPV, 2020)

Diferentes análisis que cubren diferentes períodos de tiempo históricos indican que la tasa de aprendizaje de la tecnología fotovoltaica puede encontrarse entre un 23% y un 40% (VDMA, 2019) (VDMA, 2020). En el presente estudio, se asume que dicha LR es del 23%. De acuerdo con información de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2020), se estima que la demanda acumulada de módulos solares fotovoltaicos a nivel mundial podría experimentar alrededor de 5 duplicaciones a lo largo del periodo de estudio, como se muestra en la Figura 34. Por lo que la LR considerada se aplicará en el año que ocurra cada duplicación. Ya que el escenario base considera

solamente el ensamblaje de MFVs, la LR propuesta es aplicada únicamente a los componentes que no se manufacturan en México y se adquieren directamente en el mercado, en este caso, la celda fotovoltaica, la cual representa aproximadamente el 47% del costo total de fabricación de un MFV (VDMA, 2020) y que para el año de referencia (2018), su costo 0.094 USD/W (VDMA, 2020).

Figura 34. Demanda acumulada de MFVs a nivel mundial 2018 – 2040.



Fuente: Elaboración propia con información de (IEA, 2020).

En lo que respecta al Escenario Alternativo, f_{int} se calcula a partir de simular el costo de fabricación una completa integración de la CVIFM en el año de referencia (2018). Y, así mismo, en línea con la información referente al progreso tecnológico de la industria fotovoltaica de (VDMA, 2020; VDMA, 2019), se simula la misma integración hacia el último año del periodo de estudio (2040). Como f_{int} es un valor progresivo que depende de la integración de eslabones a la CVIFM y del año en que se presente dicha integración, f_{int} se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$f_{int} = \sum_1^p f_{y_p} = \left(\frac{f}{p}\right) * \left(\sum_1^p y_{p>0} - y_{p=0}\right) * \left(\sum_i^n \frac{CPB_i}{CTP_{MFV}}\right) \quad (3)$$

Donde:

p = Cantidad de años del periodo de análisis, $p = 22$.

y_p = Año del periodo en el que se realiza la integración de uno o varios eslabones a la CVIFM.

f_{y_p} = Proporción del factor de reducción correspondiente al año en que se realiza la integración de uno o varios eslabones a la CVIFM.

i = Eslabón de la cadena de valor de la industria fotovoltaica.

n = Número de eslabones considerados para la cadena de valor de la industria fotovoltaica: 1) silicio de grado metálico (MG-Si), 2) Polisilicio (Poly-Si), 3) lingote de silicio y obleas de silicio, 4) celdas fotovoltaicas y 5) módulos fotovoltaicos.

CPB_i = Costo de producción del eslabón i de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

CTP_{MFV} = Costo total de producción del bien final de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México (módulo fotovoltaico).

De esta manera, estimamos que el f_{int} derivado del progreso tecnológico para la CVIFM es de 0.355 para el periodo 2018 – 2040 (Tablas 17 y 18).

Tabla 17. Cambio en variables técnicas y económicas derivado del progreso tecnológico considerando una completa integración de la CVIFM en 2018 y en 2040.

Variable	Costo/Parámetro		Unidad	Referencia
	2018	2040		
Eficiencia del módulo	18.4	24	%	(Woodhouse, et al., 2019); (VDMA, 2020)
Consumo total de Poy-Si	0.085	0.065	g/μm	
Uso de Poly-Si por celda	3.0	1.5	g/W	
Grosor de la CFV	160	120	μm	
No. de Celdas FV	60		Celdas	
Potencia del Módulo FV	310	398	Wp	
Electricidad	0.035	0.024	USD/W	
Depreciación	0.057	0.020		
Mano de Obra	0.016	0.013		
Operación y Mantenimiento	0.018	0.010		
Rendimiento total de los equipos	96	99	%	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Cambio en el costo total de manufactura derivado del progreso tecnológico considerando una completa integración de la CVIFM en 2018 y en 2040.

Eslabón de la CVIFM	Costo total de manufactura		Unidad	Referencia
	2018	2040		
MG-Si	0.015	0.013	USD/W	Cálculos propios basados en (Woodhouse, et al., 2019); (VDMA, 2020); (CFE, 2019b); (SNE, 2019); (INEGI, 2020)
Poly-Si	0.048	0.02		
Lingote y Oblea	0.035	0.015		
Celda FV	0.087	0.06		
Módulo FV	0.122	0.09		
Total	0.307	0.198		

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a f_{prod} , el mismo cálculo es realizado tanto para el Escenario Base como para el Escenario Alternativo, y viene dado por la siguiente ecuación (P. D. Maycock, 1997)(Nemet, 2006)(Kavlak et al., 2018):

$$f_{prod} = - \left(\frac{S_{yp2}}{S_{yp1}} \right)^{-b} * \left(\frac{\Delta C_{O\&M_{yp2-yp1}} + \Delta C_{MO_{yp2-yp1}} + \Delta C_{D_{yp2-yp1}}}{CTP_{MFV_{yp1}}} \right) \quad (4)$$

Donde:

S_{yp2} = Capacidad de fabricación en el año del incremento.

S_{yp1} = Capacidad de fabricación en el año de referencia.

Factor de escalamiento, $b = 0.376$; el cual es obtenido a partir del valor de LR considerado a través de la relación $LR = (1 - PR) = (1 - 2^{-b})$ (P. D. Maycock, 1997)(Kavlak et al., 2018).

p = Cantidad de años del periodo de análisis, $p = 22$.

$\Delta C_{O\&M_{yp2-yp1}}$,

$\Delta C_{MO_{yp2-yp1}}$,

$\Delta C_{D_{yp2-yp1}} =$

Cambio en los costos de O&M, mano de obra y depreciación entre los años de incremento de capacidad y el año de referencia.

CTP_{MFVyp1} = Costo total de producción del bien final de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México (módulo fotovoltaico) en el año de referencia.

Los costos de inversión (capex) necesarios para incrementar la capacidad de producción, así como para la integración de eslabones a la cadena de valor de la industria fotovoltaica, para los años de referencia y final, se muestran en la Tabla 19. De acuerdo con (Woodhouse et al., 2019)(Powell et al., 2015)(Goodrich et al., 2013)(Goodrich, James, & Woodhouse, 2011)(Maycock & Bradford, 2007) se estima que el capex para equipamiento disminuye a razón de 7.4% promedio anual, mientras que el capex para instalaciones, aumenta a razón de 2.4% promedio anual.

Tabla 19. Capex por eslabón de la cadena de valor de la industria fotovoltaica para el año de referencia.

Eslabón	Costo (USD/W) ₂₀₁₈		Costo (USD/W) ₂₀₄₀		Referencias
	Equipo	Instalaciones	Equipo	Instalaciones	
MFV	0.05	0.04	0.009	0.068	(Maycock & Bradford, 2007); (Kreutzmann & Schmela, 2008); (Goodrich, James, & Woodhouse, 2011); (Goodrich et al., 2013)(PCC, 2013) (Powell et al., 2015)(Woodhouse et al., 2019) (PCC, 2020) (MississippiSilicon, 2020)
CFV	0.08	0.06	0.015	0.102	
Lingote y Oblea	0.05	0.02	0.009	0.034	
Poly-Si	0.14	0.05	0.025	0.078	
MG-Si	0.02	0.01	0.004	0.014	

Al igual que con f_{int} el valor de f_{prod} es progresivo y depende del incremento en la capacidad de producción de la CVIFM y del año en que se presente dicho incremento. De esta manera el costo de producir el bien final de cada eslabón de la CVIFM en cualquier periodo viene dado por:

$$CPB_{ip} = [CPB_{ip} * (1 - f_p)] \quad (5)$$

7.3.2 Modelo del Precio Mínimo Sostenible (MSP).

La estimación del precio de venta para cada uno de los productos manufacturados a través de los eslabones de la CVIFM, descritos anteriormente, se realizó mediante el modelo del precio mínimo sostenible de venta (MSP) (Powell et al., 2013)(Fu, James, & Woodhouse, 2015b)(Needleman et al., 2016). Dicho MSP se considera como un *precio de transferencia* (Lal & Srivastava, 2009; Horngren et al., 1993) entre cada eslabón de la cadena de valor y cuya suma determina el precio de venta del producto final de la cadena de valor de la industria fotovoltaica mexicana que se va progresivamente integrando y expandiendo su producción. El modelo MSP estima el precio mínimo al que un fabricante puede mantener financieramente la producción y venta de un bien. Mediante este modelo, se evalúa el valor de una inversión determinada mediante la simulación de un flujo de efectivo descontado (CF_p) para la operación de la hipotética CVIFM. A través de este CF_p , el precio del producto (MSP) se establece cuando el valor presente neto de los flujos de efectivo futuros generados a partir de las ventas (producto del MSP por la capacidad de producción de la planta) y las operaciones continuas de dicha planta a través del periodo (p) sean igual a cero, con una tasa de descuento que iguale el costo promedio ponderado de capital (WACC; w) (Needleman et al., 2016) (Fu et al., 2015b) (Powell et al., 2013), el cual es específico para cada eslabón de la cadena de valor (i) y acorde al subsector (s) de la industria al que pertenezca (Anexo 1, Tabla A1), como muestra la siguiente ecuación:

$$CF_{ip \geq 1} = \sum_i^n \sum_1^p MSP_{ip} - \sum_i^n \sum_1^p \frac{CF_{ip}}{(1 + w_s)^p} = 0 \quad (6)$$

El flujo de efectivo (CF_t) a partir del cual se estima el MSP considera las inversiones realizadas, los ingresos por las ventas, aquellos costos que varían de acuerdo con el nivel de producción, así como la depreciación de los equipos y de las instalaciones (Tabla 20). Y se definen mediante la siguiente ecuación:

Para $p \geq 1$

$$CF_{ip \geq 1} = R_{ip} - CPB_{ip} - T - N_{ip} - IC_{ip} + D_{ip} \quad (7)$$

Donde:

- R_{ip} = Ingresos (ventas netas) del eslabón i . Los ingresos resultan del producto del MSP por la capacidad de producción de la planta.
- CPB_{ip} = Costo de producción del bien final del eslabón i en el periodo p . Incluye costos de materiales e insumos, costos de O&M y costos de mano de obra. No incluye el costo de depreciación.
- T = Impuesto sobre los ingresos = 30%.
- D_{ip} = Costo de depreciación del eslabón i . Se considera que el costo de inversión efectuado en equipos e instalaciones se amortiza de manera lineal a lo largo del periodo de estudio de acuerdo con su vida útil. No se incluye en el costo de producción para mostrar una adecuada representación del flujo de efectivo a lo largo del periodo de estudio.
- $-IC_{ip=0}$ = Costo de inversión para el eslabón i . También conocido como *costo de capital* (Weil et al., 2014), se define como la suma de las inversiones destinadas a la construcción y el equipamiento de las instalaciones necesarias para la integración y/o incremento de la capacidad de fabricación de la CVIFM.
- $-N_{ip=0}$ = Cambio en los requisitos de capital de trabajo neto (NWC, por sus siglas en inglés) para el eslabón i . El NWC mide la cantidad de activos a corto plazo que deben reservarse para financiar las operaciones en curso del negocio, como la compra de materiales y el pago de trabajadores, cuando los ingresos se retrasan en relación con los costos, ante una nueva inversión (Powell et al., 2013; 2015; Weil et al., 2014). El NWC requerido se establece como la diferencia entre la suma algebraica de 3 meses de activos y pasivos corrientes del año en curso con respecto al año anterior (Fazzari & Petersen, 1993).

Tabla 20. Tasa de descuento y número de periodos por eslabón para elaborar el flujo de efectivo.

Eslabón de la Cadena de Valor de la Industria	Depreciación del equipo (años)	Depreciación de la planta (años)	Subsector	WACC (%)
Fotovoltaica				
MG-Si	10	25	Recursos básicos	9.94
Poly-Si	10	25	Químico	10.81
Lingote	10	25	Tecnológico	11.10
Oblea de silicio	7	25	Tecnológico	11.10
Celda fotovoltaica	5	25	Tecnológico	11.10
Módulo fotovoltaico	5	25	Tecnológico	11.10

Fuente: (WACC Expert, 2019)(Powell et al., 2019)(Kreutzmann & Schmela, 2008)

El procedimiento descrito anteriormente, se realiza individualmente para cada uno de los eslabones de la cadena de valor, debido a la diferencia en el tiempo de depreciación de los equipos usados por cada eslabón.

Finalmente, el MSP total para toda la CVIFM es determinado a partir de la suma del MSP de cada eslabón (i) de los cinco eslabones (n) considerados para “aguas arriba” de la cadena de valor de la industria fotovoltaica, como sigue:

$$MSP_{Total\ CVIFM} = \sum_i^n MSP_i \quad (8)$$

7.3.3 Modelo de Proporción de Contenido Nacional.

La proporción de contenido nacional se define como el porcentaje que representa el valor de los materiales y la mano de obra directos nacionales utilizados en la fabricación de un bien, sobre el costo total de producción del bien final (DOF, 2014b)(DOF, 2010)(DOF, 2000). De acuerdo a esta definición, la proporción de contenido nacional de la cadena de valor de la industria fotovoltaica desarrollada en México ($PCN_{Total\ CVIFM}$) es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$PCN_{Total\ CVIFM} = \sum_{i=1}^n PCNB_i * \left(\frac{CPB_i}{CTP_{MFV}} \right) \quad (9)$$

Donde:

$PCNB_i$ = Proporción de contenido nacional en el bien final del eslabón i de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

CPB_i = Costo total de fabricación del bien final del eslabón i .

CTP_{MFV} = Costo total de fabricación del bien final de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México (módulo fotovoltaico).

n = Número de eslabones considerados para la cadena de valor de la industria fotovoltaica: 1) silicio de grado metálico (MG-Si), 2)

Polisilicio (Poly-Si), 3) lingote de silicio y obleas de silicio, 4) celdas fotovoltaicas y 5) módulos fotovoltaicos.

Para continuar con el cálculo del $PCN_{Total\ CVIFM}$, la proporción de contenido nacional en el bien final del eslabón i ($PCNB_i$) de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México, viene dado por:

$$PCNB_i = \frac{(PCMN_i * CPB_i) + CMO_i}{CPB_i + CMO_i} \quad (10)$$

Donde:

$PCMN_i$ = La proporción del valor de los materiales nacionales utilizados para fabricar el bien i de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

CPB_i = Costo total de producción para fabricar el bien i .

CMO_i = Costo total de la mano de obra nacional empleada para fabricar el bien i .

Con:

$$PCNM_i = 1 - \left[\left(\frac{\sum_{j=1}^k VIM_j}{CPB_i} \right) \right] \quad (11)$$

Donde:

VIM_j = Valor de los materiales importados utilizados para fabricar el bien i de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

CPB_i = Costo total de producción para fabricar el bien i .

k = Número de materiales importados utilizados para fabricar el bien i de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México.

De lo anterior, se entiende que a medida en la que se va sustituyendo el valor de los materiales importados a lo largo de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México. La proporción de contenido nacional en el bien final se va aproximando a 1.

7.3.4 Beneficios socioeconómicos.

La cuantificación del impacto económico y social, asociado al desarrollo de una cadena de valor de la industria fotovoltaica en México, en términos del valor agregado y generación de empleos se realiza a través de un modelo Input-Output, el cual es una técnica estándar y ampliamente utilizada para cuantificar el impacto económico de actividades económicas e inversiones en infraestructuras (Torre Cepeda, Alvarado Ruiz, & Quiroga Treviño, 2017). En dicho modelo se emplea en este artículo la última matriz simétrica insumo-producto de coeficientes técnicos directos e indirectos, distribuida en 262 filas y 262 columnas por rama del Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN), elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017). Con dicha matriz, se genera una *matriz de requerimientos totales* (L) a partir de la cual se pueden determinar los efectos exógenos de una nueva inversión (IC) sobre el valor agregado (ΔVA) y el empleo (ΔE) en cada una de las ramas antes mencionadas, mediante la obtención de los multiplicadores de valor agregado (MVA) y del empleo (ME).

La cuantificación de los beneficios socioeconómicos inicia suponiendo que la economía consta de 262 ramas sectores, donde la rama l distribuye el valor de su producción x_l de un periodo, entre las ventas a otros sectores productivos (z_{lj}) y la demanda final (y_l):

$$x_l = \sum_{j=1}^{262} z_{lj} + y_l \quad (12)$$

Un supuesto fundamental del enfoque insumo-producto, es que el flujo de bienes y servicios del sector l que demanda el sector j (z_{lj}) en un periodo dado, depende exclusivamente de la producción total de j (x_j), expresando esta relación de la siguiente manera:

$$a_{lj} = \frac{z_{lj}}{x_j} \quad (13)$$

donde a_{lj} es un coeficiente que captura, para el sector j , una relación fija entre el nivel de producción de j y el insumo l utilizado para obtener dicha producción. A estos coeficientes se les denomina *coeficientes técnicos fijos*. Cabe destacar que los coeficientes técnicos fijos implican que todos los sectores productivos tienen funciones de producción tipo Leontief y, por tanto, el presente artículo considera que los sectores productivos poseen rendimientos constantes a escala. Una vez que se adopta el supuesto de una función de producción con coeficientes fijos y considerando la relación establecida en la ecuación (a1), esta puede reescribirse como sigue:

$$x_l = \sum_{j=1}^{262} a_{lj} * x_j + y_l \quad (14)$$

Reacomodando y agrupando x_l en la ecuación (a9), se tiene que:

$$\sum_{j=1}^{262} (1 - a_{lj})x_j = y_l \quad (15)$$

Si definimos a:

$\mathbf{1}$ como la matriz identidad 262×262 (\mathbf{I}).

\mathbf{a}_{lj} como la matriz de coeficientes fijos 262×262 (\mathbf{A}).

\mathbf{x}_j como el vector de producción bruta 262×1 (\mathbf{X}).

\mathbf{y}_l como el vector de demandas finales $n \times 1$ (\mathbf{Y}).

Entonces (a4) puede expresarse como:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{A}) * \mathbf{X} = \mathbf{Y} \quad (16)$$

Finalmente, despejando para \mathbf{x} tenemos que:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} * \mathbf{Y} = \mathbf{L} * \mathbf{Y} \quad (17)$$

donde \mathbf{L} es conocida como la *matriz inversa de Leontief* o *matriz de requerimientos totales*. La importancia de esta matriz radica en que permite identificar el efecto de impactos exógenos sobre la producción bruta a través de los llamados *efectos multiplicadores*. Estos efectos multiplicadores se clasifican en *directo* (que es el efecto sobre el sector económico que recibe el impacto exógeno), e *indirecto* (el efecto que el sector impactado ejerce sobre el resto de los sectores de la economía con los que interactúa); mientras que a su suma se le conoce como *multiplicador total*.

La intuición detrás de estos multiplicadores es que cuando un sector experimenta un impacto exógeno positivo, se genera una mayor actividad productiva en ese mismo sector (efecto directo), lo cual ocasiona, a su vez, que este demande más compras de insumos intermedios a otros sectores de la economía involucrados en el proceso productivo (efecto indirecto), y así sucesivamente. Para nuestro caso, lo anterior significa determinar el impacto, en cada uno de los distintos sectores, de cada dólar (\$) invertido por cada unidad producida (W). Este proceso continúa de tal forma que la producción en la economía se incrementa en un monto mayor al impacto inicial, lo que genera, a su vez, mayor valor agregado y más fuentes de empleo en la economía.

Una vez determinado el multiplicador total, se procede a determinar los multiplicadores de empleo y valor agregado.

La derivación de los multiplicadores para el Valor Agregado (VA) y el Empleo (E) ante un choque exógeno en una rama j implica que:

$$\Delta X = (I - A)^{-1} * \Delta Y_j = L * \Delta Y_j \quad (18)$$

Note que el choque exógeno en la rama j (ΔY_j) tiene un efecto todos los sectores de la economía (X), y por ello la expresión anterior hace referencia al cambio en la producción bruta de la economía en su conjunto (ΔX) y no al observado en una rama específica j de esta (ΔX_j). Esta consideración igualmente aplica para el valor agregado (VA), así como para el empleo (E). Considerando lo anterior, ante un choque exógeno en la demanda final de una rama j , se tienen las siguientes definiciones:

- 1. Multiplicador del valor agregado:** Este multiplicador captura los efectos sobre valor agregado en los l sectores de la economía ante un choque exógeno en un sector j (es decir, ante un ΔY_j). Se obtiene de sumar los elementos de la columna j de la matriz A de VA (MVA), la cual se define, a su vez, como:

$$MVA = v_j * (I - A)^{-1} = v_j * L \quad (19)$$

donde L es la matriz inversa de Leontief y v_j es una matriz que contiene en su diagonal principal el cociente de valor agregado a producción bruta para cada rama j , como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$v_j = I * \left(\frac{VA_j}{X_j} \right) = \begin{pmatrix} v_{1j} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & v_{262j} \end{pmatrix} \quad (19.1)$$

$$L = \begin{pmatrix} \gamma_{1l} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \gamma_{262l} \end{pmatrix} \quad (19.2)$$

$$MVA = \begin{pmatrix} mva_{11} & \dots & mva_{1\ 262} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ mva_{262\ 1} & \dots & mva_{262\ 262} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{1j} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & v_{262j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \gamma_{262\ 262} \end{pmatrix} \quad (19.3)$$

Por lo que el multiplicador de valor agregado (MVA) está dado por:

$$MVA = \sum_l^{262} mva_{lj} \quad (20)$$

- 2. Multiplicador del empleo:** El multiplicador del empleo (ME) captura el incremento en el empleo en las j ramas de la economía que resulta ante un choque exógeno en la rama j (ΔY_j). El efecto se obtiene de sumar los elementos de la columna j de la matriz A de E (ME), definida como:

$$ME = e_j * (I - A)^{-1} = e_j * L \quad (21)$$

donde L es la matriz inversa de Leontief y e_j es una matriz que contiene en su diagonal principal el número de personas ocupadas en la rama j divididos por la producción bruta de dicho sector:

$$e_j = I * \left(\frac{E_j}{X_j} \right) = \begin{pmatrix} e_{1j} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e_{262j} \end{pmatrix} \quad (21.1)$$

$$L = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \gamma_{262l} \end{pmatrix} \quad (21.2)$$

$$ME = \begin{pmatrix} me_{11} & \dots & me_{1262} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ me_{2621} & \dots & me_{262262} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{1j} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e_{262j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \gamma_{262262} \end{pmatrix} \quad (21.3)$$

De esta manera, el multiplicador de empleo (ME) está dado por:

$$ME = \sum_l^{262} me_{lj} \quad (22)$$

De lo anterior se puede entender que el efecto multiplicador sobre la producción bruta (capturado por L), se pondera por la participación del valor agregado y del empleo en la producción bruta de cada rama j . Es decir, ante incrementos en la producción bruta de la rama j , se incrementa la demanda de bienes en las diferentes ramas l , lo que causa que el valor agregado y el número de empleos se distribuya entre las distintas ramas a los que se les compran insumos.

Finalmente, la cuantificación de los beneficios relacionados con el valor agregado y el empleo vienen dados por:

$$VA_{total} = \sum \Delta VA_{ij} = MVA_j * \sum_1^p IC_i \quad (23)$$

$$E_{total} = \sum \Delta E_{ij} = ME_j * \sum_1^p IC_i \quad (24)$$

Donde:

ΔVA_{ij} = Incremento en el valor agregado de la rama j derivado de la integración y/o aumento de capacidad en el eslabón i de CVIFM.

MVA_j = Multiplicador del valor agregado de la rama j . Para más detalle sobre la obtención de este multiplicador, véase el Anexo.

ΔE_{ij} = Incremento en el número de empleados de la rama j derivado de la integración y/o aumento de capacidad en el eslabón i de CVIFM. Para más detalle sobre la obtención del ME, véase el Anexo.

ME_j = Multiplicador del empleo de la rama j . Para más detalle sobre la obtención de este multiplicador, véase el Anexo.

IC_i = Inversión necesaria para la integración y/o aumento de capacidad del eslabón i a la CVIFM.

p = Número de años del periodo de análisis; $p = 22$

Capítulo 8. Resultados.

8.1 Año de Referencia.

Como se mencionó anteriormente, para el año de referencia se considera la situación actual de la CVIFM, la cual se compone de manera ascendente, únicamente por el eslabón de ensamblaje de módulos fotovoltaicos (MFV). De acuerdo con los resultados obtenidos, el costo total (*CT*) de elaborar un módulo fotovoltaico en México en el año de referencia (2018) es de 0.217 \$/W, como se muestra en la Tabla 21. Así mismo, se estima que el precio mínimo de venta es de 0.249 \$/W, donde el costo representa el 87% del valor final del MFV.

Tabla 21. Costo de manufactura de un MFV en México en 2018.

Insumo/componente	Costo (\$/W)	Participación en el costo total (%)
Celda FV	0.0940	43.4
Vidrio	0.0209	9.7
Marco de aluminio	0.0254	11.7
Encapsulante	0.0114	5.3
JB y Cables	0.0154	7.1
Tableado	0.0088	4.1
Hoja posterior (EVA)	0.0123	5.7
Cintas conectoras	0.0049	2.2
Empaque	0.0025	1.1
Depreciación	0.0120	5.5
Mantenimiento	0.0032	1.5
Mano de Obra	0.0039	1.8
Electricidad	0.0021	1.0
Total	0.217	100.0

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la proporción de contenido nacional (PCN) de la CVIFM, se estima que para el año de referencia, esta tiene un valor del 8%, considerando la mano de obra y de un 6% si se considera únicamente el costo de los materiales, como se muestra en la Tabla 22. Esto derivado de la poca utilización de materiales nacionales en la fabricación de los MFV.

Tabla 22. Proporción de Contenido Nacional de la CVIFM en el año de referencia.

Tipo de proporción de contenido nacional	Eslabón de la CVIFM
	MFV
PCNM	0.06
PCNB	1.0
PCN	0.08

Fuente: Elaboración propia

8.2 Escenario Base.

De acuerdo con las prospectivas nacionales (SENER, 2019b) (CENACE, 2019) (CFE, 2019^a) (CRE, 2020) la generación de electricidad en México, aumentará a una tasa promedio anual del 3.4%, y para estar en línea con la NDC de México presentada en el Acuerdo de Paris, se estima que la capacidad instalada de energía fotovoltaica debe aumentar a una tasa promedio anual del 12.4% para alcanzar los 82,299 MW, a partir de la cual se generaran 165,816 GWh hacia el año 2040. Significando el 21.8% de la generación total de energía eléctrica del país. Y con lo cual México generaría más del 47% de su electricidad mediante el uso de energías limpias hacia el final del periodo de estudio (Tabla 23).

Tabla 23. Capacidad instalada, generación de electricidad y emisiones de GEI con base en las perspectivas nacionales, 2018 – 2040.

	2018	2024	2030	2040
Capacidad acumulada (MW)				
Energía Convencional	54,492	70,426	78,403	95,704
Solar FV	6,293	17,582	26,740	82,299
<i>Centralizada</i>	5,377	15,254	20,824	54,299
<i>Distribuida</i>	916	2,328	5,916	28,000
Otras Energías Limpias	18,714	32,374	38,940	56,643
Generación acumulada (GWh)				
Energía Convencional	232,995	270,543	308,958	402,367
Solar FV	4,042	30,606	53,876	165,816
<i>Centralizada</i>	3,454	26,554	41,956	109,402
<i>Distribuida</i>	588	4,052	11,920	56,414
Otras Energías Limpias	79,704	118,988	142,919	193,255
Participación en generación (%)				
Energía Convencional	73.7	64.4	61.1	52.8
Solar FV	1.3	7.3	10.7	21.8
Otras Energías Limpias	25.0	28.3	28.2	25.4
Emisiones GEI (MtCO_{2e})				
Sin incremento de energías limpias	102.0	121.8	145.4	195.4
Con incremento de energías limpias	102.0	89.0	99.0	107.0
Emisiones acumuladas (MtCO_{2e})				

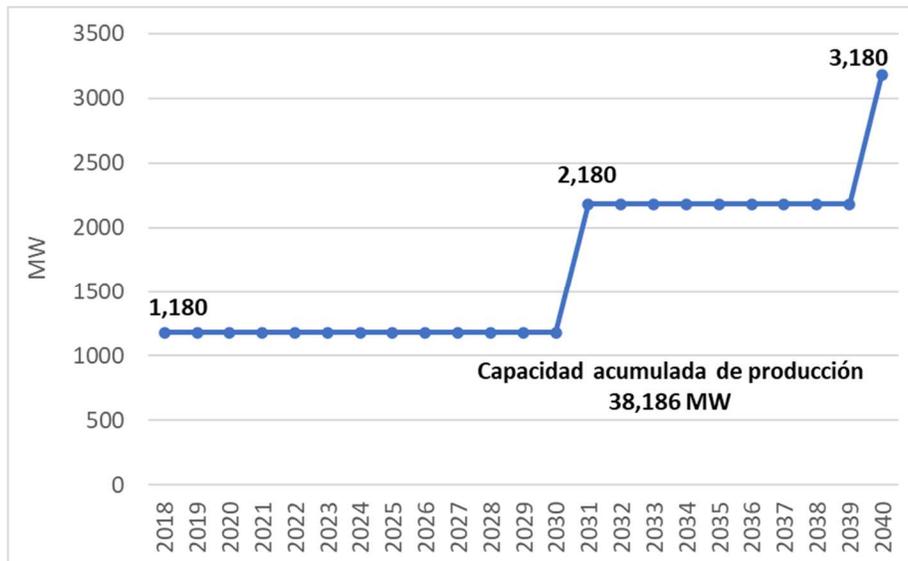
Sin incremento de energías limpias	102.0	767.5	1,534.8	3,083.1
Con incremento de energías limpias	102.0	634.5	1,195.3	2,228.6

Fuente: Elaboración propia con información de (SENER, 2019)

(CENACE, 2019)(CFE, 2019a)(CRE, 2020).

En línea con lo anterior, y de acuerdo con los datos históricos obtenidos sobre las capacidades de ensamble de MFV en México (Tabla 14), se estima que, para este escenario, la capacidad de ensamble de MFV crecerá a una tasa promedio anual de 4.6%. Con base en este crecimiento, se determina que la CVIFM en este escenario alcanzará una capacidad de ensamblaje de MFV de 3,182 MW/año hacia el 2040, teniendo incrementos de 1GW en la capacidad de producción en los años 2031 y 2040. Lo que resulta en una capacidad acumulada de producción de 38,186 MW, como se muestra en la Figura 35.

Figura 35. Evolución de la capacidad de producción de la CVIFM en el Escenario Base, 2018 - 2040.

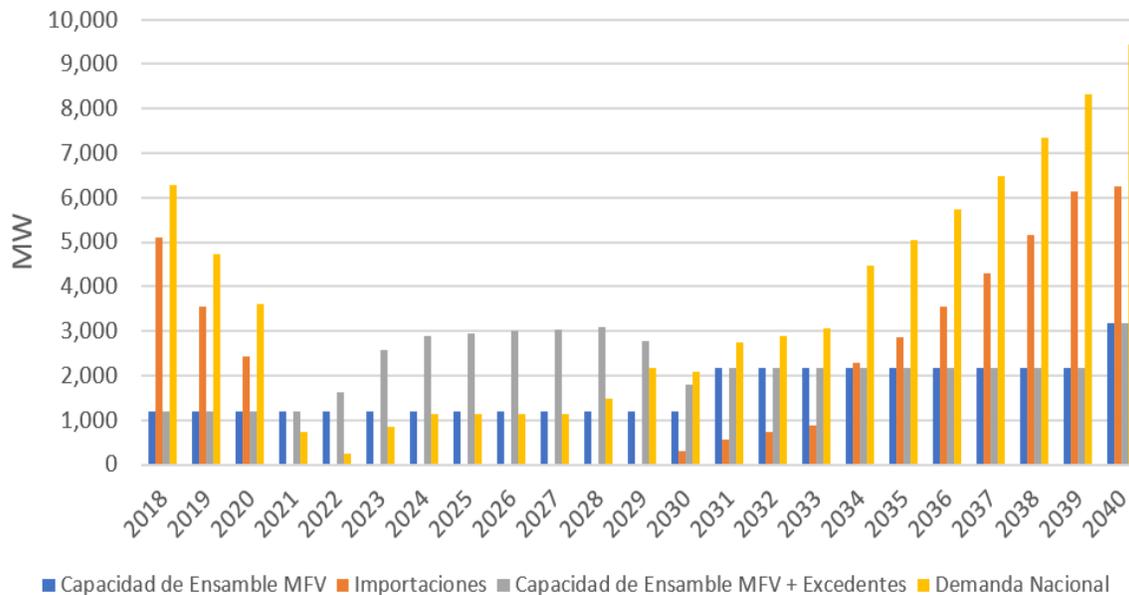


Fuente: Elaboración propia

Con dicha capacidad de producción se podría cubrir el 46.4% de la demanda nacional acumulada de MFV para cumplir con las metas nacionales, teniendo que importar el 53.6%. La Figura 36 muestra la evolución anual de la capacidad de producción de la CVIFM y sus excedentes, así como

las importaciones en relación con la demanda nacional de tecnología fotovoltaica (véase también Tabla 24).

Figura 36. Evolución anual de capacidad de ensamble, demanda e importaciones de MFV en el Escenario Base en México, 2018 – 2040.



Fuente: Elaboración propia

En relación con los costos de ensamble y precios de venta del presente escenario, el costo de ensamblar un MFV en México decrece en un 52% durante el periodo de análisis, al pasar de 0.217 USD/W en 2018 a 0.105 USD/W en 2040. Dicha reducción se debe principalmente a que el único insumo que reduce su costo en el presente escenario, derivado de un progreso tecnológico, es la celda fotovoltaica (CFV), al pasar de 0.094 USD/W en 2018 a 0.045 USD/W en 2040. Y a que su participación dentro del costo total de ensamblaje se mantiene constante (43%) durante todo el Escenario Base. Con respecto al MSP, este disminuye de 0.249 USD/W a 0.120 USD/W hacia el 2040 (Tabla 24). Siendo este precio un 20% mayor al precio de venta de referencia internacional en el 2040, el cual se estima que disminuya de 0.196 USD/W a 0.1 USD/W hacia el final del periodo.

Tabla 24. Costos de fabricación (USD/W) para un MFV en el Escenario Base.

Año	2018	2031	2040
Eslabón	MFV	MFV	MFV
Capacidad de producción	1,182 MW	2,182 MW	3,182 MW
Material/insumo			
Depreciación	0.0120	0.0120	0.0120
Mantenimiento	0.0032	0.0032	0.0032
Mano de Obra	0.00395	0.00398	0.00400
Electricidad	0.00212	0.00213	0.00239
Celda FV	0.09400 ¹	0.05400 ¹	0.04500 ¹
Vidrio	0.02093 ¹	0.01060 ¹	0.00778 ¹
Marco de aluminio	0.02544 ¹	0.01305 ¹	0.00942 ¹
Encapsulante	0.01139 ¹	0.00528 ¹	0.0043 ¹
JB y Cables	0.01537 ¹	0.00744 ¹	0.00575 ¹
Tableado	0.00880 ¹	0.00387 ¹	0.00336 ¹
Hoja posterior (EVA)	0.01225 ¹	0.00575 ¹	0.00462 ¹
Cintas conectoras	0.00486 ¹	0.00172 ¹	0.00168 ¹
Empaque	0.00247	0.00134	0.00106
Costo Total	0.217	0.124	0.105
MSP	0.249	0.142	0.120

¹Materiales y/o insumos importados

Fuente: Elaboración Propia

Considerando lo anterior, para satisfacer la demanda nacional de tecnología fotovoltaica para la generación de electricidad en el presente escenario, se tienen que invertir un total acumulado de 11,383 MUSD a lo largo del periodo de estudio; donde el 52% corresponde a las ventas totales de la producción de la CVIFM, mientras que el 49% corresponde al valor total de las importaciones de tecnología fotovoltaica (MFV) (véase Tabla 25).

Con respecto a la PCN, esta se mantiene constante con respecto al año de referencia, debido a que el presente escenario no considera la incorporación de más eslabones. Derivado de lo cual se estima que esta tiene un valor de 8%, considerando que la mano de obra es totalmente de origen nacional y de un 6% si se considera únicamente el uso de los materiales. Esto como consecuencia de la nula utilización de materiales nacionales en el ensamble del MFV, ya que se considera que el único insumo nacional es el “empaque”, como se muestra en la anterior Tabla 24.

Tabla 25. Evolución de la capacidad de producción, costos y precios de la CVIFM en el Escenario Base.

Año	Demanda nacional	Capacidad de Producción (MW)	Importaciones	Costo ensamble MFV	Costo CFV (importada) (USD/W)	MSP	Precio Spot Internacional	Valor Ventas (USD x 10 ⁶)	Valor Importaciones
2018	6,293	1,182	5,111	0.217	0.094	0.249	0.196	294.3	1001.8
2019	4,727	1,182	3,545	0.207	0.090	0.237	0.184	280.5	659.5
2020	3,610	1,182	2,428	0.197	0.085	0.226	0.172	266.7	428.7
2021	732	1,182	-	0.187	0.081	0.215	0.161	253.6	-
2022	246	1,182	-	0.178	0.077	0.204	0.151	241.1	-
2023	849	1,182	-	0.167	0.073	0.192	0.141	227.2	-
2024	1,125	1,182	-	0.157	0.068	0.180	0.132	212.7	-
2025	1,142	1,182	-	0.147	0.064	0.168	0.124	199.0	-
2026	1,135	1,182	-	0.137	0.059	0.158	0.116	186.3	-
2027	1,128	1,182	-	0.129	0.056	0.148	0.115	175.0	-
2028	1,494	1,182	-	0.128	0.055	0.147	0.114	173.4	-
2029	2,172	1,182	-	0.127	0.055	0.145	0.113	171.8	-
2030	2,087	1,182	290	0.125	0.054	0.144	0.112	170.3	32.8
2031	2,735	2,182	553	0.124	0.054	0.142	0.110	310.1	61.9
2032	2,902	2,182	720	0.122	0.053	0.140	0.109	305.7	79.7
2033	3,071	2,182	889	0.120	0.052	0.138	0.108	301.3	97.3
2034	4,470	2,182	2,288	0.119	0.051	0.136	0.107	297.0	247.5
2035	5,056	2,182	2,874	0.119	0.051	0.136	0.106	297.7	307.4
2036	5,723	2,182	3,541	0.116	0.050	0.133	0.105	290.3	373.6
2037	6,481	2,182	4,299	0.113	0.049	0.130	0.104	283.1	447.6
2038	7,344	2,182	5,162	0.110	0.048	0.127	0.103	276.1	530.2
2039	8,328	2,182	6,146	0.108	0.047	0.123	0.101	269.3	622.7
2040	9,449	3,182	6,267	0.105	0.045	0.120	0.100	383.1	626.7
Total	82,299	38,186	44,113	-	-	-	-	5,865.4	5,517.4

Fuente: Elaboración Propia

Respecto a los beneficios socioeconómicos, en el presente escenario se puede generar un valor agregado directo de 355.7 MUSD y un valor agregado indirecto de 810.7 MUSD; además de alrededor de 1,025 empleos directos y 43,681 empleos indirectos a lo largo de todo el periodo. La mayor parte tanto del valor agregado indirecto (85%) como de los empleos indirectos generados (84%) corresponden a la industria de la construcción, derivado de los incrementos en la capacidad de producción de la CVIFM, como se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26. Beneficios socioeconómicos totales de la CVIFM en el Escenario Base.

Industria	Multiplicador		Empleos (#)	Valor Agregado (MUSD)
	Empleo	Valor Agregado		
Edificación no residencial	0.00004	0.54	4,255	64.3
Construcción de obras para el suministro de agua, petróleo, gas, energía eléctrica y telecomunicaciones	0.00003	0.49	3,229	57.9
División de terrenos y construcción de obras de urbanización	0.00002	0.47	2,882	55.6
Otras construcciones de ingeniería civil	0.00001	0.45	1,453	53.2
Cimentaciones, montaje de estructuras prefabricadas y trabajos en exteriores	0.00003	0.78	3,192	92.8
Instalaciones y equipamiento en construcciones	0.00007	0.99	8,588	118.4
Trabajos de acabados en edificaciones	0.00006	0.84	7,564	100.7
Otros trabajos especializados para la construcción	0.00005	1.22	5,615	145.5
Fabricación de productos de cartón y papel	0.000029	0.61	257	4.3
Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos	0.000351	6.95	5,004	88.7
Comercio al por menor de abarrotes y alimentos	0.000115	2.30	1,641	29.3
Directos			1,025	355.7
Total			44,706	1,166.4

Finalmente, para la obtención de dichos beneficios durante el presente escenario, se necesita inversión total de \$149,218,456 millones de dólares, tal y como muestra el flujo de efectivo en la Tabla 27.

Tabla 27. Fujo de efectivo para el Escenario Base, 2018 – 2040.

Año	Ingreso Ventas	Costo Fabricación	Depreciación	Ingreso Bruto	Impuestos	Cambio NWC	Inversión Capital	Ingreso Neto	Ganancias retenidas
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	280,543,058	244,353,004	-	36,190,055	10,857,016	-	-	25,333,038	25,333,038
2020	266,709,480	232,303,957	-	34,405,523	10,321,657	-	-	24,083,866	49,416,904
2021	253,558,036	220,849,049	-	32,708,987	9,812,696	-	-	22,896,291	72,313,195
2022	241,055,089	209,958,982	-	31,096,106	9,328,832	-	-	21,767,275	94,080,469
2023	227,222,496	197,910,794	-	29,311,702	8,793,511	-	-	20,518,191	114,598,661
2024	212,650,717	185,218,775	-	27,431,943	8,229,583	-	-	19,202,360	133,801,021
2025	199,013,427	173,340,695	-	25,672,732	7,701,820	-	-	17,970,912	151,771,933
2026	186,250,696	162,224,356	-	24,026,340	7,207,902	-	-	16,818,438	168,590,371
2027	174,961,322	152,391,311	-	22,570,011	6,771,003	-	-	15,799,007	184,389,378
2028	173,377,922	151,012,170	-	22,365,752	6,709,726	-	-	15,656,026	200,045,405
2029	171,808,852	149,645,510	-	22,163,342	6,649,003	-	-	15,514,339	215,559,744
2030	170,253,982	148,291,218	-	21,962,764	6,588,829	4,508,855	73,173,778 ^a	57,799,844	157,759,900
2031	310,063,435	270,065,252	6,640,676	33,357,508	10,007,252	141,994	-	29,848,937	187,608,837
2032	305,660,534	266,230,325	6,640,676	32,789,533	9,836,860	139,977	-	29,453,372	217,062,209
2033	301,320,155	262,449,855	6,640,676	32,229,624	9,668,887	137,990	-	29,063,423	246,125,632
2034	297,041,409	258,723,067	6,640,676	31,677,666	9,503,300	19,979	-	28,835,020	274,960,652
2035	297,660,898	259,262,642	6,640,676	31,757,580	9,527,274	237,109	-	28,633,872	303,594,525
2036	290,308,674	252,858,855	2,664,694	34,785,125	10,435,538	231,253	-	26,783,029	330,377,553
2037	283,138,049	246,613,241	2,664,694	33,860,115	10,158,034	225,541	-	26,141,233	356,518,787
2038	276,144,540	240,521,894	2,664,694	32,957,952	9,887,386	219,970	-	25,515,290	382,034,077
2039	269,323,769	234,581,003	2,664,694	32,078,073	9,623,422	3,667,753	76,044,677 ^b	50,925,333	331,108,744
2040	383,052,532	333,638,755	7,960,029	41,453,748	12,436,124	12,353,444	-	24,624,208	355,732,952
Total									

^aIncremento de capacidad de producción a 2.18 GW

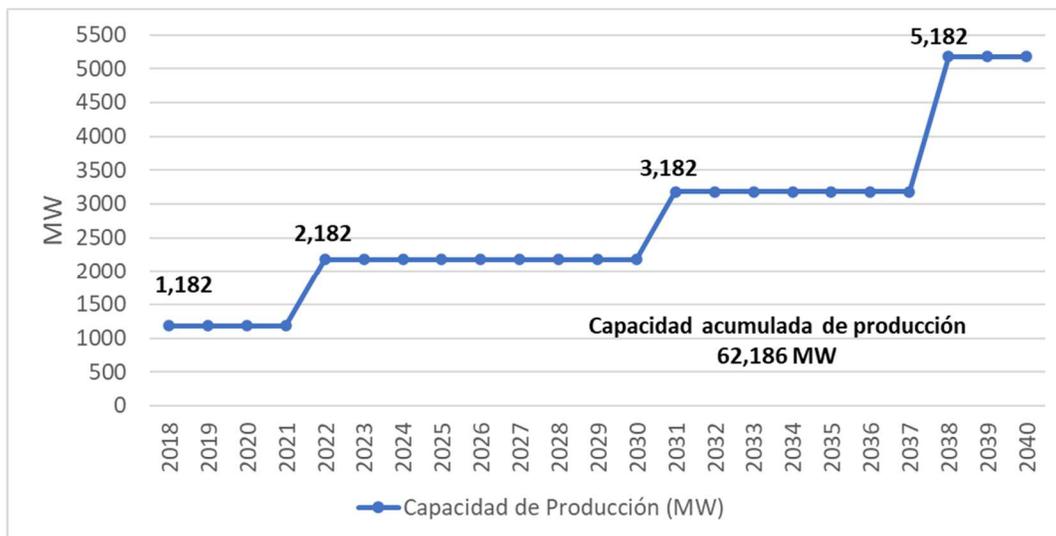
^bIncremento de capacidad de producción a 3.18 GW

Fuente: Elaboración Propia

8.3 Escenario Alternativo

Como se mencionó en la anterior sección 6, la metodología planteada para el Escenario Alternativo además de considerar una total integración de la CVIFM, considera un desarrollo de la misma, incluyendo incrementos en la capacidad de producción. De esta manera se estima que para este escenario, la capacidad de fabricación de MFV crecerá a una tasa promedio anual de 6.9%. Con base en este crecimiento, se determina que la CVIFM alcanzará una capacidad de ensamblaje de MFV de 5,182 MW/año hacia el 2040, teniendo incrementos de 1GW en la capacidad de producción en los años 2022, 2031 y 2040. Lo que resulta en una capacidad acumulada de producción de 62,186 MW, como se muestra en la Figura 37.

Figura 37. Evolución de la capacidad de producción de la CVIFM en el Escenario Alternativo, 2018 -2040.

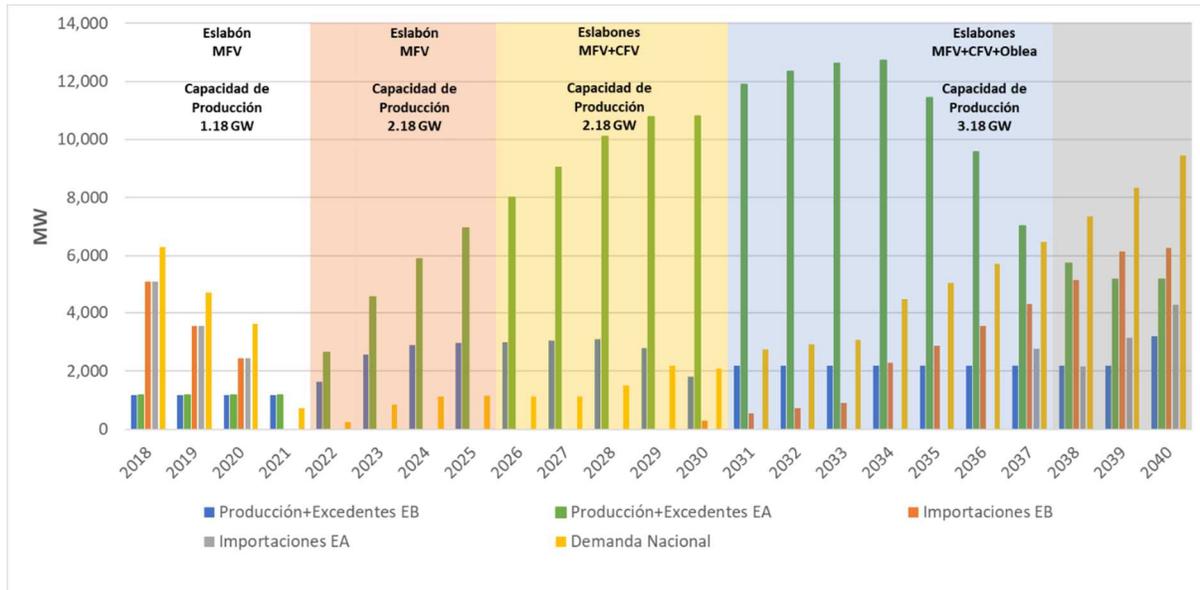


Fuente: Elaboración propia

En línea con lo anterior, el desarrollo de la CVIFM en el presente escenario permite que la integración de la CVIFM comience a presentarse a partir del año del año 2026, integrando primeramente el eslabón correspondiente a la fabricación de celdas fotovoltaicas (CFV). Posteriormente, en el año 2031 se presenta la integración del eslabón específico para la fabricación de Obleas de silicio. Para finalmente, en el año 2038, integrar los dos últimos eslabones de la

cadena de valor de la industria fotovoltaica, los correspondientes la fabricación de Polisilicio (Poly-Si) y Silicio metálico (MG-Si). Llegando hacia el final del periodo con una CVIFM totalmente integrada. La siguiente Figura 38, muestra de manera gráfica, la evolución del desarrollo e integración de la CVIFM a lo largo del periodo de estudio.

Figura 38. Evolución anual de capacidad producción e importaciones de la CVIFM en el Escenario Alternativo y el Escenario Base en relación con la demanda nacional de MFV, 2018 – 2040.



Fuente: Elaboración propia

Además, con el desarrollo previsto para la CVIFM en este escenario y la producción acumulada de 62,186 MW, se podría satisfacer el 76% de la demanda nacional acumulada de MFV hacia el 2040. Dicha producción acumulada es 1.6 veces mayor que la producción acumulada en el Escenario Base. Lo cual, también se refleja en el valor generado por las ventas, el cual es 1.8 veces mayor en comparación con el Escenario Base. Mientras que las importaciones de MFV son 47% menor en el Escenario Alternativo en relación con el Escenario Base, al pasar de 42,113 MW a 23,412 MW. Lo anterior, puede observarse en la siguiente Tabla 28.

Tabla 28. Evolución de la capacidad de producción, costos y precios de la CVIFM en el Escenario Alternativo.

Año	Demanda nacional	Capacidad de Producción	Importaciones	Costo ensamble MFV	MSP	Precio Spot Internacional	Valor Ventas	Valor Importaciones
		(MW)		(USD/W)		(USD x 10 ⁶)		
2018	6,293	1,182	5,111	0.217	0.249	0.196	294.3	1001.8
2019	4,727	1,182	3,545	0.211	0.243	0.184	287.1	659.5
2020	3,610	1,182	2,428	0.205	0.237	0.172	280.0	428.7
2021	732	1,182	-	0.200	0.231	0.161	273.0	-
2022	246	2,182	-	0.183	0.213	0.151	464.2	-
2023	849	2,182	-	0.182	0.212	0.141	462.3	-
2024	1,125	2,182	-	0.181	0.211	0.132	460.4	-
2025	1,142	2,182	-	0.179	0.210	0.124	458.5	-
2026	1,135	2,182	-	0.165	0.193	0.116	422.1	-
2027	1,128	2,182	-	0.163	0.192	0.115	418.6	-
2028	1,494	2,182	-	0.161	0.190	0.114	415.0	-
2029	2,172	2,182	-	0.159	0.189	0.113	411.5	-
2030	2,087	2,182	-	0.157	0.187	0.112	408.0	-
2031	2,735	3,182	-	0.127	0.151	0.110	481.5	-
2032	2,902	3,182	-	0.125	0.150	0.109	476.6	-
2033	3,071	3,182	-	0.123	0.148	0.108	471.7	-
2034	4,470	3,182	-	0.122	0.147	0.107	466.8	-
2035	5,056	3,182	-	0.120	0.145	0.106	462.0	-
2036	5,723	3,182	-	0.119	0.144	0.105	457.3	-
2037	6,481	3,182	2,753	0.117	0.142	0.104	452.6	286.6
2038	7,344	5,182	2,162	0.115	0.140	0.103	724.2	222.1
2039	8,328	5,182	3,146	0.112	0.137	0.101	711.6	318.8
2040	9,449	5,182	4,267	0.110	0.135	0.100	699.3	426.7
Total	82,299	62,186	23,412	-	-	-	10,458.7	3,344.1

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, la Tabla 29 muestra el impacto de la integración de eslabones y/o incrementos en la capacidad de producción sobre los costos de fabricación y el MSP de la CVIFM en el Escenario Alternativo. A lo largo del periodo de análisis, se observa que el costo de fabricación se reduce 49.3% hacia el 2040 con respecto al año de referencia, pasando de 0.217 USD/W a 0.110 USD/W. Lo cual deriva tanto de la completa integración de la CVIFM (35.5%) como de los incrementos en la capacidad de producción (13.8%) a través del periodo; mostrando que la influencia del progreso tecnológico es mayor sobre la reducción de los costos que las economías de escala.

Así mismo, la Figura 39 presenta la evolución en la reducción de los costos de fabricación del Escenario Alternativo, donde se aprecia que resulta en un costo mayor el fabricar un MFV en este escenario respecto al Escenario Base, teniendo su mayor diferencia entre los años 2025 y 2030 del periodo de análisis; promediando una diferencia de 24%.

Tabla 29. Costos de fabricación (USD/W) derivados de la integración ascendente e incrementos de capacidad de producción de la CVIFM en el Escenario Alternativo.

Año	2018	2026	2031	2038	2040
Eslabones	MFV	MFV+CFV	MFV+CFV+Oblea	MFV+CFV+Oblea+Poly-Si+MG-Si	MFV+CFV+Oblea+Poly-Si+MG-Si
Capacidad de producción	1,182 MW	2,182 MW	3,182 MW	5,182 MW	5,182 MW
Material/insumo /parámetro					
Depreciación	0.012	0.012	0.013	0.013	0.013
Mantenimiento	0.003	0.004	0.004	0.006	0.006
Mano de Obra	0.004	0.005	0.004	0.008	0.008
Electricidad	0.002	0.009	0.008	0.014	0.014
SiO ₂	-	-	-	0.00014	0.00010
Carbón mineral	-	-	-	0.00044	0.00035
Madera	-	-	-	0.00042	0.00035
Coque	-	-	-	0.00011	0.00010
Carbón vegetal	-	-	-	0.00034	0.00025
Gas Natural	-	-	-	0.00022	0.00012
Electrodos ¹	-	-	-	0.00189 ¹	0.00172 ¹
Oxígeno	-	-	-	0.00017	0.00015
Lancetas (grafito)	-	-	-	0.0000004 ¹	0.00000 ¹
Agua	-	-	-	0.00132	0.00117
MG-Si	-	-	-	-	0.00000
HCL	-	-	-	0.00411	0.00385
Hidrógeno	-	-	-	0.00008	0.00007
Agua	-	-	-	0.00353	0.00329
Poly-Si	-	-	0.01828 ¹	-	-
Crisol	-	-	0.00395	0.00309	0.00288
Alambre de corte	-	-	0.00242 ¹	0.00210	0.00192
Fluido lubricante p/corte	-	-	0.00411	0.00257	0.00237
Oblea	-	0.03729 ¹	-	-	-
Pastas de aluminio	-	0.00105	0.00077	0.00070	0.00058
Pastas de plata	-	0.00192	0.00135	0.00113	0.00099
Químicos	-	0.02724	0.01827	0.01379	0.01313
Impresión de pastas	-	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
Celda FV	0.09400 ¹	-	-	-	-
Vidrio	0.02093 ¹	0.01397	0.00974	0.00795	0.00753
Marco de aluminio	0.02544 ¹	0.01698	0.01184	0.00966	0.00917
Encapsulante	0.01139 ¹	0.00761	0.00530	0.00433	0.00406
JB y Cables	0.01537 ¹	0.01026	0.00715	0.00584	0.00550
Tableado	0.00880 ¹	0.00587	0.00410	0.00334	0.00311
Hoja posterior (EVA)	0.01225 ¹	0.00818	0.00570	0.00465	0.00437
Cintas conectoras	0.00486 ¹	0.00324	0.00226	0.00184	0.00168
Empaque	0.00247	0.00165	0.00115	0.00094	0.00081
Costo Total	0.217	0.140	0.127	0.115	0.110
MSP	0.249	0.164	0.152	0.140	0.135

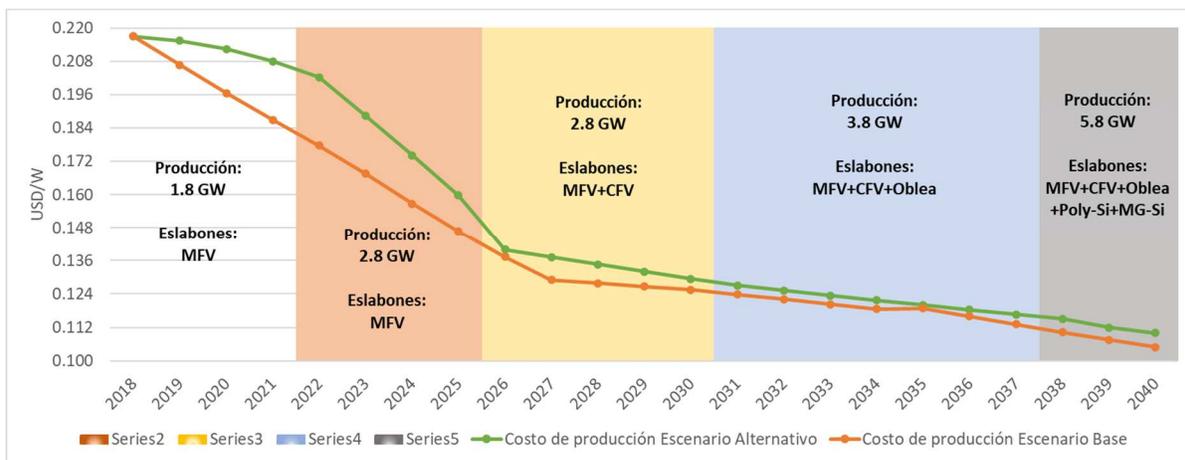
¹ Materiales y/o insumos importados en el desarrollo de los escenarios propuestos.

Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, una vez integrados los eslabones de MFV, CFV y Oblea, que en conjunto equivalen a más del 80% del costo total de fabricación, y sumado a los incrementos en la capacidad de

producción, la diferencia entre dichos costos disminuye hasta alcanzar finalmente un 5% en cuanto se encuentra integrada completamente la CVIFM en el 2040. Lo cual se refleja en el MSP estimado para este Escenario Alternativo, el cual se reduce en 46% con respecto al precio del año de referencia, al pasar de 0.249 USD/W a 0.135 USD/W. Siendo el MSP en el Escenario Alternativo un 13% mayor respecto al Escenario Base y un 35% mayor que el precio de referencia internacional (véase Tabla 28).

Figura 39. Evolución en el desarrollo del Escenario Alternativo y su impacto en el decremento de los costos de fabricación con relación al Escenario Base, 2018 – 2040.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la PCN, esta se va incrementando a medida que se van integrando eslabones a la CVIFM y el uso de insumos y materiales nacionales aumenta al desarrollarse el Escenario Alternativo a lo largo del periodo de estudio. En este sentido, la Tabla 30 muestra que la PCN, en términos del uso de materiales e insumos de origen nacional para la fabricación de cada uno de los productos finales de cada eslabón de la CVIFM, aumenta a medida que avanza su integración ascendente. Siendo los únicos eslabones que utilizan materiales e insumos considerados como importados en sus procesos de fabricación hacia el final del periodo de análisis, el eslabón Oblea y el eslabón MG-Si, motivo por el cual estos eslabones no alcanzan una proporción del 100% en el uso de materiales y/o insumos de origen nacional. Los materiales e insumos importados utilizados a través del desarrollo del Escenario Alternativo pueden verse en la anterior Tabla 29.

Tabla 30. Proporción de materiales e insumos de origen nacional en la fabricación de los productos finales de cada eslabón de la CVIFM en el Escenario Alternativo.

Eslabón CVIFM	Eslabones integrados			
	2018	2026	2031	2038
	MFV	MFV+CFV	MFV+CFV+Oblea	MFV+CFV+Oblea+Poly-Si+MG-Si
MFV	6%	100%	100%	100%
Celda	0	45%	100%	100%
Oblea	0	0	28%	73%
Poly-Si	0	0	0	100%
MG-Si	0	0	0	60%

El valor de 100% indica que el producto final del eslabón está fabricado totalmente con materiales e insumos de origen nacional.

Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, la Tabla 31 indica la PCN final por cada uno de los eslabones en términos de la integración de los eslabones de la CVIFM en el presente escenario, donde se puede apreciar que la PCN se incrementa en más de 80% respecto al año de referencia una vez que la CVIFM esta completamente integrada hacia los últimos años del periodo de estudio. Siendo el eslabón de MFV el que más colabora al incremento de la PCN.

Tabla 31. Proporción de contenido nacional de cada eslabón de la CVIFM en el Escenario Alternativo.

Eslabón CVIFM	Eslabones integrados			
	2018	2026	2031	2038
	MFV	MFV+CFV	MFV+CFV+Lingote	MFV+CFV+Lingote+Poly-Si+MG-Si
MFV	0.08	0.46	0.41	0.38
Celda	0.0	0.22	0.26	0.26
Oblea	0.0	0.0	0.09	0.09
Poly-Si	0.0	0.0	0.0	0.12
MG-Si	0.0	0.0	0.0	0.04
PCN Total	0.08	0.68	0.76	0.89

Fuente: Elaboración Propia

En relación con los beneficios socioeconómicos, con el desarrollo del presente escenario se pueden generar un total de 10,364 empleos directos y 449,382 empleos indirectos, donde al igual que el

Escenario Base, la industria que más se beneficia con el desarrollo de la CVIFM es la industria de la construcción, ya que esta industria representa el 83% de los empleos indirectos (Tabla 8). Sin considerar los empleos relacionados con la industria de la construcción, el presente escenario genera 10.9 veces más empleos que el Escenario Base. Respecto a la generación de valor agregado, el desarrollo de la CVIFM en el Escenario Alternativo se puede generar un valor agregado directo de 133.3 MUSD y un valor agregado indirecto de 9,031.1 MUSD. Al igual que con los empleos, la mayor parte de este valor agregado indirecto (77%) corresponde a la industria de la construcción. Sin embargo, dejando de considerar a esta industria, el desarrollo del presente escenario genera 4.4 veces valor agregado que el Escenario Base. Lo descrito en los párrafos anteriores, puede verse con mayor detalle, de manera agregada en la siguiente Tabla 32. Y de forma desagregada, por eslabón de la CVIFM, en las Tablas A.1 a A.5 de la sección de Anexos.

Tabla 32. Beneficios socioeconómicos totales de la CVIFM en el Escenario Alternativo.

Industria	Multiplicador Empleo	Valor Agregado	Empleos (#)	Valor Agregado (MUSD)
Industria de la construcción	3.08E-05	5.77	373,179	6,984.2
Tala de árboles	3.06E-05	0.93	123	3.7
Minería de carbón mineral	1.21E-05	0.74	25	1.5
Minería de minerales metálicos	9.13E-06	0.98	2,334	252.9
Minería de minerales no metálicos	4.65E-05	0.98	30	0.6
Servicios relacionados con la minería	7.58E-06	0.59	1,959	153.3
Suministro de gas por ductos al consumidor final	1.30E-09	0.45	0	0.4
Fabricación de productos de cartón y papel	2.92E-05	0.61	552	11.6
Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	3.03E-04	5.32	159	2.8
Fabricación de productos químicos básicos	7.15E-05	1.77	13,153	352.1
Fabricación de pinturas, recubrimientos y adhesivos	1.41E-05	0.43	113	3.4
Fabricación de otros productos químicos	2.17E-05	0.52	5,023	126.9
Fabricación de productos de plástico	4.15E-05	0.76	4,974	90.9
Fabricación de productos a base de arcillas y minerales refractarios	1.83E-05	0.37	506	10.1
Fabricación de vidrio y productos de vidrio	1.89E-05	0.50	3,511	92.2
Industria básica del aluminio	6.74E-06	0.35	1,629	86.1
Fabricación de maquinaria y equipo agropecuario, para la construcción y para la industria extractiva	9.23E-06	0.34	37	1.4
Fabricación de maquinaria y equipo para la industria metalmeccánica	1.22E-05	0.35	339	9.6
Fabricación de equipo de generación y distribución de energía eléctrica	1.10E-05	0.27	2,068	49.9
Fabricación de otros equipos y accesorios eléctricos	1.51E-05	0.39	7,595	217.1
Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos	3.51E-04	6.95	24,155	436.1
Comercio al por menor de abarrotes y alimentos	1.15E-04	2.30	7,921	144.0
Directos			10,364	133.3
Total			459,746	9,164.4

Nota: Tablas desagregadas por eslabón de la CVIFM pueden verse en la sección de Anexos, Tablas A.1 a A.5.

Fuente: Elaboración Propia

Continuando con lo anterior, la siguiente Tabla 33 muestra los empleos y el valor agregado generados por cada eslabón de la CVIFM, a medida que esto se van integrando a lo largo del desarrollo del Escenario Alternativo. Donde se puede apreciar claramente que tanto el valor agregado como los empleos se incrementan con la integración de eslabones a la CVIFM, siendo el eslabón de fabricación de CFV el que más empleos y valor agregado genera. Seguido por el eslabón para la fabricación de Poly-Si. En conjunto, estos dos eslabones significan aproximadamente el 60% tanto de la generación total de empleos como del total del valor agregado generado hacia el 2040.

En términos globales, en el presente escenario se generan alrededor de 7 empleos y un valor agregado mayor a los 147,000 USD por cada 1 MW producido.

Tabla 33. Evolución de la generación de empleos y valor agregado en términos de la integración de eslabones de la CVIFM en el Escenario Alternativo, 2018-2040.

Periodos del Escenario											
		2019 – 2021		2022 – 2025		2026 – 2030		2031 – 2037		2038 – 2040	
Capacidad de Producción											
		1,182 MW		2,182 MW		2,182 MW		3,182 MW		5,182 MW	
Eslabón CVIFM	Empleos (#)	Valor Agregado (MUSD)									
MFV	4,253	133	31,232	765	16,210	383	40,297	1,073	105,223	2,393	
CFV	0	0.0	0	0.0	64,768	926	45,443	1,128	164,094	3,185	
Oblea	0	0.0	0	0.0	0	0.0	31,140	286	50,608	921	
Poly-Si	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	116,961	2,226	
MG-Si	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	22,860	439	
Total	4,253	133	31,232	765	80,978	1,309	116,880	2,487	459,746	9,164	

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, el desarrollo del presente Escenario Alternativo necesita de una inversión de alrededor de 1,715 MUSD (véase Tabla 34). Lo que significa una inversión 11.5 veces mayor que la necesaria para el desarrollo del Escenario Base. No obstante, si nos enfocamos en los beneficios socioeconómicos, este Escenario Alternativo genera 10.3 más empleos y un valor agregado 7.9 veces mayor en comparación con el Escenario Base.

Tabla 34. Flujo de efectivo para el Escenario Alternativo, 2018 – 2040.

Año	Ingreso Ventas	Costo Fabricación	Depreciación	Ingreso Bruto	Impuestos	Cambio NWC	Inversión Capital	Ingreso Neto	Ganancias retenidas
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	287,050,102	249,409,636	-	37,640,466	11,292,140	-	-	26,348,326	26,348,326
2020	279,961,663	242,520,942	-	37,440,721	11,232,216	-	-	26,208,505	52,556,831
2021	273,048,266	235,822,513	-	37,225,753	11,167,726	16,123,155	82,678,555 ^a	-46,531,043	6,025,788
2022	464,226,293	399,733,672	10,089,484	64,492,621	19,347,786	232,264	-	55,002,056	61,027,843
2023	462,317,238	396,895,563	10,089,484	65,421,675	19,626,503	229,189	-	55,655,469	116,683,312
2024	460,416,034	394,077,604	10,089,484	66,338,430	19,901,529	226,141	-	79,714,046	196,397,358
2025	458,522,648	391,279,653	33,503,286	67,242,995	20,172,898	15,747,265	235,289,678 ^b	154,716,296	41,681,062
2026	422,146,260	359,157,200	33,503,286	62,989,060	18,896,718	133,620	-	69,521,266	111,202,328
2027	418,568,390	355,044,850	25,562,544	63,523,540	19,057,062	129,429	-	69,899,593	181,101,920
2028	415,020,845	350,979,587	25,562,544	64,041,258	19,212,377	125,309	-	70,266,115	251,368,035
2029	411,503,366	346,960,870	25,562,544	64,542,496	19,362,749	121,259	-	51,936,056	303,304,092
2030	408,015,700	342,988,168	6,877,568	65,027,531	19,508,259	19,488,085	324,502,969 ^c	243,654,836	59,649,256
2031	481,493,580	403,541,240	35,328,861	77,952,340	23,385,702	99,587	-	89,795,912	149,445,167
2032	476,553,080	398,202,389	35,328,861	78,350,690	23,505,207	94,603	-	90,079,742	239,524,909
2033	471,663,272	392,934,172	35,328,861	78,729,100	23,618,730	89,721	-	90,349,510	329,874,419
2034	466,823,638	387,735,653	35,328,861	79,087,985	23,726,396	84,942	-	90,605,509	420,479,928
2035	462,033,662	382,605,910	35,328,861	79,427,752	23,828,326	80,262	-	80,510,472	500,990,400
2036	457,292,835	377,544,034	24,991,308	79,748,802	23,924,640	75,681	-	80,739,788	581,730,188
2037	452,600,653	372,549,126	24,991,308	80,051,527	24,015,458	32,471,635	1,072,777,098 ^d	917,941,986	336,211,799
2038	724,249,483	594,362,944	98,799,043	129,886,539	38,965,962	-127,063	-	189,846,684	146,365,115
2039	711,645,944	582,267,658	98,799,043	129,378,286	38,813,486	-133,766	-	189,497,609	43,132,494
2040	699,261,735	570,418,511	98,799,043	128,843,223	38,652,967	-	-	90,190,256	133,322,750

^aIncremento de capacidad de producción a 2.18 GW

^bIntegración eslabón CFV

^cIncremento de capacidad de producción a 3.18 GW e integración eslabón Oblea

^dIncremento de capacidad de producción a 5.18 GW e integración de eslabones Poly-Si y MG-Si

Fuente: Elaboración Propia

9. Discusión.

El presente estudio fue desarrollado bajo la premisa de demostrar que el desarrollo de una cadena de valor de la industria fotovoltaica en México es viable y económicamente sostenible. Y que a su vez puede generar importantes beneficios sociales y económicos, bajo el supuesto de que en el país existen las capacidades industriales lo suficientemente desarrolladas para colaborar con el desarrollo de dicha industria en el país.

De esta manera, nuestro análisis muestra que un desarrollo y completa integración de los segmentos ascendentes de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México (CVIFM) puede autofinanciarse y es económicamente sostenible. A partir de lo cual se lograría incrementar gradualmente el contenido nacional de esta cadena de valor hasta alcanzar un 89%, lo que se refleja en múltiples eslabones de cadenas productivas con economías de escala, relacionadas con esta industria, multiplicando el impacto positivo sobre la economía mexicana y generando más de 450,000 empleos (20,897 empleos/año en promedio para el periodo 2018-2040), cifra acorde con el número de empleos que se generaron, de manera anual, durante 2019 en la industria fotovoltaica de otros países, como China (2 millones), EUA (36,000) e India (38,760) (IRENA, 2020); y un valor agregado mayor a 9,000 MUSD. Así como satisfacer el 76% de la demanda nacional de tecnología fotovoltaica necesaria para el cumplimiento de las metas nacionales en energías limpias y mitigación de emisiones de GEI hacia el año 2040. Todo esto, a través de una inversión de más de 1,700 MUSD a lo largo de los 22 años del periodo de análisis.

Así mismo, nuestro análisis fue elaborado, considerando que las inversiones necesarias para el desarrollo e integración de la CVIFM provienen del sector privado y obedecen a una estrategia de reinversión de las ganancias. Esto, sabiendo que existe un amplio consenso entre los economistas de que las empresas privadas son más productivas y superiores en términos de adopción de nuevas tecnologías que las empresas estatales, lo que constituye un requisito previo para el crecimiento de la productividad a largo plazo (Le, Park, & Castillejos-Petalcorin, 2021) (Phi, Taghizadeh-Hesary, Tu, Yoshino, & Kim, 2021) (UNDP, 2015). Las explicaciones teóricas se refieren a que los encargados de las empresas estatales están sujetos a objetivos múltiples y complejos que les

impiden realizar inversiones para mejorar la productividad a través de la innovación y el cambio tecnológico, por ejemplo, a nivel industrial, donde la adopción generalizada de tecnología es un componente importante. Además de que el incentivo para el encargado de la empresa estatal por invertir en estos ámbitos tiende a ser débil o nulo porque, en el caso de que sea una inversión exitosa, el beneficio de una mayor productividad es prácticamente inexistente en comparación con los propietarios privados o sus encargados debidamente incentivados, lo cual termina resultando en un bajo interés del estado por invertir en ámbitos novedosos. Sin embargo, las prioridades de los gobiernos pueden cambiar, y las empresas de propiedad estatal se encuentran sujetas a políticas y directivas, especialmente aquellas empresas que dependen del estado en cuanto a recursos, acceso al mercado u otro apoyo esencial. Por lo que podría darse el caso de que las prioridades no comerciales adicionales, como el cumplir metas socioeconómicas o ambientales, de las empresas de servicios públicos estatales afecten en este caso la adopción de tecnología (Bjarne, Valerie Karplus, & Schimdt, 2020). En este sentido, los gobiernos también pueden explotar la propiedad estatal para objetivos de política pública, eligiendo aquellas que estén alineadas con las prioridades gubernamentales de cambiar las trayectorias tecnológicas y las estructuras industriales. Y para lo cual, los sectores público y privado pueden interactuar en un marco de economía política para el diseño de políticas públicas e incentivos que influya sobre los resultados de los sistemas económicos, los desarrollos tecnológicos y en el tipo de organización productiva de los países. Desde este punto de vista, si el Estado está plenamente enfocado en el desarrollo, y cuenta con el marco institucional adecuado, puede hacer uso de sus funciones para promover una transformación del aparato productivo, fortalecer la formación de capital humano, la absorción tecnológica y desarrollar de forma estratégica ciertos sectores de la economía (Schatan-Pérez & Cabrera-Espinosa, 2020). Y donde, para alcanzar estos objetivos, es necesario que el sector público y el sector privado construyan acuerdos, sean estos formales o informales, basados en la confianza y el diálogo abierto, para de esta manera, generar un sistema que promueva la competencia, la innovación, la eficiencia y la inclusión social, con una visión común de largo plazo.

Bajo estas perspectivas, es razonable considerar que el Estado puede colaborar con ciertas estrategias a nivel nacional para fomentar la integración y desarrollo de la CVIFM. Como pueden ser subsidios directos, reducción de impuestos, préstamos con intereses reducidos o la participación de la inversión del Estado dentro de la cadena de valor en sus componente más

estratégicos como son la producción de MG-Si y Poly-Si. Políticas semejantes se utilizaron con éxito en países como Alemania y China para impulsar sus respectivas industrias fotovoltaicas y demostraron mejorar la generación de empleo y de valor agregado (Yu, 2014)(Grau et al., 2012)(Hopkins & Li, 2016).

En este sentido, a partir de nuestro modelo se evaluó la incorporación de políticas para el desarrollo de la CVIFM en orden de determinar su impacto sobre el CTP y el MSP. Las políticas propuestas, así como sus impactos, se muestran en la siguiente Tabla 35.

Tabla 35. Escenario de políticas propuestas para el desarrollo de la CVIFM y su impacto en relación con el Escenario Alternativo propuesto.

Escenario	Políticas propuestas	Impacto al 2040 sobre			
		Valor de CTP (USD/W)		Valor de MSP (USD/W)	
		EA	EA+Política	EA	EA+Política
EA+Política 1	<ul style="list-style-type: none"> Política económica: Reducción de impuestos sobre las ventas al 20%. 	Sin reducción		0.135	0.130
				Reducción adicional de 4%	
EA+Política 2	<ul style="list-style-type: none"> Política de seguridad energética: El Estado forma parte de la CVIFM como productor de MG-Si y Poly-Si. 	0.110	0.105	0.135	0.117
		Reducción adicional de 6% sobre el valor estimado para el EA		Reducción adicional de 13% sobre el valor estimado para el EA	
EA+Política 3	<ul style="list-style-type: none"> Política económica (Reducción de impuestos sobre las ventas al 20%) y Política de seguridad energética (El Estado forma parte de la CVIFM como productor de MG-Si y Poly-Si) 	0.110	0.105	0.135	0.112
		Reducción adicional de 6% sobre el valor estimado para el EA		Reducción adicional de 17% sobre el valor estimado para el EA	

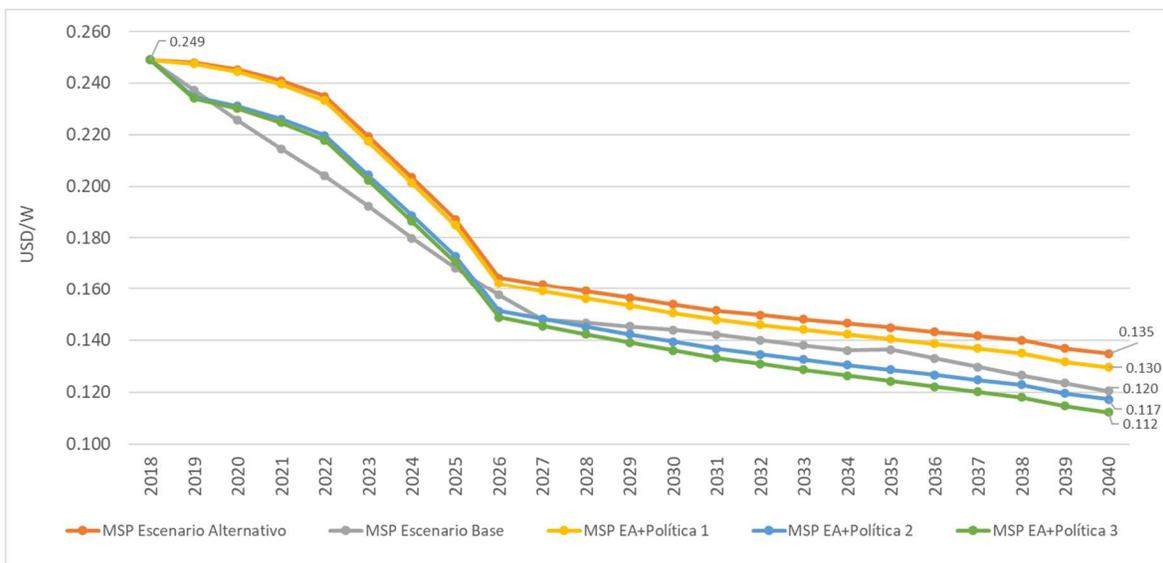
CTP = Costo total de producción; MSP = Precio mínimo de venta; EA = Escenario Alternativo

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla anterior, el escenario EA+Policy 1, impactaría únicamente al MSP y no de manera tan significativa para que este precio sea competitivo respecto al Escenario Base, al seguir siendo mayor en 8% (Figura 1). Sin embargo, como se muestra para el escenario EA+Policy 2, la aplicación de una política de seguridad energética en la que el Estado

se integre a la cadena de valor como fabricante, tomando los eslabones más estratégicos para esta industria (MG-Si y Poly-Si), permitiría que, a partir del año 2026, se empiecen a observar costos y precios más competitivos, derivado de lo cual el MSP es menor en 3% respecto al Escenario Base hacia el año 2040. Además, de aplicarse ambas políticas propuestas, escenario EA+Policy 3, dicha reducción en el MSP se incrementaría aún más, logrando que el MSP sea 7% menor respecto al Escenario Base, como se muestra en la Figura 40.

Figura 40. Evolución de la incorporación de políticas de desarrollo al Escenario Alternativo, 2018 – 2040.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, una política económica no es suficiente para que una CVIFM pueda desarrollarse, integrarse y ser competitiva localmente. Sin embargo, la aplicación de una política de seguridad energética, como la participación del Estado en la CVIFM, manejando los eslabones de producción de MG-Si y Poly-Si, estratégicos para la industria fotovoltaica, podría ser suficiente para reducir en 6% el costo total de fabricar y en 13% el de comercializar una tecnología fotovoltaica con un alto contenido nacional en México. Volviéndola competitiva frente a un escenario base que contempla solamente el ensamble final de dicha tecnología, sin la generación de beneficios socioeconómicos adicionales.

De esta manera, con estas reducciones tanto en el costo de producción como en el precio, la tecnología fotovoltaica podría consolidarse en México volver factible el incremento de la participación de la energía solar para la generación de electricidad, lo que a su vez podría incrementar la capacidad de producción de la CVIFM y continuar beneficiando a la seguridad energética e incrementado los beneficios socioeconómicos. Con lo cual se reitera que, desde un punto de vista estratégico, la propiedad estatal puede ayudar a acelerar la adopción de tecnologías que promuevan el desarrollo económico y social. No obstante, esto puede no ser un efecto de la propiedad estatal per se y requiere objetivos políticos claros y una acción gubernamental dedicada para utilizar la propiedad estatal hacia estos objetivos para la implementación exitosa de políticas de desarrollo productivo.

10. Conclusiones

En el presente estudio presentamos una metodología y un modelo económico que considera el impacto del progreso de la tecnología fotovoltaica y de las economías de escala para simular y evaluar la viabilidad de un posible desarrollo e integración “aguas arriba” de una cadena de valor de la industria fotovoltaica en México y su potencial generación de beneficios socioeconómicos para el país hacia el año 2040.

Nuestro análisis muestra que un desarrollo y completa integración de los segmentos ascendentes de la cadena de valor de la industria fotovoltaica en México (CVIFM) puede autofinanciarse y es económicamente viable. Con lo cual se lograría incrementar gradualmente el contenido nacional de esta cadena de valor hasta alcanzar un 89%, lo que se refleja en múltiples eslabones de cadenas productivas con economías de escala, relacionadas con esta industria, multiplicando el impacto positivo sobre la economía mexicana y generando más de 447,000 empleos y un valor agregado mayor a 9,000 MUSD. Así como satisfacer el 76% de la demanda nacional de tecnología fotovoltaica necesaria para el cumplimiento de las metas nacionales en energías limpias y mitigación de emisiones de GEI hacia el año 2040. Coadyuvando a la seguridad energética nacional a través del aprovechamiento de los recursos energéticos renovables del país y del aseguramiento de insumos y componentes clave para esta industria. Todo esto, a través de una inversión de más de 1,700 MUSD a lo largo de los 22 años del periodo de análisis.

Así mismo, nuestros resultados indican que la aplicación de políticas económicas como la reducción de impuestos sobre las ventas y de políticas de seguridad energética, como la participación del Estado en la CVIFM, manejando los eslabones de producción de MG-Si y Poly-Si, estratégicos para la industria fotovoltaica, podrían reducir el costo total de fabricar y comercializar la tecnología fotovoltaica en México en 6% y 17% respectivamente, mejorando su competitividad frente a un escenario base que contempla solamente el ensamble final de dicha tecnología, sin la generación de beneficios socioeconómicos adicionales. Destacando que la participación del Estado es fundamental para lograr dichas reducciones y a su vez lograr que la tecnología fotovoltaica pueda consolidarse en México, acelerando la mitigación de emisiones de GEI e incrementando los beneficios socioeconómicos que conlleva. Y coadyuvando a la seguridad energética nacional a través del aprovechamiento de los recursos energéticos renovables del país y del aseguramiento de insumos y componentes clave para esta industria.

11. Anexos

Tabla. A. 1. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón MFV.

Industria	Empleos (#)	Valor Agregado (MUSD)
Minería de minerales metálicos	2,131	228.4
Servicios relacionados con la minería	1,770	137.0
Edificación no residencial	8,335	126.0
Construcción de obras para el suministro de agua, petróleo, gas, energía eléctrica y telecomunicaciones	6,326	113.5
División de terrenos y construcción de obras de urbanización	5,646	108.9
Otras construcciones de ingeniería civil	2,846	104.1
Cimentaciones, montaje de estructuras prefabricadas y trabajos en exteriores	6,254	181.8
Instalaciones y equipamiento en construcciones	16,826	231.9
Trabajos de acabados en edificaciones	14,818	197.2
Otros trabajos especializados para la construcción	11,001	285.1
Fabricación de productos de cartón y papel	552	11.6
Fabricación de pinturas, recubrimientos y adhesivos	113	3.4
Fabricación de productos de plástico	4,974	90.9
Fabricación de vidrio y productos de vidrio	3,511	92.2
Industria básica del aluminio	1,574	82.6
Fabricación de otros equipos y accesorios eléctricos	1,073	46.6
Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos	11,207	221.7
Comercio al por menor de abarrotes y alimentos	3,675	73.2
Directos	2,591	57.2
Total	105,223	2,336.2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla. A. 2. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón CFV.

Industria	Empleos (#)	Valor Agregado (MUSD)
Minería de minerales metálicos	203	24.5
Servicios relacionados con la minería	169	14.7
Edificación no residencial	14,641	221.3
Construcción de obras para el suministro de agua, petróleo, gas, energía eléctrica y telecomunicaciones	11,112	199.3
División de terrenos y construcción de obras de urbanización	9,918	191.3
Otras construcciones de ingeniería civil	4,999	182.9
Cimentaciones, montaje de estructuras prefabricadas y trabajos en exteriores	10,985	319.3
Instalaciones y equipamiento en construcciones	29,554	407.4
Trabajos de acabados en edificaciones	26,028	346.4
Otros trabajos especializados para la construcción	19,323	500.8
Fabricación de productos químicos básicos	13,095	350.7
Fabricación de otros productos químicos	3,973	102.0
Industria básica del aluminio	54	3.5
Fabricación de otros equipos y accesorios eléctricos	2,447	64.0
Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos	10,517	166.3
Comercio al por menor de abarrotes y alimentos	3,449	54.9
Directos	3,627	35.6
Total	164,094	3,149.2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla. A. 3. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón Oblea.

Industria	Empleos (#)	Valor Agregado (MUSD)
Edificación no residencial	5,094	77.0
Construcción de obras para el suministro de agua, petróleo, gas, energía eléctrica y telecomunicaciones	3,867	69.3
División de terrenos y construcción de obras de urbanización	3,451	66.6
Otras construcciones de ingeniería civil	1,739	63.6
Cimentaciones, montaje de estructuras prefabricadas y trabajos en exteriores	3,822	111.1
Instalaciones y equipamiento en construcciones	10,283	141.8
Trabajos de acabados en edificaciones	9,056	120.5
Otros trabajos especializados para la construcción	6,723	174.2
Fabricación de otros productos químicos básicos	595	14.1
Fabricación de productos a base de arcillas y minerales refractarios	506	10.1
Fabricación de otros equipos y accesorios eléctricos	1,249	32.6
Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos	838	16.6
Comercio al por menor de abarrotes y alimentos	275	5.5
Directos	3,109	18.2
Total	50,608	903.1

Fuente: Elaboración Propia

Tabla. A. 4. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón Poly-Si.

Industria	Empleos (#)	Valor Agregado (MUSD 2013)
Edificación no residencial	12,855	194.3
Construcción de obras para el suministro de agua, petróleo, gas, energía eléctrica y telecomunicaciones	9,757	175.0
División de terrenos y construcción de obras de urbanización	8,708	168.0
Otras construcciones de ingeniería civil	4,389	160.6
Cimentaciones, montaje de estructuras prefabricadas y trabajos en exteriores	9,645	280.3
Instalaciones y equipamiento en construcciones	25,948	357.7
Trabajos de acabados en edificaciones	22,853	304.1
Otros trabajos especializados para la construcción	16,966	439.7
Fabricación de otros productos químicos básicos	455	10.8
Fabricación de equipo de generación y distribución de energía eléctrica	1,761	42.5
Fabricación de otros equipos y accesorios eléctricos	2,406	62.9
Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos	528	10.4
Comercio al por menor de abarrotes y alimentos	173	3.4
Directos	518	15.9
Total	116,961	2,209.8

Fuente: Elaboración Propia

Tabla. A. 5. Beneficios socioeconómicos de la CVIFM por tipo de industria en el Escenario Alternativo para el eslabón MG-Si.

Empleos Indirectos	Empleos	Valor Agregado
Industria	(#)	(MUSD 2013)
Tala de árboles	123	3.7
Minería de carbón mineral	25	1.5
Minería de minerales no metálicos	30	0.6
Servicios relacionados con la minería	20	1.6
Suministro de gas por ductos al consumidor final	0	0.4
Edificación no residencial	2245	33.9
Construcción de obras para el suministro de agua, petróleo, gas, energía eléctrica y telecomunicaciones	1704	30.6
División de terrenos y construcción de obras de urbanización	1521	29.3
Otras construcciones de ingeniería civil	767	28.1
Cimentaciones, montaje de estructuras prefabricadas y trabajos en exteriores	1685	49.0
Instalaciones y equipamiento en construcciones	4532	62.5
Trabajos de acabados en edificaciones	3992	53.1
Otros trabajos especializados para la construcción	2963	76.8
Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	159	2.8
Fabricación de productos químicos básicos	58	1.4
Fabricación de maquinaria y equipo agropecuario, para la construcción y para la industria extractiva	37	1.4
Fabricación de maquinaria y equipo para la industria metalmeccánica	339	9.6
Fabricación de equipo de generación y distribución de energía eléctrica	307	7.4
Fabricación de otros equipos y accesorios eléctricos	420	11.0
Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos	1064	21.1
Comercio al por menor de abarrotes y alimentos	349	7.0
Directos	519	6.4
Total	22,860	432.7

Fuente: Elaboración Propia

12. Referencias

- Abermann, S. (2013). Non-vacuum processed next generation thin film photovoltaics: Towards marketable efficiency and production of CZTS based solar cells. *Solar Energy*, *94*, 37–70.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.017>
- Al-Mudimigh, A. S., Zairi, M., & Ahmed, A. M. M. (2004). Extending the concept of supply chain: The effective management of value chains. *International Journal of Production Economics*, *87*(3), 309–320.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.08.004>
- Altenburg, T. (2006). Governance Patterns in Value Chains and their Development Impact. *The European Journal of Development Research*, *18*(4), 498–521.
- Altenburg, T., & Assmann, C. (2017). *Green Industrial Policy: Concept, Policies, Country Experiences*. Geneva, Bonn. <https://doi.org/10.1093/oxrep/gru025>
- Altenburg, T., & Lütkenhorst, W. (2015). *Industrial Policy in Developing Countries: Failing Markets, Weak States*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Ltd.
- Altenburg, T., & Pegels, A. (2012). Sustainability-oriented innovation systems—managing the green transformation. *Innovation and Development*, *2*(1), 5–22.
- Altenburg, T., Rosendahl, C., Stamm, A., & Drachenfels, C. (2008). Industrial policy: a key element of the social and ecological market economy. *The Social and Ecological Market Economy: A Model for Asian Development?*, 134–153.
- Amin, N., Shahahmadi, S. A., Chelvanathan, P., Rahman, K. S., Hossain, M. I., & Akhtaruzzaman, M. (2017). Solar Photovoltaic Technologies : From Inception Toward the Most Reliable Energy Resource. *Encyclopedia of Sustainable*

- Technologies*, 3(October 2019), 11–26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10092-2>
- Amsden, A., & Chu, W. W. (2003). *Beyond Late Development: Taiwan's Upgrading Policies*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Andersen, C. (2012). *Makers: The new industrial revolution*. New York: Random House.
- ASF. (2011). *Informe del Resultado de la Fiscalización Superior de la Cuenta Pública 2011*.
- ASOLMEX. (2020). *Inventario de Centrales Solares en Operación Comercial en México*.
- Ayoub, N., & Yuji, N. (2012). Governmental intervention approaches to promote renewable energies—Special emphasis on Japanese feed-in tariff. *Energy Policy*, 43, 191–201.
- Azmeh, S., & Nadvi, K. (2014). Asian firms and the restructuring of global value chains. *International Business Review*, 23(4), 708–717. <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2014.03.007>
- Bahrami, A., Okoye, C. O., & Atikol, U. (2017). Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries. *Renewable Energy*, 113, 563–579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.095>
- Basore, P. A., Chung, D., & Buonassisi, T. (2015). Economics of future growth in photovoltaics manufacturing. *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2015*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2015.7355620>
- Bellini, E. (2018). Nadie dijo fácil: Industria en América Latina. Retrieved from <https://www.pv-magazine-latam.com/2018/09/12/nadie-dijo-facil-industria-en-america-latina/>
- Bernreuter, J. (2020). POLYSILICON MANUFACTURERS: How the ranking of

- the top ten producers has been whirled around since 2004. *Bernreuter Research: Polysilicon Reports*. Retrieved from <https://www.bernreuter.com/polysilicon/manufacturers/>
- Bianchi, P., & Labory, S. (2011). *Industrial policy after the crisis: Seizing the future*.
- Binz, C., Tang, T., & Huenteler, J. (2017). Spatial lifecycles of cleantech industries – The global development history of solar photovoltaics. *Energy Policy*, *101*, 386–402.
- Bjarne, S., Valerie Karplus, & Schimdt, T. (2020). State ownership and technology adoption : The case of electric utilities and renewable energy. *Research Policy*, *51*(6), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104534>
- Bloomfield, S., Roberts, C., & Cotterell, M. (2016). Batteries and Solar Power: Guidance for domestic and small commercial consumers. *Building Research Establishment*. Retrieved from www.bre.co.uk
- BMU. (2013). *Renewable Energy Sources in Figures. National and International Development*.
- BMWi. (2014). Renewable Energy Sources Act (Erneuerbare-Energien-Gesetz [EEG]).
- Borbonus, S. (2017). *Generating socio-economic values from renewable energies*.
- Brown, T. J., Idoine, N. E., Raycraft, E. R., Hobbs, S. F., Shaw, R. A., Everett, P., ... Bide, T. (2019). *World Mineral Production 2013-17. Angewandte Chemie - International Edition*. Keyworth, Nottingham. <https://doi.org/10.1002/anie.201605417>
- Buciuni, G., & Mola, L. (2014). How do entrepreneurial firms establish cross-border relationships? A global value chain perspective. *Journal of International Entrepreneurship*, *12*(1), 67–84.
- Buckley, P. (2011). International Integration and Coordination in the Global

- Factory. *Management International Review*. <https://doi.org/10.1007/s11575-011-0075-2>
- Buckley, P. J. (2016). The contribution of internalisation theory to international business: New realities and unanswered questions. *Journal of World Business*, 51(1), 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.jwb.2015.08.012>
- Buckley, P. J., & Strange, R. (2015). The Governance of the Global Factory: Location and Control of World Economic Activity. *Academy of Management Perspectives*, 29(2), 237–249. <https://doi.org/10.5465/amp.2013.0113>
- Buiges, P., & Sekkat, K. (2009). *Industrial Policy in Europe, Japan and the USA, Amounts, Mechanisms and Effectiveness*. Palgrave Macmillan, London: Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1057/9780230244351>
- Butler, E. (2012). *The Condensed Wealth of Nations and The Incredibly Condensed Theory of Moral Sentiments*. The Centre for Independent Studies Ltd.
- Bye, G., & Ceccaroli, B. (2014). Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, 634–646. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.019>
- Caballero, P. (2016). Steely determination brings progress in climate talks in Marrakech. Retrieved from <http://www.wri.org/blog/2016/11/steely-determination-brings-progress-climate-talks-marrakech.%0A5>
- Canadian, & Solar. (2019). *Canadian Solar Annual Report 2019*. Retrieved from <http://investors.canadiansolar.com/>
- Cardoza, D. Solar Opportunity and Local Access Rights Act (2007). <https://doi.org/10.1177/1468794106093628>
- Carud, R. (1997). On the distinction between know-how, know-why, and know-what. *Adv. Strat. Manag.*, 14, 81–101.
- Carvalho, M. D., Dechezleprêtre, A., & Glachant, M. (2017). Understanding the

- dynamics of global value chains for solar photovoltaic technologies, (40), 1–31. Retrieved from https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_econstat_wp_40.pdf
- Castelao Caruana, M. E. (2019). La energía renovable en Argentina como estrategia de política energética e industrial. *Problemas Del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 50(197), 131–156. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2019.197.64625>
- Castellanos, S., Santibañez-Aguilar, J. E., Shapiro, B. B., Powell, D. M., Peters, I. M., Buonassisi, T., ... Flores-Tlacuahuac, A. (2018). Sustainable silicon photovoltaics manufacturing in a global market: A techno-economic, tariff and transportation framework. *Applied Energy*, 212, 704–719. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.047>
- CEC. (2019). *Clean Energy Australia Report 2019*. Melbourne, Australia. Retrieved from <https://assets.cleanenergycouncil.org.au/documents/resources/reports/clean-energy-australia/clean-energyaustralia-report-2019-fact-sheet.pdf>
- Ceccaroli, B., Ovrelid, E., & Pizzini, S. (2017). *Solar Silicon Processes. Problems of Atomic Science and Technology*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- CENACE. (2019). *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista*.
- CENACE. (2020). Precios Marginales Locales. Retrieved from <https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/PreciosEnergiaSisMEM.aspx>
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. (2017). Aspectos Relevantes de la Competitividad del Sector Industrial, 1–66.

- CEPAL. (2012). Cambio estructural para la igualdad. Una visión integrada del desarrollo. *Trigésimo Cuarto Periodo de Sesiones de La CEPAL*, 330.
Retrieved from
http://www.eclac.org/pses34/noticias/documentosdetrabajo/4/47424/2012-SES-34-Cambio_estructural.pdf
- CEPAL. (2014). *Fortalecimiento de las cadenas de valor como instrumento de la política industrial. Metodología y experiencia de la CEPAL en Centroamérica*. (R. Padilla, Ed.). Retrieved from
<http://repositorio.cepal.org:80/handle/11362/36743>
- CESPEDES, & PwC. (2015). Estudio sobre las inversiones necesarias para que México cumpla con sus metas de Energías Limpias, 72.
- CFE. (2019a). *Programa de Ampliación y Modernización de las Redes Generales de Distribución 2019-2033*.
- CFE. (2019b). Tarifas Eléctricas para el Sector Industrial a Nivel Nacional.
Retrieved from
<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Industria.aspx>
- CGTI. (2011). *CHINA ' S SOLAR PV VALUE CHAIN: Opportunities to improve profits*.
- Chandler, A. D. (1992). What is a firm?. A historical perspective. *European Economic Review*, 36(2–3), 483–492. [https://doi.org/10.1016/0014-2921\(92\)90106-7](https://doi.org/10.1016/0014-2921(92)90106-7)
- Chang, H. (2009). Industrial policy: Can we go beyond an unproductive confrontation? *Annual World Bank Conference on Development Economics*.
- Chang, H. J. (1994). *The Political Economy of Industrial Policy*. Macmillan.
- Chen, W., Shen, H., Shu, B., Qin, H., & Deng, T. (2007). Evaluation of performance of MPPT devices in PV systems with storage batteries.

- Renewable Energy*, 32(9), 1611–1622.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.06.009>
- Chernyakhovskiy, I., Tian, T., McLaren, J., Miller, M., Geller, N., Chernyakhovskiy, I., ... Geller, N. (2016). U.S. Laws and Regulations for Renewable Energy Grid Interconnections. *NREL*, (September), 1–29. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66724.pdf>
- China Global Trade. (2012). *China's solar industry and the U.S. anti-dumping/anti-subsidy: the Kearny Alliance*.
- Chueh, A. (2019). Price Trend: Polysilicon Price Slightly Changes with Stable Supply and Demand, and the German Exhibition Reveals Future Market Trend. Retrieved from <https://www.energytrend.com/pricequotes/20190516-13929.html>
- CINVESTAV. (2020). Historia del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Retrieved from <https://ie.cinvestav.mx/conoce-ie/historia>
- Coletti, G. (2014). *Impurities in silicon and their impact on solar cell performance Gianluca Coletti*. Universiteit Utrecht.
- Connelly, B. L., Ketchen, D. J., & Hult, G. T. M. (2013). Global Supply Chain Management: Toward a Theoretically Driven Research Agenda. *Global Strategy Journal*, 3(3), 227–243. <https://doi.org/10.1111/j.2042-5805.2013.01041.x>
- Costantini, P., & Di Paola, M. (2019). Programa RenovAr: ¿éxito o fracaso? Policy Brief, 10.
- CPUC. (2017). *California Solar Initiative Program Handbook*. California Public Utilities Commission.
- CRE. (2017). *Contratos de interconexión en pequeña y mediana escala Generación Distribuida y Contratos de Interconexión en pequeña y mediana escala*.

- CRE. (2020). Contratos Interconexión de Pequeña y Mediana Escala / Generación Distribuida Solicitudes de interconexión de Centrales Eléctricas con capacidad menor a 0 . 5 MW, 1–11.
- CRS. (2018). *Residential Energy Tax Credits: Overview and Analysis*. Washington, DC. Retrieved from <https://fas.org/sgp/crs/misc/R42089.pdf>
- CSI. (2017). Energy Programs. Retrieved from <http://www.cpuc.ca.gov/energy/>
- CSIRO. (2018). *GenCost 2018. Updated projections of electricity generation technology costs*. Retrieved from <https://www.csiro.au/en/News/News-releases/2018/Annual-update-finds-renewablesare-cheapest-new-build-power>
- De Marchi, V., Di Maria, E., & Ponte, S. (2014). Multinational Firms and the Management of Global Networks: Insights from Global Value Chain Studies. In *Orchestration of the Global Network Organization* (pp. 463–486). <https://doi.org/10.1108/S1571-502720140000027009>
- Deng, W., Ye, F., Xiong, Z., Chen, D., Guo, W., Chen, Y., ... Verlinden, P. J. (2016). Development of High-efficiency Industrial p-type Multi-crystalline PERC Solar Cells with Efficiency Greater Than 21%. *Energy Procedia*, 92, 721–729. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.050>
- DOF. Acuerdo por el que se establecen las reglas para la determinación y acreditación del grado de contenido Nacional, tratándose de procedimientos de contratación de carácter nacional (2000).
- DOF. REGLAS para la determinación, acreditación y verificación del contenido nacional de los bienes que se ofertan y entregan en los procedimientos de contratación, así como para la aplicación del requisito de contenido nacional en la contratación de obras púb (2010).
- DOF. Ley de la Industria Eléctrica, Pub. L. No. DOF 11-08-2014 (2014).
- DOF. Metodología para la Medición del Contenido Nacional - Industria de Hidrocarburos (2014). México.

- DOF. Reglamento de la Ley de la Industria Eléctrica (2014). México.
- DOF. Ley de Transición Energética (2015). Mexico.
- DOF. Ley de Hidrocarburos, Pub. L. No. DOF 15-11-2016 (2016).
- DOF. Manual de Interconexión 0.5MW.pdf (2016). México.
- DOF. RESOLUCIÓN de la Comisión Reguladora de Energía por la que expide las disposiciones administrativas de carácter general, los modelos de contrato, la metodología de cálculo de contraprestación y las especificaciones técnicas generales, aplicables a las cen (2017). México.
- Dosi, G., & Galambos, L. (2013). *The third industrial revolution in global business*.
- Dross, F. (2012). Crystalline thin-foil silicon solar cells: where crystalline quality meets thin-film processing. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 20. <https://doi.org/10.1002/pip.1238>
- El Amrani, A., Mahrane, A., Moussa, F. Y., & Boukennous, Y. (2007). Solar Module Fabrication. *International Journal of Photoenergy*, 2007(Figure 3), 1–5. <https://doi.org/10.1155/2007/27610>
- Enkhardt, S. (2018). Global-PV market: demand increasing – prices largely stable. Retrieved January 2, 2019, from <https://www.pv-magazine.com/2018/12/07/global-pv-market-demand-increasing-prices-stable-with-scattered-bumps/>
- EPIA. (2013). *Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017*.
- European Commission. (2018). A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. *Com(2018) 773*, 114.
- Evans, P. B. (1995). *Embedded autonomy: States and industrial transformation. Princeton Paperbacks*.
- Evans, S. (2018). EU carbon prices rise ten-year high. Retrieved December 30,

- 2018, from <https://www.power-technology.com/news/eu-carbon-prices-rise-ten-year-high/>
- Fay, M., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Rozenberg, J., Narloch, U., & Kerr, T. M. (2015). Decarbonizing development: Three steps to a zero-carbon future. *Climate Change and Development Series*.
- Fazzari, M. C., & Petersen, B. C. (1993). Working capital and fixed investment: new evidence on financing constraints. *RAND Journal of Economics*, 24, 328–344.
- Feller, A., Shunk, D., & Callarman, T. (2006). Value Chains Versus Supply Chains. *BPTrends*, March 2006, 1–7.
- FerroAlloyNet. (2020). FerroAlloyNet Silicon Metal Market Information. Retrieved from <https://www.ferroalloynet.com/siliconmetal/>
- Ferroglobe. (2018). *Ferroglobe PLC Presentation at CRU Silicon Metal Conference Lisbon*.
- Fertig, F., Lantsch, R., Mohr, A., Schaper, M., Bartzsch, M., Wissen, D., ... Jeong, D. J. W. (2017). Mass production of p-type Cz silicon solar cells approaching average stable conversion efficiencies of 22 %. *Energy Procedia*, 124, 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.308>
- First, & Solar. (2019). *First Solar Annual Report 2019*. Retrieved from <https://www.microsoft.com/investor/reports/ar19/index.html#>
- Flores-Macías, C. (2016). REGRESANDO AL SOL PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA. *Revista Eficiencia Energética*, 3(12).
- Foehringer, E. (2018). Struggling US Polysilicon Producers Are a Forgotten Casualty in the Solar Trade War With China.
- Foster, E., Contestabile, M., Blazquez, J., Manzano, B., Workman, M., & Shah, N. (2017). The unstudied barriers to widespread renewable energy deployment:

- Fossil fuel price responses. *Energy Policy*, 103(June 2016), 258–264.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.050>
- Fraunhofer ISI. (2012). *Cost and benefit effects of renewable energy (RE) expansion in the German electricity and heat sector – KNEE*.
- Friedman, D. J. (2010). Progress and challenges for next-generation high-efficiency multijunction solar cells. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 14, 131–138.
- Frondel, M., Ritter, N., Schmidt, C. M., & Vance, C. (2010). Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies: The German experience. *Energy Policy*, 38(8), 4048–4056.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.029>
- Frondel, M., Schmidt, C. M., & Vance, C. (2014). Revisiting Germany’s solar cell promotion: An unfolding disaster. *Economic Analysis and Policy*, 44(1), 3–13.
<https://doi.org/10.1016/j.eap.2014.02.001>
- Fthenakis, V. M., Morris, S. C., Moskowitz, P. D., & Morgan, D. L. (1999). Toxicity of Cadmium Telluride, Copper Indium Diselenide, and Copper Gallium Diselenide. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 7(6), 489–497. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(199911/12\)7:6<489::AID-PIP287>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(199911/12)7:6<489::AID-PIP287>3.0.CO;2-N)
- Fu, R., James, T. L., & Woodhouse, M. (2015a). Economic measurements of polysilicon for the photovoltaic industry: Market competition and manufacturing competitiveness. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(2), 515–524. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2388076>
- Fu, R., James, T. L., & Woodhouse, M. (2015b). Economic measurements of polysilicon for the photovoltaic industry: Market competition and manufacturing competitiveness. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(2), 515–524. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2388076>

- GEA. (2012). *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*. University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- Gereffi, G., & Korzeniewicz, M. (1994). *Commodity chains and global capitalism*. ABC-CLIO.
- Gereffi, Gary. (1999). International trade and industrial upgrading in the apparel commodity chain. *Journal of International Economics*, 48(1), 37–70.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1996\(98\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1996(98)00075-0)
- Gereffi, Gary, & Fernandez-Stark, K. (2016). *Global Value Chain Analysis: A Primer*. Duke CGGC. <https://doi.org/10.1049/tpe.1965.0072>
- Gereffi, Gary, Humphrey, J., Kaplinsky, R., & Sturgeon, T. J. (2001). Introduction: Globalisation, Value Chains and Development. *IDS Bulletin*, 32(3), 1–8.
- Gereffi, Gary, Humphrey, J., & Sturgeon, T. (2005). The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*, 12(1), 78–104.
<https://doi.org/10.1080/09692290500049805>
- Gereffi, Gary, & Lee, J. (2012). Why the World Suddenly Cares About Global Supply Chains. *Journal of Supply Chain Management*, 48(3), 24–32.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2012.03271.x>
- Giroud, A., & Mirza, H. (2015). Refining of FDI motivations by integrating global value chains' considerations. *Multinational Business Review*, 23(1), 67–76.
<https://doi.org/10.1108/MBR-12-2014-0064>
- Glunz, S. W., Feldmann, F., Richter, A., Bivour, M., Reichel, C., Steinkemper, H., ... Hermle, M. (2015). The Irresistible Charm of a Simple Current Flow Pattern – 25 % With a Solar Cell Featuring a Full-Area Back Contact. *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, (September), 259–263.
<https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20152015-2BP.1.1>

- Goetzberger, A., Hebling, C., & Schock, H.-W. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 40(1), 1–46. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00092-X)
- Goodrich, A., James, T., & Woodhouse, M. (2011). *Solar PV Manufacturing Cost Analysis: U.S. Competitiveness in a Global Industry*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/53938.pdf>
- Goodrich, Alan, Hacke, P., Wang, Q., Sopori, B., Margolis, R., James, T. L., & Woodhouse, M. (2013). A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 114, 110–135. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.01.030>
- Goodrich, Alan, Powell, D., James, T., Woodhouse, M., & Buonassisi, T. (2013). Assessing the drivers of regional trends in solar photovoltaic manufacturing. *Energy and Environmental Science*, 6(10), 2811–2821. <https://doi.org/10.1039/c3ee40701b>
- Government, G. F. (2012). National Sustainability Development Strategy (Nachhaltigkeitsstrategie). Retrieved from www.nationalenachhaltigkeitsstrategie.de
- Grande-Acosta, G., & Islas-Samperio, J. (2017). Towards a low-carbon electric power system in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 37, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.02.001>
- Grau, T., Huo, M., & Neuhoff, K. (2012). Survey of photovoltaic industry and policy in Germany and China. *Energy Policy*, 51, 20–37. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.082>
- Green, M. A., Zhao, J., Wang, A., & Wenham, S. R. (2001). Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 65(1), 9–16. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00072-6)

- Green, M., Dunlop, E., Kopidakis, N., Hao, X., & Yoshita, M. (2021). Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, (October 2020), 3–15. <https://doi.org/10.1002/pip.3371>
- GreentechMedia. (2008a). POLYSILICON : SUPPLY , DEMAND & IMPLICATIONS FOR THE PV INDUSTRY, (June).
- GreentechMedia. (2008b). *Polysilicon: supply, demand & implications for the PV industry*.
- Guan, W., & Rehme, J. (2012). Vertical integration in supply chains: Driving forces and consequences for a manufacturer’s downstream integration. *Supply Chain Management*, 17(2), 187–201.
<https://doi.org/10.1108/13598541211212915>
- Hake, J. F., Fischer, W., Venghaus, S., & Weckenbrock, C. (2015). The German Energiewende - History and status quo. *Energy*, 92, 532–546.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.027>
- Hallegatte, Stephane; Fay, Marianne; Vogt-Schilb, A. (2013). Green Industrial Policies : When and How. *Policy Research Working Paper No. 6677*.
- Hammad, B., Al-Sardeah, A., Al-Abed, M., Nijmeh, S., & Al-Ghandoor, A. (2017). Performance and economic comparison of fixed and tracking photovoltaic systems in Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(June), 827–839. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.241>
- Hannen, P. (2018). China shakes PV world. *PV Magazine*.
- Hansen, U. E., Nygaard, I., Morris, M., & Robbins, G. (2020). The effects of local content requirements in auction schemes for renewable energy in developing countries: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127(April), 109843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109843>
- Hanwha. (2019). Hanwha Q Cells Company Brochure 2019.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- HARRIGAN, K. R. (1985). Vertical integration and corporate strategy. *Academy of Management Journal*, 28(2), 397–425. <https://doi.org/10.2307/256208>
- Heaton, G. R. J., Banks, R. D., & Ditz, D. W. (1994). Missing Links: Technology and Environmental Improvement in the Industrializing World. *World Resour. Inst.*
- Hernández Chavarria, J. (2017). *Capacidades tecnológicas y organizacionales de las empresas mexicanas participantes en la cadena de valor de la industria aeronáutica. Economía Teoría y Práctica.*
<https://doi.org/10.24275/etypuam/ne/472017/hernandez>
- Hernández, V., & Pedersen, T. (2017). Global value chain configuration: A review and research agenda. *BRQ Business Research Quarterly*, 20(2), 137–150.
<https://doi.org/10.1016/j.brq.2016.11.001>
- Hipp, A., & Kalthaus, M. (2018). *Innovative activities and firm survival during the life cycle of the German photovoltaics industry.*
- Holt, M., & Glover, C. (2006). *Energy Policy Act of 2005: Summary and Analysis of Enacted Provisions. Congressional Research Service. Resources, Science, and Industry Division.* https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6137-7_5
- Hong, J., Zhou, C., Wu, Y., Wang, R., & Marinova, D. (2019). Technology Gap, Reverse Technology Spillover and Domestic Innovation Performance in Outward Foreign Direct Investment: Evidence from China. *China and World Economy*, 27(2), 1–23. <https://doi.org/10.1111/cwe.12272>
- Hopkins, M., & Li, Y. (2016). The Rise of the Chinese Solar Photovoltaic Industry: Firms, Governments, and Global Competition. In Y. Zhou, W. Lazonick, & Y. Sun (Eds.), *China as an Innovation Nation*. Oxford Scholarship Online.
- Hoppmann, J., Huenteler, J., & Girod, B. (2014). Compulsive policy-making—The evolution of the German feed-in tariff system for solar photovoltaic power.

- Res. Policy*, 43(8), 1422–1441.
- Hoshikawa, K., Kohda, H., & Hirata, H. (1984). Homogeneous dopant distribution of silicon crystal grown by vertical magnetic field-applied czochralski method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 23(1), 37–39.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.23.L37>
- HPQ-Silicon Resources Inc. (2019). Energy Transition: HPQ - Apollon Solar Extend Agreement Regarding the Development of the Technological Clusters Needed for a Green and Low Cost Transformation of PUREVAP™ Silicon Into Solar Grade Silicon. Retrieved from <https://hpsilicon.com/>
- Hsu, C., & Chen, H. (2009). Foreign Direct Investment and Capability Development. *Manag Int Rev*, 49(585).
- Hsu, J.-Y., Poon, J. P., & Yeung, H. W.-C. (2008). External leveraging and technological upgrading among East Asian firms in the US. *European Planning Studies*, 16(1), 99–118.
- Hsu, J., & Chuang, Y. P. (2014). International technology spillovers and innovation: Evidence from Taiwanese high-tech firms. *Journal of International Trade and Economic Development*, 23(3), 387–401.
<https://doi.org/10.1080/09638199.2012.725755>
- Hu, J. L., & Yeh, F. Y. (2013). The value migration and innovative capacity of Taiwan's photovoltaic industry. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 8(2), 190–199. <https://doi.org/10.1080/15567240903394273>
- Huang, P., Negro, S. O., Hekkert, M. P., & Bi, K. (2016). How China became a leader in solar PV: An innovation system analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64(145), 777–789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.061>
- Hufbauer, G., Schott, J.J., Cimino, C., V. & W. (2003). Local Content Requirements: Report on a Global Problem, (June).
- Hutchins, M. (2018). The Weekend Read: Polysilicon and wafer manufacturer

- ranking. Retrieved from <https://www.pv-magazine.com/2018/02/24/the-weekend-read-from-the-top/>
- ICF. (2009). *American Recovery and Reinvestment Act of 2009 : A Guide to Renewable Energy and Energy Efficiency Opportunities for Local and Tribal Governments Prepared by : Prepared for :*
- ICM, & INEEL. (2019). *Cadena de valor de la generación distribuida fotovoltaica en México.*
- IEA-RETD. (2014). *Policy Instruments to Support Renewable Energy Industrial Value Chain Development (RE-ValuePolicies).* Utrecht.
- IEA. (2016a). National Survey Report of PV Power Applications in Germany.
- IEA. (2016b). *Trends 2016 in Photovoltaic Applications. Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015. Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015.*
- IEA. (2019a). *National Survey Report of PV Power Applications in China.*
- IEA. (2019b). *National Survey Report of PV Power Applications in Korea.*
- IEA. (2019c). *Trends in photovoltaic applications 2019.*
- IEA. (2020). Solar PV module manufacturing and demand 2014-2020. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-module-manufacturing-and-demand-2014-2020>
- IISD. (2014). *Germany's Green Industrial Policy Stable Policies-Turbulent Markets: The costs and benefits of promoting solar PV and wind energy.*
- IMP. (2001). *CARTERA DE NECESIDADES DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO: ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.* Ciudad de México, México. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ensayos/article/view/51033/51211>
- IMP. (2017). *Reporte de Inteligencia Tecnológica - Energía Solar Fotovoltaica.* Retrieved from

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/306072/Inteligencia_Tecnologica_BCS_220218.pdf

INEGI. (2017). Matriz insumo-producto 2017 base 2013.

INEGI. (2020). Banco de Información Económica - Salarios en México por subsector de actividad de en la industria manufacturera. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>

International, B. S. (2014). 16 De Diciembre De 2011, 52(5000), 1–6.

IPCC. (2012). *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. *Clim. Policy* (Vol. 6). <https://doi.org/10.5860/CHOICE.49-6309>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

IRENA. (2017). *Renewables 2017: Global Status Report. Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 72). Paris. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.082>

IRENA. (2019a). *Future of solar photovoltaic*. *Irena* (Vol. November). Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf

IRENA. (2019b). *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>

IRENA. (2019c). *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2019*.

IRENA. (2020). *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020*. Retrieved from www.irena.org

- IRENA -International renewable energy agency. (2014). *The Socio-economic Benefits of Solar and Wind Energy*, (May), 108.
- ISE. (2017). Net public electricity generation in Germany. Retrieved December 30, 2018, from https://www.energy-charts.de/energy_pie.htm
- ITAPU. (2018, January 16). Presentaron el Proyecto Green Silicon para producir paneles solares. *ITAPU BINACIONAL Sala de Prensa*. Retrieved from <https://www.itaipu.gov.br/es/sala-de-prensa/noticia/presentaron-el-proyecto-green-silicon-para-producir-paneles-solares>
- JA, & Solar. (2020). JA Solar. Retrieved May 11, 2020, from https://www.jasolar.com.cn/html/en/en_overview/
- Jackson, T. (2016). *Prosperity without growth: Foundations for the economy of tomorrow*.
- Jacobides, M. G., & Billinger, S. (2006). Designing the Boundaries of the Firm: From “Make, Buy, or Ally” to the Dynamic Benefits of Vertical Architecture. *Organization Science*, 17(2), 249–261. <https://doi.org/10.1287/orsc.1050.0167>
- Jean, J., Woodhouse, M., & Bulovic, V. (2019). Accelerating Photovoltaic Market Entry with Module Replacement. *Joule*, 3, 1–25.
- Jia, F., Sun, H., & Koh, L. (2016). Global solar photovoltaic industry: An overview and national competitiveness of Taiwan. *Journal of Cleaner Production*, 126, 550–562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.068>
- Jiankun, H., Zhiwei, Y., & Da, Z. (2012). China’s strategy for energy development and climate change mitigation. *Energy Policy*, 51(2012), 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.084>
- Jinko, & Solar. (2020). Jinko Solar Company Profile.
- Johnson, C. (1984). *The Industrial Policy Debate*. San Francisco Institute for Contemporary Studies.
- Johnson, O. (2016). Promoting green industrial development through local content

- requirements: India's National Solar Mission. *Climate Policy*, 16(2), 178–195.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2014.992296>
- Kaneka. (2016). World's Highest Conversion Efficiency of 26.33% Achieved in a Crystalline Silicon Solar Cell. *New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) Kaneka Corporation*, 5, 1–3. Retrieved from http://www.kaneka.co.jp/kaneka-e/images/topics/1473811995/1473811995_101.pdf
- Kaplinsky, R. (2000). Spreading the gains from globalization: what can be learned from value chain analysis? *Journal of Development Studies*, 37(2), 37.
- Kaplinsky, R., & Morris, M. (2002). A Handbook for Value Chain research, (September), 113. <https://doi.org/10.1057/9781137373755.0007>
- Kavlak, G., McNerney, J., & Trancik, J. E. (2018). Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy Policy*, 123(August 2017), 700–710. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015>
- Kempener, R., Lavagne, O., Saygin, D., Skeer, J., Vinci, S., & Gielen, D. (2015). Off-Grid Renewable Energy Systems: Status and Methodological Issues. *Irena*, 29. Retrieved from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Off-grid_Renewable_Systems_WP_2015.pdf
- King, R. R., Law, D. C., Edmondson, K. M., Fetzer, C. M., Kinsey, G. S., Yoon, H., ... Karam, N. H. (2007). 40% efficient metamorphic GaInPGaInAsGe multijunction solar cells. *Applied Physics Letters*, 90(18), 90–93.
<https://doi.org/10.1063/1.2734507>
- Koga, T. (2005). R&D Subsidy and Self Financed R&D: The Case of Japanese High-Technology Start-Ups. *Small Business Economics*, 24(1), 53–62.
- Kosacoff, B., & Ramos, A. (1999). El debate sobre política industrial. *Revista de La CEPAL*, (68).

- Kreutzmann, A., & Schmela, M. (2008). Emancipation from subsidy programs. *Photon International*.
- Landeman, M. (1992). Industrial policies and social corporatism. In J. Pekkarinen, M. Pohjola, & B. Rowthorn (Eds.), *Social Corporatism*. Oxford Clarendon Press.
- Le, T.-H., Park, D., & Castillejos-Petalcorin, C. (2021). Performance comparison of state-owned enterprises versus private firms in selected emerging Asian countries. *Journal of Asian Business and Economic Studies*.
<https://doi.org/10.1108/jabes-08-2021-0116>
- Lecocq, F., & Shalizi, Z. (2014). The economics of targeted mitigation in infrastructure. *Climate Policy*, 14(2), 18–208.
- Lee, J. (2010). Global Commodity Chains and Global Value Chains. *Oxford Research Encyclopedia of International Studies*.
<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190846626.013.110>
- Lee, K., & Lim, C. (2001). Technological regimes, catching-up and leapfrogging: findings from the Korean industries. *Research Policy*, 30, 459–483.
- Lehmann, P., & Gawel, E. (2013). Why should support schemes for renewable electricity complement the EU emissions trading scheme? *Energy Policy*, 52, 597–607. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.018>
- Lundvall, B. Å., & Borrás, S. (1997). The globalising learning economy: Implications for innovation policy. *Report from DG XII, Commission of the European Union*, 34–39.
- Luque, A., & Hegedus, S. (2002). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. (A. Luque & S. Hegedus, Eds.). Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Lütkenhorst, W., Altenburg, T., Pegels, A., & Vidican, G. (2014). Green industrial policy: Managing transformation under uncertainty. *Discussion*

Paper/Deutsches Institut Für Entwicklungspolitik: 28/2014. Bonn: Dt. Inst. Für Entwicklungspolitik.

- Lütkenhorst, W. (2010). A changing climate for industrial policy. *Making It Magazine: Industry for Development*, 3(August 4), 16–19.
- Madrigal-Martínez, M. (2017). Potenciando la Generación Distribuida en México: Nuevos Instrumentos de Regualación.
- Mahatuga, M. (2011). When do value chains go global? A theory of the spatialization of global value chains. *Global Networks*, 12(1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0374.2011.00322.x>
- Mahoney, T. A., & Frost, P. J. (1974). The role of technology in models of organizational effectiveness. *Organizational Behavior and Human Performance*, 11(1), 122–138. [https://doi.org/10.1016/0030-5073\(74\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0030-5073(74)90009-9)
- MAHUTGA, M. C. (2012). When do value chains go global? A theory of the spatialization of global value chains. *Global Networks*, 12(1), 1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0374.2011.00322.x>
- Manna, T. K., & Mahajan, S. M. (2007). Nanotechnology in the Development of Photovoltaic Cells. In *International Conference on Clean Electrical Power* (pp. 379–386).
- Marsh, P. (2012). *The new industrial revolution: Consumers, globalization and the end of mass production*. New Heaven: Yale University Press.
- Marsillac, S., Paulson, P. D., Haimbodi, M. W., Birkmire, R. W., & Shafarman, W. N. (2002). High-efficiency solar cells based on Cu(InAl)Se₂Cu(InAl)Se₂ thin films. *Applied Physics Letters*, 81(7). <https://doi.org/10.1063/1.1499990>
- Masuko, K., Shigematsu, M., Hashiguchi, T., Fujishima, D., Kai, M., Yoshimura, N., ... Okamoto, S. (2014). Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(6), 1433–1435.

<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2352151>

Mathews, J. A., & Cho, D. S. (2000). *Tiger Technology: The Creation of a Semiconductor Industry in East Asia*. Cambridge: Cambridge University Press.

Mathews, John A., Hu, M. C., & Wu, C. Y. (2011). Fast-follower industrial dynamics: The case of Taiwan's emergent solar photovoltaic industry. *Industry and Innovation*, 18(2), 177–202.

<https://doi.org/10.1080/13662716.2011.541104>

Maycock, P., & Bradford, T. (2007). *PV Technology, Performance, and Cost, 2007 Update*.

Maycock, P. D. (1997). Cost reduction in PV manufacturing: Impact on grid-connected and building-integrated markets. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 47(1–4), 37–45. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00022-6)

Mcgowan, F. (1996). The European Union and National Industry Policy. *Energy Policy*, 132–152.

McKinsey & Company. (2011). Boost! Transforming the powertrain value chain: a portfolio challenge.

MENA. (2015). *Local Manufacturing Potential for Solar Technology Components in Egypt*.

Menger, C. (2007). *PRINCIPLES OF ECONOMICS*. Ludwig von Mises Institute.

México, G. de la R. (2015). Intended Nationally Determined Contribution, 21.

Retrieved from

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/162973/2015_indc_ing.pdf

MississippiSilicon. (2020). Mississippi Silicon is the first domestic manufacturer of raw silicon metal built in the past 40 years and produces approximately 10% of all silicon metal used in the United States. Retrieved from

<https://www.missilicon.com/>

- Morales-acevedo, A. (2019). Ultra-Thin Perovskite Solar Cells Analytical Model Involving Radiative and Nonradiative Carrier Recombination Mechanisms. *Physica Status Solidi*, 1900340, 1–7. <https://doi.org/10.1002/pssb.201900340>
- Morales-Acevedo, A. (2007). 40 años de Investigación y Desarrollo de Celdas Solares en el CINVESTAV.
- Morris, A., Nivola, P., & Schultze, C. (2012). Clean energy: Revisiting the challenges of industrial policy. *Energy Economics*, 34, 534–542.
- Mudambi, R. (2008). Location, control and innovation in knowledge-intensive industries. *Journal of Economic Geography*, 8(5), 699–725. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbn024>
- Mudambi, R., & Venzin, M. (2010). The Strategic Nexus of Offshoring and Outsourcing Decisions. *Journal of Management Studies*, 47(8), 1510–1533. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2010.00947.x>
- Myrvågnes, V. (2008). *Analyses and Characterization of Fossil Carbonaceous Materials for Silicon Production. PhD. Thesis*. Norwegian University of Science and Technology.
- N. Mason. (2013). Impact of Materials Prices on Cost of PV Manufacture – Part I.
- Nakajima, K., & Usami, N. (2009). Crystal Growth of Si for Solar Cells. In *Advances in Materials Research* (p. 259). Springer.
- Nakamura, K., Saishoji, T., Kubota, T., Iida, T., Shimanuki, Y., Kotooka, T., & Tomioka, J. (1997). Formation process of grown-in defects in Czochralski grown silicon crystals. *Journal of Crystal Growth*, 180(SEPTEMBER 1997), 61–72. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(97\)00206-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(97)00206-6)
- Nathaney, P., Collison, K., Finan, R., Haydel, J., & Johal, H. (2016). Energizing Policy Revolution for the Grid Revolution. *CF White Paper No. September 2016*.
- Nathani, C., Schmid, C., & Resch, G. (2012). *Methodological Guidelines for*

Estimating the Employment Impacts of Using Renewable Energies in Electricity Generation Annex 2: Country Fact Sheets.

- Nature, & Energy. (2019). A decade of perovskite photovoltaics. *Nature Energy*, 4(January), 20181221. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0323-9>
- Naudé, W. (2010). *Industrial Policy*, 2010(33).
- Needleman, D. B., Poindexter, J. R., Kurchin, R. C., Marius Peters, I., Wilson, G., & Buonassisi, T. (2016). Economically sustainable scaling of photovoltaics to meet climate targets. *Energy and Environmental Science*, 9(6), 2122–2129. <https://doi.org/10.1039/c6ee00484a>
- Nemet, G. F. (2006). Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics. *Energy Policy*, 34(17), 3218–3232. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.020>
- Ng, M. (2011). Economic impact of the photovoltaic industry in China after the financial crisis of 2009. *Chinese Economy*, 44(3), 22–44. <https://doi.org/10.2753/CES1097-1475440302>
- Odden, J. O., Halvorsen, G., Rong, H., & Glockner, R. (2008). Comparison on the energy consumption in different production processes for solar grade silicon. *Silicon for the Chemical and Solar Industry*, (IX).
- Okioga, I. T., Wu, J., Sireli, Y., & Hendren, H. (2018). Renewable energy policy formulation for electricity generation in the United States. *Energy Strategy Reviews*, 22(August), 365–384. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.008>
- Oliveira, V. D. De. (2018). Tapping of metallurgical silicon furnaces – a brief comparison between continuous and discontinuous processes. *Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2(October), 14–17.
- OMPI. (2017). *Capital intangible en las cadenas globales de valor*. Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Retrieved from

https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/es/wipo_pub_944_2017.pdf
<https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4225>

Osborne, M. (2015). LDK Solar collapses into bankruptcy in China. *PV TECH*. Retrieved from <https://www.pv-tech.org/news/ldk-solar-collapses-into-bankruptcy-in-china>

Osborne, M. (2017). ReneSola exits solar manufacturing. *PV TECH*. Retrieved from <https://www.pv-tech.org/news/renesola-exits-solar-manufacturing>

Osborne, M. (2018a). REC Silicon selling polysilicon below production cash cost as sales plummet almost 70%. Retrieved March 3, 2019, from <https://www.pv-tech.org/news/rec-silicon-selling-polysilicon-below-production-cash-cost-as-sales-plummet>

Osborne, M. (2018b). Wacker delivers worst quarterly polysilicon financial results. Retrieved March 3, 2019, from <https://www.pv-tech.org/news/wacker-delivers-worst-quarterly-polysilicon-financial-results>

Parcell, J., Brees, M., & Giddens, N. (2004). *Capturing vs. Creating Value. A decision maker.*

Park, S.-H., & Lee, Y.-G. (2011). Perspectives on Technology Transfer Strategies of Korean Companies in. *Journal of Technology Management & Innovation*, 6(1). Retrieved from <http://www.jotmi.org>

Parous, L. (2015). *Greenfield Metallurgical Silicon Manufacturing. Understanding the basics of greenfield silicon projects.*

PCC. (2013). Silicon Metal Plant At Bakki in Húsavík With Production Capacity of Up To 66 , 000 Tons.

PCC. (2020). Advanced silicon metal production plant in Iceland. Retrieved from <https://www.pcc.is/>

Pearce, D. (1991). The Role of Carbon Taxes in Adjusting to Global Warming. *The*

- Economic Journal*, 101(407), 938–948.
- Pegels, A. (2014). Green industrial policy in emerging countries. *Routledge Studies in Ecological Economics: Vol. 34*. London: Routledge Taylor & Francis Group.
- Pegels, Anna, & Lütkenhorst, W. (2014). Is Germany's energy transition a case of successful green industrial policy? Contrasting wind and solar PV. *Energy Policy*, 74(C), 522–534. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.031>
- Peres, W., & Primi, A. (2009). Theory and Practice of Industrial Policy. Evidence from the Latin American Experience. *Desarrollo Productivo*, (February), 1–51. Retrieved from <http://www.eclac.org>
- Pérez Hernández, C. C., Lara Gómez, G., & Gómez Hernández, D. (2017). Evolución de la capacidad tecnológica en México. Aplicación del análisis estadístico multivariante de cluster. *Contaduría y Administración*, 62(2), 505–527. <https://doi.org/10.1016/j.cya.2017.01.002>
- Pern, J. (2008). Module Encapsulation Materials, Processing and Testing (Presentation). *APP International PV Reliability Workshop*. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44666.pdf>
- Peters, G., & Woolley, J. T. (1978). Solar Photovoltaic Energy Research, Development, and Demonstration Act of 1978. *The American Presidency Project*.
- Phi, N. T. M., Taghizadeh-Hesary, F., Tu, C. A., Yoshino, N., & Kim, C. J. (2021). Performance Differential between Private and State-owned Enterprises: An Analysis of Profitability and Solvency. *Emerging Markets Finance and Trade*, 57(14), 3913–3928. <https://doi.org/10.1080/1540496X.2020.1809375>
- Piffer, L. (2011). 2 GW Vertical Integration: The LDK Solar approach. In *The Solar Future*. Brussels, March 23, 2011.
- Pinder, J. (1982). Causes and kinds of industrial policy. In *National Industrial*

- Strategies and the World Economy* (First edit). Croom Helm, London.
- PingQing, L., Yonghui, G., & Qiang, G. (2007). Study on the upgrading of china integrated circuit (ic) industry up to the global value chain: a case study. *Manage. Sci. Eng.*, 1(2), 14.
- Platzer, M. (2012). *U.S. Solar Photovoltaic Manufacturing: Industry Trends, Global Competition, Federal Support*. Congressional Research Service. <https://doi.org/10.1117/12.2015609>
- Poppo, L., & Zenger, T. (2002). Do formal contracts and relational governance function as substitutes or complements? *Strategic Management Journal*, 23(8), 707–725. <https://doi.org/10.1002/smj.249>
- Porter, M. (1985). *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. Free Press. New York.
- Powell, D. M., Fu, R., Horowitz, K., Basore, P. A., Woodhouse, M., & Buonassisi, T. (2015). The capital intensity of photovoltaics manufacturing: Barrier to scale and opportunity for innovation. *Energy and Environmental Science*, 8(12), 3395–3408. <https://doi.org/10.1039/c5ee01509j>
- Powell, D. M., Winkler, M. T., Goodrich, A., & Buonassisi, T. (2013). Modeling the cost and minimum sustainable price of crystalline silicon photovoltaic manufacturing in the united states. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(2), 662–668. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2230056>
- Prateek, S. (2018). India’s rooftop solar market – where is it now and where is it going? *Mercom India*. Retrieved from <https://mercomindia.com/rooftop-solarwhere-its-going-intersolar/>
- Priem, R. L., & Swink, M. (2012). A Demand-side Perspective on Supply Chain Management. *Journal of Supply Chain Management*, 48(2), 7–13. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2012.03264.x>
- Prontera, A. (2009). Energy policy: Concepts, actors, instruments and recent

- developments. *World Political Science Review*, 5(1).
<https://doi.org/10.2202/1935-6226.1063>
- PV Exchange. (2019). Price Index. Retrieved from
<https://www.pvexchange.com/de/price-index>
- PVinsights. (2020). PV Industry supplies Spot Prices. Retrieved from
<http://pvinsights.com/ES/>
- PwC. (2015). Conscious uncoupling? *Low Carbon Economy Index 2015*.
- Qian, L., Agarwal, R., & Hoetker, G. (2012). Configuration of Value Chain Activities: The Effect of Pre-Entry Capabilities, Transaction Hazards, and Industry Evolution on Decisions to Internalize. *Organization Science*, 23(5), 1330–1349. <https://doi.org/10.1287/orsc.1110.0682>
- Quitow, R. (2015). Dynamics of a policy-driven market: the co-evolution of technological innovation systems for solar photovoltaics in China and Germany. *Environ. Innov. Soc. Transit.*, 17, 126–148.
- Quitow, R., Huenteler, J., & Asmussen, H. (2017). Development trajectories in China's wind and solar energy industries: how technology-related differences shape the dynamics of industry localization and catching up. *J. Clean. Prod.*, 158, 122–133.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580–1608.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
- REC. (2019). *REC GROUP Solar Market Insight. Full-year 2018 results*. Retrieved from
https://usa.recgroup.com/sites/default/files/documents/fy_2018_rec_group_solar_market_insight_report.pdf
- Reich, R. (1982). Why the U.S. Needs an Industrial Policy? *Harvard Business*

- Review*, (Jan./Feb.).
- REN21. (2019). *Renewables 2019 global status report*.
- REN21. (2020). *Renewables 2020 Global Status Report*. REN21 Secretariat.
Retrieved from <http://www.ren21.net/resources/publications/>
- Roberts, M., Copper, J., Bruce, A., Barton, T., Haghdadi, N., & Hu, R. (2018). *The Solar Trends Report for Solar Citizens*. Retrieved from http://apvi.org.au/wp-content/uploads/2018/12/Solar-Trends-Report-for-Solar-CitizensFINAL_11-12-18_2_logos.pdf
- Robinson, R. D. (1991). *The International Communication of Technology: A Book of Readings*. New York: Taylor & Francis.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475.
- Rodrik, D. (2004). Industrial Policy for the Twenty-First Century. *Economic Policy Research*.
- Rodrik, D. (2014). Green Industrial Policy. *Oxford Review of Economic Policy*, 30(3), 469–491.
- Roza, M., den Bosch, F. A. J. Van, & Volberda, H. W. (2011). Offshoring strategy: Motives, functions, locations, and governance modes of small, medium-sized and large firms. *International Business Review*, 20(3), 314–323.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2011.02.002>
- Rozenberg, J., Vogt-Schilib, A., & Hallegatte, S. (2014). *Transition to clean capital, irreversible investment and stranded assets* (No. 6859).
- Sabas, M. (2016). *History of Solar Power*. Retrieved from https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/solar/history-of-solar-power/#_ftnref6
- SAGARPA. (2016). *Proyecto Bioeconomía 2010-2018 Vol. 1*. Ciudad de México,

- México. Retrieved from
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD003213.pdf>
- Sánchez-Juárez, Aaron. (2017). Curso Sistemas Fotovoltaicos. IER-UNAM.
- Sánchez-Juárez, Aaron, Martínez-Escobar, D., Santos-Magdaleno, R. de la L., Ortega-Cruz, J., & Sánchez-Pérez, P. A. (2017). *Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial*. (J. T. Mazón, Ed.) (Primera Ed). Ciudad de México, México: CONACYT.
- Sandor, D., Fulton, S., Engel-Cox, J., Peck, C., & Peterson, S. (2018). System dynamics of polysilicon for solar photovoltaics: A framework for investigating the energy security of renewable energy supply chains. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1), 1–27. <https://doi.org/10.3390/su10010160>
- Schatan-Pérez, C., & Cabrera-Espinosa, C. (2020). *Hacia una política de desarrollo productivo en México: Un análisis de economía política*.
- Schroeder, M. (2016). *Value Theory* (Fall 2016). (E. N. Zalta, Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
- SE. (2013). *Plan de Desarrollo Innovador 2013- 2018*.
- SE. (2017). *Perfil de Mercado del Sílice*.
- SEAI. (2017). *Ireland's Solar Value Chain Opportunity*. *Sustainable Energy Authority of Ireland*. Retrieved from
<https://www.seai.ie/resources/publications/Solar-Chain-Opportunity-report.pdf>
- Secretaría de Economía. (2017). Catálogo de Bienes y Servicios de la Industria Eléctrica (Generación). Retrieved October 10, 2018, from
<file:///C:/Users/ISEP-RENOVABLE/Downloads/CatalogodebienesyserVICIOSdelaindustriaelectrica.pdf>
- Secretaría de Economía. (2018). Registro de Proveedores de la Industria Eléctrica.

- Retrieved October 10, 2018, from <http://www.provedores-energia.economia.gob.mx/regprov/#/busquedaPublica/electrica>
- SEIA. (2018). Renewable Energy Standards. Retrieved from <https://www.seia.org/initiatives/renewable-energy-standards>
- Selwyn, B. (2015). Commodity chains, creative destruction and global inequality: a class analysis. *Journal of Economic Geography*, 15(2), 253–274. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbu014>
- SEMARNAT. (2020). Nationally Determined Contributions Registry. *Unfccc*, (September), 1–26. Retrieved from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs/nationally-determined-contributions-ndcs#eq-5%0Ahttps://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement/nationally-determined-cont>
- SENER. (2016). *Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030*, 1, 156. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- SENER. (2017a). *Mapa de Ruta Tecnológica para la Industria Solar Fotovoltaica*.
- SENER. (2017b). Primer Análisis Sobre los Beneficios de la Generación Limpia Distribuida y Eficiencia Energética en Mexico, 22. Retrieved from http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/201875/Beneficios_de_la_GLD_y_EE_en_Mexico.pdf
- SENER. (2018). *Política Pública para promover la Generación Distribuida en Mexico*.
- SENER. (2019a). *PRODESEN 2019-2033*.
- SENER. (2019b). *Programa de desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional*.
- Shaw, V. (2018). China releases new provisions for PV development in 2018. *PV Magazine*.
- Sinovoltaics. (2011). Solar panel manufacturing process: From cell to module.

- Retrieved November 18, 2017, from <http://sinovoltaics.com/learning-center/manufacturing/solar-panel-manufacturing-process-from-cell-to-module/>
- Sjödin, D., Parida, V., & Jovanovic, M. (2020). Value Creation and Value Capture Alignment in Business Model Innovation: A Process View on Outcome-Based Business Models, *37*(2), 158–183. <https://doi.org/10.1111/jpim.12516>
- SMA. (2017). Stand-alone solar solutions. Retrieved November 20, 2017, from <https://www.sma.de/en/home-systems/solar-system-off-grid.html>
- SNE. (2019). *Estadísticas de carreras profesionales por área*. Retrieved from <http://www.observatoriolaboral.gob.mx/static/estudios-publicaciones/Ingenierias.html>
- SolarPowerEurope. (2018). *SolarPower Europe's Global Market Outlook 2018 – 2022*.
- SolarPowerEurope. (2019). *SolarPower Europe's Global Market Outlook 2019 – 2023*.
- Son, C., Moon, H., & Ahn, N. (2015). Overview of the PV Industry and R&D Strategies in Korea at the 2nd Growth Stage. *Israel Journal of Chemistry*, *736*, 978–990. <https://doi.org/10.1002/ijch.201500004>
- Stabell, C. B., & Fjeldstad, Ø. D. (1998). Configuring value for competitive advantage: on chains, shops, and networks. *Strategic Management Journal*, *19*(5), 413–437. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199805\)19:5<413::AID-SMJ946>3.3.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199805)19:5<413::AID-SMJ946>3.3.CO;2-3)
- Sternkopf, T. (2017). Feed-in tariff (EEG feed-in tariff). Retrieved from <http://www.res-legal.eu/search-by-country/germany/single/s/res-e/t/promotion/aid/feed-in-tariff-eeg-feed-in-tariff/lastp/135/>
- Sturgeon, T. J. (2002). Modular production networks: a new American model of industrial organization. *Industrial and Corporate Change*, *11*(3), 451–496. <https://doi.org/10.1093/icc/11.3.451>

- Talik, E., & Oboz, M. (2013). Czochralski method for crystal growth of reactive intermetallics. *Acta Physica Polonica A*, *124*(2), 340–343.
<https://doi.org/10.12693/APhysPolA.124.340>
- Teng, F., Gu, A., Yang, X., Wang, X. (2015). Pathways to deep decarbonization in China. *Sustainable Development Solutions Network (SDSN) and Institute for Sustainable Development and International Relations (IDDRI): Paris, France.*
- TERI. (2019). *Policy Paper on Solar PV Manufacturing in India : Silicon Ingot & Wafer - PV Cell - PV Module.*
- Torre Cepeda, L. E., Alvarado Ruiz, J. A., & Quiroga Treviño, M. (2017). Matrices Insumo-Producto Regionales: Una Aplicación al Sector Automotriz en México, 48.
- Trabish, H. K. (2014). SolarCity, SunPower lead solar industry towards vertical integration. Retrieved May 11, 2020, from <https://www.utilitydive.com/news/solarcity-sunpower-lead-solar-industry-towards-vertical-integration/284337/>
- TSEC. (2015). Solar Module/Cell Manufacturing Process Introduction. Retrieved November 18, 2017, from http://www.tsecpv.com/en-global/solar_knowledge/index/zero_house_02
- Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N. A., & Selvaraj, J. A. L. (2013). Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *20*, 443–461.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>
- U.S. Department of Treasury. (2009). *1603 Program: Payments for Specified Energy Property in Lieu of Tax Credits.*
- UNDP. (2015). Is the Private Sector more Efficient? A cautionary tale. *UNDP Global Centre for Public Service Excellence.* Retrieved from <https://www.researchgate.net/profile/Sumedh->

Rao/publication/290433484_Discussion_Paper_Is_the_Private_Sector_More_Efficient_A_cautionary_tale/links/5697b6ae08ae1c4279051487/Discussion-Paper-Is-the-Private-Sector-More-Efficient-A-cautionary-tale.pdf

UNEP. (2011). Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication : a synthesis for policymakers.

UNIDO. (2009). *Industrial Value Chain Diagnostics: An Integrated Tool. Building blocks for a holistic and rapid analytical tool.*

Unruh, G. C. (2000). Understanding carbon lock-in. *Energy Policy*, 28(12), 817–830.

USGS. (2020). *Mineral Industry Surveys - Silicon in September 2020.*

USITC. (2018). *Silicon Metal from Australia, Brazil, Kazakhstan, and Norway. Investigation Nos. 701-TA-567-569 and 731-TA-1343-1345 (Final) (Vol. 4773).* Washington, DC.

Valdez-Juárez, L. E., Solano-Rodríguez, O. J., & Martin, D. P. (2018). Modes of learning and profitability in Colombian and Mexican SMEs. *Journal of High Technology Management Research*, 29(2), 193–203.

<https://doi.org/10.1016/j.hitech.2018.09.007>

VDMA. (2020). International Technology Roadmap for Photovoltaic. *Itrpv*, (April), 88. Retrieved from <https://itrpv.vdma.org/en/ueber-uns>

Verdin, P., & Tackx, K. (2015). Are You Creating or Capturing Value ? A dynamic framework for sustainable strategy. *M-RCBG Associate Working Paper Series*, 36.

von Ammon, Wilfred. (2014). FZ and CZ crystal growth: Cost driving factors and new perspectives. *Phys Status Solidi A*, 2470(11), 2461–2470.

<https://doi.org/10.1002/pssa.201400043>

von Ammon, Wilfried, Dornberger, E., Oelkrug, H., & Weidner, H. (1995). The dependence of bulk defects on the axial temperature gradient of silicon crystals

- during Czochralski growth. *Journal of Crystal Growth*, 151(3–4), 273–277.
[https://doi.org/10.1016/0022-0248\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/0022-0248(95)00063-1)
- WACC Expert. (2019). Retrieved from <http://www.waccexpert.com/>
- WAD, P. (2008). The Development of Automotive Parts Suppliers in Korea and Malaysia: A Global Value Chain Perspective. *Asia Pacific Business Review*, 14(1), 47–64. <https://doi.org/10.1080/13602380701661002>
- Wang, W. L., & Kryszak, M. (2020). Technological Progress and Supply Base under Uncertain Market Conditions : The Case Study of the Taiwanese c-Si Solar Industry 2016–2019. *Energies*.
- Wang, Y., Luo, G., & Guo, Y. (2014). Why is there overcapacity in China’s PV industry in its early growth stage? *Renewable Energy*, 188–194.
- WBGU. (2014). Human Progress within Planetary Guardrails: A Contribution to the SDG Debate.
- Weil, R. L., Schipper, K., & Francis, J. (2014). *FINANCIAL ACCOUNTING: AN INTRODUCTION TO CONCEPTS, METHODS, AND USES*. (E. Joyner, R. Dewey, C. Avery, & A. Loch, Eds.). Mason, OH, USA: South-Western, Cengage Learning.
- Wiedmann, T. O., Schandl, H., Lenzen, M., D., M., Suh, S., West, J., & Kanemoto, K. (2015). The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,.
- Woditsch, P., & Koch, W. (2002). Solar grade silicon feedstock supply for PV industry. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 72(1–4), 11–26.
[https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(01\)00146-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(01)00146-5)
- Woodhouse, M., Smith, B., Ramdas, A., & Robert Margolis. (2019a). Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Roadmap. *National Renewable Energy Laboratory*, (February), 1–46.

- Woodhouse, M., Smith, B., Ramdas, A., & Robert Margolis. (2019b). Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Roadmap, (February), in press.
- World Bank. (2012). Inclusive green growth: The pathway to sustainable development.
- Wu, C. Y., & Mathews, J. A. (2012). Knowledge flows in the solar photovoltaic industry: Insights from patenting by Taiwan, Korea, and China. *Research Policy*, 41(3), 524–540. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.10.007>
- Xakalashé, B. S., & Tangstad, M. (2011). Silicon processing: from quartz to crystalline silicon solar cells. *Southern African Pyrometallurgy*, (March), 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.069>
- Xie, H., Zhang, C., Hao, B., Liu, S., & Zou, K. (2012). Review of solar obligations in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.140>
- Yamaguchi, M., Nishimura, K. I., Sasaki, T., Suzuki, H., Arafune, K., Kojima, N., ... Araki, K. (2008). Novel materials for high-efficiency III-V multi-junction solar cells. *Solar Energy*, 82(2), 173–180. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.011>
- Yeniyurt, S., Henke, J. W., & Cavusgil, E. (2013). Integrating global and local procurement for superior supplier working relations. *International Business Review*, 22(2), 351–362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2012.06.004>
- Ying, W. Z., Hu, G., & Dadi, Z. (2006). China's achievements in expanding electricity access for the poor. *Energy for Sustainable Development*, 10(3), 5–16. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60539-6](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60539-6)
- Yingli, & Solar. (2018). *Yingli Green Energy Holding Company Limited*. Retrieved from <http://ir.yinglisolar.com/static-files/382e00b4-ee9-4d46-8885->

64e7340502ac

- Yu, J. (2014). A comparative analysis of public policies in favor of solar photovoltaic (PV) development between Germany and China. *La Lettre de l'I-Tésé-CEA*, 23, 11–18.
- Zhang, F., & Gallagher, K. S. (2016). Innovation and technology transfer through global value chains: Evidence from China's PV industry. *Energy Policy*, 94, 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.014>
- Zhang, S., & He, Y. (2013). Analysis on the development and policy of solar PV power in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 393–401. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.002>
- Zhao, Z. Y., Zhang, S. Y., Hubbard, B., & Yao, X. (2013). The emergence of the solar photovoltaic power industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21(2013), 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.066>
- Zhenjiao, W. et al. (2012). Advanced PERC and PERL production cells with 20.3% record efficiency for standard commercial p-type silicon wafers. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20, 260–268. <https://doi.org/10.1002/pip.2178>
- Zhi, Q., Sun, H., Li, Y., Xu, Y., & Su, J. (2014). China's solar photovoltaic policy: An analysis based on policy instruments. *Applied Energy*, 129, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.014>
- Zhou, D., Chong, Z., & Wang, Q. (2020). What is the future policy for photovoltaic power applications in China? Lessons from the past. *Resources Policy*, 65.
- Zou, H., Du, H., Ren, J., Sovacool, B. K., Zhang, Y., & Mao, G. (2017). Market dynamics, innovation, and transition in China's solar photovoltaic (PV) industry: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.053>