



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – FUENTES RENOVABLES

ANÁLISIS DE LA CADENA DE FABRICACIÓN DE LAS PARTES Y
COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

TESIS
PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MIGUEL ÁNGEL GUEVARA NIETO

TUTOR PRINCIPAL:
DR. AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM

CDMX
NOVIEMBRE DE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

A mi familia de sangre que me recibió y a mi familia de espíritu que me eligió.

“Un experto es una persona que ha cometido todos los errores que se pueden cometer en un determinado campo”

-Niels Bohr-

Agradecimientos

A mi asesor el Dr. Aarón Sánchez por el tiempo y conocimientos brindados para culminar este trabajo. De igual manera al Mto. José Ortega por siempre brindarme su buen ánimo y experiencia.

Un especial agradecimiento a los doctores y doctoras que me dieron clases y me tuvieron toda la paciencia del mundo durante mi maestría.

Extiendo mi gratitud a mis compañeros de generación con los que compartí grandes momentos y a los miembros del equipo de materiales solares, popularmente conocidos como “los casetos”, por siempre sacarme una sonrisa en esos momentos de mayor estrés.

Por último, a mis padres, hermana y sobrina por todo su apoyo e inspiración durante este preciado capítulo en mi vida. Y a mi familia de Guadalajara quienes, a pesar de que los veo poco, sé que siempre están ahí para mí.

Resumen

Con la intención de despertar el interés de productores e inversionistas para que consideren a los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) como un nicho de oportunidad para invertir en procesos de manufactura de celdas, módulos y sistemas energéticos integrados con Tecnología Solar Fotovoltaica (TSFV) de silicio (Si) cristalino, en este trabajo de tesis se presenta una recopilación de información sobre el estado del arte de dicha TSFV, así como su participación en el mercado mundial y nacional. Se detalla el funcionamiento interno de una celda fotovoltaica de Si cristalino y se identifican los insumos requeridos para su elaboración y los requerimientos de materiales para la integración de las celdas en el concepto de Módulo Fotovoltaico (MFV).

Se hace una identificación de los insumos más importantes y el valor que representan en la elaboración de la celdas solar, y así mismo, para la integración de éstas en el concepto de MFV, determinando en cada paso, el rol que juegan estos insumos y componentes en la cadena de fabricación asociada a integración de la TSFV en un sistema energético. Para ello, se eligió unidad comparativa una potencia de 1.0 kW; es decir, se analiza la cadena de fabricación para la integración y puesta en marcha de un SFV hipotético, de tecnología de Si cristalino, de 1.0 kW de potencia pico.

Posteriormente se identifican las empresas mexicanas que fabrican componentes equivalentes a los requeridos en el ensamble del MFV y se analiza si éstas tienen la capacidad técnica y de producción suficiente para satisfacer, dependiendo lo menos posible de mano de obra e insumos provenientes del extranjero, el requerimiento anual de 370 MW que la Secretaría de Energía (SENER) ha proyectado para la Industria Solar Fotovoltaica (ISFV) nacional durante la década comprendida entre el 2022 y el 2032. Se hace énfasis en que, respecto a aquellos componentes que no se fabrican en México, es posible obtener el conocimiento para su fabricación mediante la adquisición de los derechos de patente o la compra de paquetes tecnológicos especializados, provenientes de fabricantes extranjeros.

Uno de los principales problemas detectados es la falta de producción nacional de polisilicio, lingotes, obleas, y procesamiento de celdas solares, a pesar de que en México se tiene una producción minera de sílice para satisfacer, sobradamente, el requerimiento nacional que se estima en este trabajo para el sector solar fotovoltaico durante la próxima década y exportar el remanente para participar, de forma significativa, en el mercado mundial tanto del Si como del solar Fotovoltaico (FV).

Con base en la información obtenida de fuentes extranjeras, se estima que la implementación de plantas de manufactura para refinación de Si, crecimiento de lingotes y rebanado de celdas, procesamiento de celdas solares y ensamblado de MFV, tendría un costo total de usd\$185.22 millones (2020).

Se concluye que, dentro del país, no existe impedimento tecnológico para solventar la demanda nacional de partes y componentes que integran al MFV y SFV, quedando el factor económico como el único inconveniente. El crecimiento del sector solar fotovoltaico es inminente tanto en nuestro país como en el mundo, la oportunidad de negocio existe y México tiene todos los recursos y la capacidad técnica para aprovechar este gran nicho de oportunidad, obteniendo una reducción en la dependencia hacia productos provenientes del extranjero y favoreciendo la autosuficiencia de la ISFV.

Si esto se consigue como una realidad a corto plazo, se estará consolidando la ISFV, creando fuentes de trabajo y sobre todo una tendencia a la no dependencia de insumos extranjeros y el fortalecimiento hacia una sustentabilidad energética que se base en Fuentes de Energía Renovable (FER) como lo es la solar FV.

Abstract

With the intention of awakening the interest of producers and investors to consider Photovoltaic Systems as a niche of opportunity to invest in manufacturing processes of cells, modules and energy systems integrated with Solar Photovoltaic Technology of silicon crystalline, this thesis work presents a compilation of information on the state of the art of said Solar Photovoltaic Technology as well as its participation in the world and national market. The internal functioning of a crystalline silicon photovoltaic cell is detailed, and the inputs required for its elaboration and the material requirements for the integration of the cells in the concept of Photovoltaic Module are identified. An identification is made of the most important inputs and the cost they represent in the elaboration of the solar cells, and likewise, for the integration of these in the Photovoltaic Module concept, determining in each step, the role that these inputs and components play in the fabrication chain associated with the manufacture and integration of the Solar Photovoltaic Technology in an energy system. For this, a power of 1.0 kW was chosen as the comparative unit; In other words, the fabrication chain for the manufacture and commissioning of a hypothetical photovoltaic system, using crystalline silicon technology, with a peak power of 1.0 kW is analyzed. Subsequently, the Mexican companies that manufacture components equivalent to those required in the assembly of the Photovoltaic Module are identified and it is analyzed if they have sufficient production capacity to satisfy, depending as little as possible on labor and inputs from abroad, the annual requirement of 370 MW that SENER has projected for the national photovoltaic solar industry during the decade between 2022 and 2032. It is emphasized that, with respect to those components that are not manufactured in Mexico, it is possible to obtain knowledge for their manufacture through the acquisition of patent rights or the purchase of specialized technological packages from foreign manufacturers. One of the main problems detected is the lack of national production of polysilicon, ingots, wafers, and processing of solar cells, despite the fact that Mexico has a mining production of silica to meet, more than enough, the national requirement that is estimated at this work for the solar photovoltaic sector during the next decade and export the remainder to participate, in a significant way, in the world market for both silicon and solar photovoltaic.

Based on information obtained from foreign sources, it is estimated that the implementation of manufacturing plants for silicon refining, ingot growth and cell slicing, solar cell processing and Photovoltaic Module assembly, would have a total cost of usd\$185.22 million (2020).

It is concluded that, within the country, there is no technological impediment to meet the national demand for parts and components that make up the Photovoltaic Module and Photovoltaic Systems, leaving the economic factor as the only disadvantage. The growth of the solar photovoltaic sector is imminent both in our country and in the world, the business opportunity exists and Mexico has all the resources and the technical capacity to take advantage of this great opportunity niche, obtaining a reduction in dependence on products from the abroad and favoring the self-sufficiency of the Mexican photovoltaic solar industry.

If this is achieved as a short-term reality, the photovoltaic solar industry will be consolidating, creating jobs and especially a trend towards non-dependence on foreign inputs and strengthening towards energy sustainability based on renewable energy sources as is the solar photovoltaic.

Contenido

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	vi
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas.....	xiii
Lista de gráficas.....	xv
Lista de acrónimos.....	xvi
Introducción.....	1
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Estructura de la tesis.....	5
I Tecnologías fotovoltaicas y celdas basadas en Si cristalino	6
I.1 Introducción del capítulo.....	6
I.2 Efecto fotovoltaico y celdas solares	7
I.3 Características eléctricas de la celda solar.....	9
I.4 Tecnologías FV disponibles en el mercado actual	11
I.5 Tecnologías de celdas solares de Si cristalino.....	14
I.5.1 Refinación del Si	14
I.5.2 Crecimiento de Si monocristalino	15
I.5.3 Crecimiento de Si policristalino.....	17
I.5.4 Elaboración de celdas de Si cristalino	18
I.5.5 Configuración y componentes de una celda solar de Si cristalino.....	19
I.5.6 Celdas bifaciales	20
I.5.7 Celdas con tecnología PERC	20
I.5.8 Celdas HJT.....	21
I.5.9 Celdas “Shingled Cells” (sin conexiones alámbricas) y celdas con contactos posteriores (back contact cells).....	22
II Módulos de Si cristalino y sistemas FV.....	23
II.1 Introducción de capítulo.....	23
II.2 Constitución general de un módulo FV.....	24

II.3	Construcción de un MFV de Si cristalino	26
II.4	Oferta comercial de MFV manufacturados en México	28
II.5	El arreglo fotovoltaico.....	29
II.5.1	Conexión en serie de MFV.....	29
II.5.2	Conexión en paralelo de módulos FV.....	30
II.5.3	Conexión serie-paralelo	31
II.6	El sistema fotovoltaico	32
II.7	Partes y componentes del SFV.....	32
II.8	Conclusión de capítulo	33
III	Mercado potencial mexicano y la cadena de fabricación de la TSFV	34
III.1	Introducción	34
III.2	Desarrollo del mercado fotovoltaico internacional	34
III.3	Participación de la tecnología de Si cristalino en el mercado solar FV mundial.....	36
III.4	El desarrollo del sector fotovoltaico en México.....	37
III.4.1	Evolución de la CIFV mexicana.....	39
III.5	El mercado potencial mexicano	39
III.5.1	Evolución esperada de la CIFV en México.....	41
III.5.2	Generación distribuida.....	42
III.6	La cadena de fabricación de los sistemas solares fotovoltaicos	43
III.7	Conclusión de capítulo	46
IV	Cuantificación de insumos y material para cada etapa de la cadena de fabricación de un SFV de 1.0 kW.....	46
IV.1	Introducción de capítulo.....	46
IV.2	Silicio producido en territorio nacional.....	47
IV.3	Cuantificación de insumos en la obtención del Si grado metalúrgico y el polisilicio	48
IV.4	Cuantificación de insumos en la obtención del lingote de Si y el rebanado de las obleas	48
IV.5	Cuantificación de insumos en el procesamiento de celdas solares FV	49
IV.6	Identificación de las etapas y los participantes de la cadena de fabricación en la construcción del MFV.....	50
IV.6.1	Cuantificación del material requerido para fabricar MFV integrados por 60, 72 y 96 celdas en serie.....	50
IV.7	Identificación de los participantes en la cadena de fabricación en la integración de un SFV de 1.0 kW de potencia pico.....	51
IV.7.1	Cuantificación del material requerido para instalar un SFV de 1.0 kW de potencia pico..	52
IV.8	Conclusión de capítulo.....	53

V	Identificación de industrias mexicanas productoras de partes y componentes que integran al MFV y al SFV	54
V.1	Introducción de capítulo.....	54
V.2	Requerimientos de partes y componentes en el ensamble del MFV	54
V.3	Empresas productoras de partes y componentes del MFV	55
V.3.1	Aluminio	55
V.3.2	Vidrio	55
V.3.3	Tedlar.....	56
V.3.4	EVA	56
V.3.5	Polisilicio, Obleas y Celdas solares para aplicaciones fotovoltaicas.....	57
V.3.6	Cintas metálicas colectoras delgada y gruesa para aplicaciones FV	57
V.4	Empresas productoras de partes y componentes que integran el SFV	58
V.4.1	Tornillería de acero inoxidable.....	58
V.4.2	Perfiles extruidos de Aluminio y sujetadores.....	59
V.4.3	Gabinetes, cables, zapatas, terminales y conductores eléctricos.....	59
V.4.4	Inversores.....	60
V.4.5	Tubería Metálica Conduit, sujetadores y accesorios	61
V.5	Conclusión	61
VI	Análisis de la cadena de fabricación del MFV en el mercado mexicano.....	62
VI.1	Introducción de capítulo.....	62
VI.2	Demanda de material fotovoltaico proyectada para la próxima década	62
VI.3	Capacidad de producción de empresa mexicanas para cubrir la adición anual de 370 MW proyectada para la próxima década	64
VI.4	Costos involucrados en la ruta crítica del Si y los sectores de la industria a los que les corresponde cada etapa de su cadena de fabricación.....	66
VI.4.1	Extracción de la sílice	66
VI.4.2	Purificación de la sílice	67
VI.4.3	Crecimiento de lingotes de Si y obtención de obleas	68
VI.4.4	Procesamiento de las celdas solares.....	70
VI.4.5	Ensamble del MFV de Si cristalino	72
VI.4.6	Integración del SFV.....	73
VI.5	Conclusión	75
	Conclusión general	75

Referencias	78
Anexo	81

Lista de figuras

FIGURA 1.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN SFV (SÁNCHEZ JUÁREZ, MARTÍNEZ, DE LA LUZ MAGDALENO, ORTEGA CRUZ, & SÁNCHEZ PÉREZ, 2017).	7
FIGURA 2.-REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL EFV, NO MUESTRA DIMENSIONES REALES.	8
FIGURA 3.- SE MUESTRA UN ESQUEMA DE LO QUE OCURRE DENTRO DE UN MATERIAL EN EL CUAL SE LLEVA A CABO EL EFV.	8
FIGURA 4.- COMPORTAMIENTO I VS V DE UNA CELDA SOLAR.	10
FIGURA 5.- INTERPRETACIÓN GEOMÉTRICA DEL FACTOR DE FORMA.	11
FIGURA 6.- CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS MEJORES CELDAS EXPERIMENTALES (NREL, 2020).	12
FIGURA 7.- MAPA DE RUTA DE LAS EFICIENCIAS EN MFV PARA LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS (NREL, 2020).	12
FIGURA 8.- IMÁGENES DE LAS DIFERENTES TSFV EN EL MERCADO. IMAGEN MODIFICADA DEL LIBRO APLICACIONES FOTOVOLTAICAS DE LA ENERGÍA SOLAR (SÁNCHEZ JUÁREZ, MARTÍNEZ, DE LA LUZ MAGDALENO, ORTEGA CRUZ, & SÁNCHEZ PÉREZ, 2017).	13
FIGURA 9.- SE MUESTRA EL PROCESO CZOCHRALSKI PARA CRECER LINGOTES CILÍNDRICOS DE SI-MONO A PARTIR DE POLISILICIO GRADO SOLAR (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	15
FIGURA 10.- SECUENCIA DE REBANADO DE OBLEAS SOLARES DE SI-MONO (NREL, 2018, REVISIÓN 2020). .	16
FIGURA 11.- SE MUESTRA A GRANDES RASGOS EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LAS CELDAS DE SI-POLI A PARTIR DE POLISILICIO GRADO SOLAR (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	17
FIGURA 12.- SECUENCIA DE REBANADO DE OBLEAS DE SI-POLI (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	17
FIGURA 13.- SE MUESTRA EL PROCESAMIENTO DE CELDAS SOLARES DE SI CRISTALINO DE 156 MM X 156 MM (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	18
FIGURA 14.- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN CORTE TRANSVERSAL DE CELDAS SOLARES DE SI CRISTALINO (A LA IZQUIERDA LA CELDA DE SI-POLI Y A LA DERECHA LA DE SI-MONO) QUE MUESTRAN LAS CAPAS SEMICONDUCTORAS QUE COMPONEN A LA CELDA SOLAR, ASÍ COMO LAS REJILLAS Y CAPA METÁLICA PARA LOS CONTACTOS ELÉCTRICOS (SÁNCHEZ JUÁREZ, MARTÍNEZ, DE LA LUZ MAGDALENO, ORTEGA CRUZ, & SÁNCHEZ PÉREZ, 2017).	19
FIGURA 15.- SE MUESTRA UN MFV BIFACIAL Y LA FORMA EN LA QUE APROVECHA LA RADIACIÓN SOLAR REFLEJADA POR EL SUELO (ALBEDO).	20
FIGURA 16.- SE MUESTRA LA COMPOSICIÓN DE UNA CELDA CONVENCIONAL DE SI A LA IZQUIERDA, Y A LA DERECHA LA COMPOSICIÓN DE UNA CELDA QUE INCLUYE TECNOLOGÍA PERC. NÓTESE LA INTERACCIÓN DEL FOTÓN DENTRO DEL MATERIAL (EUROPE, 2018).	21
FIGURA 17.- SE MUESTRAN LAS CAPAS QUE INTEGRAN UNA CELDA HJT (GIFFORD, 2017).	22
FIGURA 18.- SE PRESENTA LA ESTRUCTURA DE LOS MÓDULOS CON TECNOLOGÍA SHINGLED CELLS (SUNPOWER, 2019).	22
FIGURA 19.- SE MUESTRAN, A LA IZQUIERDA, CELDAS DE SI CRISTALINO CONVENCIONAL Y, A LA DERECHA, CELDAS DE SI CON CONTACTOS POSTERIORES (SUNPOWER, 2019).	23
FIGURA 20.- REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN MFV EMPLEADA EN LA ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS ELÉCTRICOS.	24
FIGURA 21.- SE MUESTRA EL CORTE TRANSVERSAL DEL MFV CON LAS PARTES IDENTIFICADAS POR LA NORMA IEC 61730-1 (INTERNATIONAL STANDARD IEC 61730-1, 2016).	24
FIGURA 22.- SE MUESTRA LA INTERCONEXIÓN DE 72 CELDAS INTEGRANDO UN MFV Y LA FORMA EN QUE ESTÁN CONECTADOS LOS DIODOS DE PASO (UN DIODO DE PASO POR CADA 24 CELDAS EN SERIE) PARA BRINDAR UN CAMINO ALTERNATIVO PARA EL FLUJO DE ELECTRONES EN CASO DE UN SOMBREAMIENTO (GOSTEIN , LITTMANN, CARON , & DUNN, 2013).	25

FIGURA 23.- SE MUESTRA EL PROCESO DE ENSAMBLE DEL MFV ESTÁNDAR DE SI CRISTALINO (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).....	26
FIGURA 24.- SE MUESTRAN IMÁGENES DE LAS PLACAS DE DATOS DE DOS MFV REALES DISPONIBLES EN EL MERCADO MEXICANO COMERCIAL ACTUAL.	27
FIGURA 25.- SE MUESTRA UN EJEMPLO DE 3 MFV, CON CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS IDÉNTICAS, CONECTADOS EN SERIE PARA INCREMENTAR EL VOLTAJE DE SALIDA. NÓTESE QUE LA CORRIENTE SIGUE SIENDO LA MISMA QUE LA DE UNO SOLO DE LOS MFV INTERCONECTADOS.	29
FIGURA 26.- SE MUESTRAN DOS MFV CONECTADOS EN PARALELO PARA AUMENTAR EL VALOR DE SU CORRIENTE, NÓTESE QUE, HAY UN DIODO ANTIRRETORNO CONECTADO DESPUÉS DE CADA MÓDULO PARA EVITAR QUE UN MFV LE MANDE CORRIENTE AL OTRO (CORRIENTES DE RETORNO).	30
FIGURA 27.- SE MUESTRA UN ARREGLO DE VARIOS MFV INTERCONECTADOS EN SERIE-PARALELO. NÓTESE QUE EL VALOR DE LA CORRIENTE Y EL VOLTAJE, AUMENTAN DE FORMA SIMULTÁNEA.	31
FIGURA 28.- SE MUESTRA UN DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN SFV (SÁNCHEZ JUÁREZ, MARTÍNEZ, DE LA LUZ MAGDALENO, ORTEGA CRUZ, & SÁNCHEZ PÉREZ, 2017).	32
FIGURA 29.- SE MUESTRAN, A GRANDES RASGOS, LAS PARTES QUE INTEGRAN UN SFV GENÉRICO. NÓTESE QUE, EL GFV Y EL BOS ESTÁN CONSIDERADOS EN EL PRIMER GRUPO (EQUIPO FOTOVOLTAICO Y ACONDICIONADORES DE POTENCIA).....	33
FIGURA 30.- SE MUESTRA LA EVOLUCIÓN ANUAL DE LA CIFV A NIVEL MUNDIAL EN GW POR AÑO (IEA, 2019).....	35
FIGURA 31.- SE APRECIAN LOS DIEZ PAÍSES CON LAS MAYORES ADICIONES DE CIFV A NIVEL MUNDIAL DURANTE 2018. ELABORADO CON DATOS DEL DOCUMENTO SNAPSHOT OF GLOBAL PV MARKETS (IEA, 2019).....	35
FIGURA 32.- SE MUESTRA LA PRODUCCIÓN TOTAL POR TIPO DE TECNOLOGÍA, DE MFV DURANTE EL AÑO 2018 Y EL PREDOMINIO DEL SI CRISTALINO SOBRE LAS TECNOLOGÍAS DE PELÍCULA DELGADA (PHILIPS & WARMUTH, MAY, 2020).	36
FIGURA 33.- SE MUESTRA LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE MFV CON TECNOLOGÍA A BASE DE SI CRISTALINO HASTA EL AÑO 2017 Y UNA COMPARACIÓN CON LAS TECNOLOGÍAS DE PELÍCULA DELGADA (PHILIPS & WARMUTH, MAY, 2020).	36
FIGURA 34.- SE MUESTRAN LAS ETAPAS DE LA CADENA DE FABRICACIÓN DE LOS SFV EN GENERAL, ASÍ COMO LOS PRINCIPALES INSUMOS Y PRODUCTOS EN CADA UNA DE ELLAS.....	44
FIGURA 35.- SE MUESTRAN LAS ETAPAS CONSIDERADAS EN LA CADENA DE FABRICACIÓN PARA LA CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL REQUERIDO EN CADA UNA DE ELLAS. IMAGEN MODIFICADA DEL DOCUMENTO: CRYSTALLINE SILICON PHOTOVOLTAIC MODULE MANUFACTURING COSTS AND SUSTAINABLE PRICING (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	47
FIGURA 36.- SE MUESTRAN LAS REGIONES DEL MUNDO DONDE SE CONCENTRAN LOS PRODUCTORES DE POLISILICIO, OBLEAS, CELDAS Y MFV (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	57

Lista de tablas

TABLA 1.- ESTADO ACTUAL DE LAS EFICIENCIAS DE MFV PARA LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DEL MERCADO FV ACTUAL (A. GREEN, D. DUNLOP, HOHL EBINGER, & YOSHITA , 2019). 	13
TABLA 2.- SE LISTAN LAS EMPRESAS MEXICANAS PRODUCTORAS DE MFV MÁS POPULARES.	28
TABLA 3.- SE MUESTRAN LOS VALORES TÍPICOS (RANGOS) DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y DIMENSIONES PARA CADA TIPO DE MFV, EN BASE AL NÚMERO DE CELDAS QUE LO INTEGRAN, OFERTADOS EN EL MERCADO FV MEXICANO ACTUAL Y MANUFACTURADOS POR FABRICANTES NACIONALES.	28
TABLA 4.- SE MUESTRAN LAS POTENCIAS ACORDADAS PARA LA PUESTA EN MARCHA DE PROYECTOS DE ESFV DURANTE LAS TRES SUBASTAS ELÉCTRICAS QUE TUVIERON LUGAR EN MÉXICO ENTRE LOS AÑOS 2016 Y 2018 (SENER, 2018).....	38
TABLA 5.- SE MUESTRA LA EVOLUCIÓN ESPERADA DE LA CIFV EN MÉXICO PARA LOS PRÓXIMOS AÑOS (SENER, 2018).	41
TABLA 6.- SE MUESTRA UN PANORAMA GENERAL DE LA CADENA DE FABRICACIÓN DE LOS SFV DE INTERCONEXIÓN EN MÉXICO. IMAGEN MODIFICADA DEL DOCUMENTO: CADENA DE VALOR DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN MÉXICO (INEEL, 2019).....	45
TABLA 7.- SE MUESTRA LA PRODUCCIÓN, EN TONELADAS, DE SÍLICE EXTRAÍDO EN MÉXICO Y LOS PRINCIPALES ESTADOS PRODUCTORES (ANUARIO ESTADISTICO DE LA MINERÍA MEXICANA, EDICIÓN 2019).	47
TABLA 8.- INSUMOS Y PRODUCTOS EN LA ELABORACIÓN DE SI GRADO METALÚRGICO	48
TABLA 9.- INSUMOS Y PRODUCTOS EN LA ELABORACIÓN DEL POLISILICIO GRADO SOLAR.	48
TABLA 10.- INSUMOS Y PRODUCTOS EN LA ELABORACIÓN DEL LINGOTE DE SI-MONO.	49
TABLA 11.-INSUMOS Y PRODUCTOS EN LA ELABORACIÓN DE OBLEAS PARA APLICACIONES FV.	49
TABLA 12.-INSUMOS Y PRODUCTOS EN EL PROCESAMIENTO DE CELDAS SOLARES FV.	49
TABLA 13.- SE MUESTRAN LAS DIMENSIONES Y PESOS TÍPICOS DE MFV INTEGRADOS POR 60, 72 Y 96 CELDAS, OFERTADOS POR FABRICANTES MEXICANOS.	50
TABLA 14.- INSUMOS REQUERIDOS EN EL ENSAMBLE DE LOS MFV DE 60, 72 Y 96 CELDAS CON LAS CARACTERÍSTICAS DE FABRICANTES MEXICANOS.	51
TABLA 15.- SE ENLISTAN LOS COMPONENTES ELÉCTRICO-ELECTRÓNICOS REQUERIDOS PARA UN SFV HIPOTÉTICO DE 1.0 KWP, INTEGRADO POR 4 MFV Y UN SOLO INVERSOR.	52
TABLA 16.- SE MUESTRAN LOS COMPONENTES REQUERIDOS PARA LA PARTE ESTRUCTURAL DE UN SFV HIPOTÉTICO DE 1.0 KWP, INTEGRADO POR 4 MFV Y UN SOLO INVERSOR.	52
TABLA 17.- SE MUESTRAN LOS COMPONENTES REQUERIDOS PARA INTEGRAR LA PARTE ELÉCTRICA DE UN SFV HIPOTÉTICO DE 1.0 KWP, INTEGRADO POR 4 MFV Y UN SOLO INVERSOR.	53
TABLA 18.- SE MUESTRAN LAS PRINCIPALES EMPRESAS MEXICANAS DEDICADAS A ENSAMBLAR MFV DENTRO DE TERRITORIO NACIONAL.	54
TABLA 19.- SE MUESTRAN LAS EMPRESAS MÁS SIGNIFICATIVAS DEDICADAS A LA PRODUCCIÓN DE ALUMINIO EN MÉXICO.	55
TABLA 20.- SE ENLISTAN LAS EMPRESAS MEXICANAS QUE MANUFACTURAN TORNILLERÍA DE ACERO INOXIDABLE APTA PARA APLICACIONES FV.	58
TABLA 21.- SE ENLISTAN LAS PRINCIPALES EMPRESAS PRODUCTORAS DE ALUMINIO EXTRUIDO EN MÉXICO.	59
TABLA 22- SE MUESTRAN LOS PRINCIPALES FABRICANTES DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS Y SUS ACCESORIOS EN MÉXICO.	59
TABLA 23.- SE MUESTRAN LAS PRINCIPALES MACAS DE INVERSORES USADOS POR LAS EMPRESAS INSTALADORAS MEXICANAS (ASOLMEX, AMIF, ANES, GIZ, & GMBH, 2020).	60

TABLA 24.- SE MUESTRAN LAS EMPRESAS REGISTRADAS EN MÉXICO QUE SON FABRICANTES DE TUBERÍA TIPO CONDUIT Y SUS ACCESORIOS CORRESPONDIENTES.	61
TABLA 25.- SE MUESTRA UNA CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARA CUBRIR LA DEMANDA DE 370 MW PROYECTADA ANUALES DE MFV DE 60 CELDAS CON UNA POTENCIA DE 250 W CADA UNO, PARA LA DÉCADA 2022 AL 2032.....	63
TABLA 26.-SE MUESTRA UNA CUANTIFICACIÓN DE MATERIAL PARA CUBRIR LA DEMANDA DE INSUMOS EN EL ENSAMBLE DE MFV PARA SATISFACER EL <u>REQUERIMIENTO PROYECTADO DE 370 MW ANUALES</u> DURANTE LA DÉCADA COMPRENDIDA ENTRE EL 2022 Y EL 2032, MEDIANTE EL USO DE MFV DE 60 CELDAS CON UNA POTENCIA DE 250 WP CADA UNO.	64
TABLA 27.- SE MUESTRA LA PRODUCCIÓN DE SÍLICE EN TERRITORIO NACIONAL DURANTE LOS ÚLTIMOS AÑOS Y EL VALOR MONETARIO QUE REPRESENTA (SUBSECRETARÍA DE MINERÍA, EDICIÓN 2019).	66
TABLA 28.- SE MUESTRAN LOS PRECIOS PARA LOS SFV DE INTERCONEXIÓN, DENTRO DE TERRITORIO NACIONAL, EN FUNCIÓN DE SU POTENCIA INSTALADA (ASOLMEX, AMIF, ANES, GIZ, & GMBH, 2020).	74
TABLA 29.- SE MUESTRAN LOS PRECIOS PARA LOS SFV DE INTERCONEXIÓN, DENTRO DE TERRITORIO NACIONAL, POR COMPONENTE Y EN FUNCIÓN DE SU POTENCIA INSTALADA (ASOLMEX, AMIF, ANES, GIZ, & GMBH, 2020).	74

Lista de Gráficas

GRÁFICA 1.- SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA DEL SEN Y LA PARTICIPACIÓN DE CADA TIPO DE TECNOLOGÍA EN LA GENERACIÓN ELÉCTRICA TOTAL (317.278 GWH) PARA EL CIERRE DEL AÑO 2018 (SENER, 2019).	1
GRÁFICA 2.- SE MUESTRA LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA CIFV EN EL PAÍS ENTRE LOS AÑOS 2004 Y 2018 (SENER, 2018).	39
GRÁFICA 3.- SE MUESTRA LA PARTICIPACIÓN DE LAS ENERGÍAS LIMPIAS EN LA CAPACIDAD INSTALADA DEL SEN (SENER, 2018).	40
GRÁFICA 4.- SE MUESTRA LA PARTICIPACIÓN DE LAS DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA QUE INTEGRAN LA MATRIZ ENERGÉTICA DEL SEN, EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD DURANTE EL 2018 (SENER, 2018).	40
GRÁFICA 5.- SE PRESENTA LA EVOLUCIÓN ESPERADA DE LA CIFV SEGÚN PROYECCIONES GUBERNAMENTALES (SENER, 2018).	42
GRÁFICA 6.- SE MUESTRA LA TENDENCIA DE CRECIMIENTO DE LA CIFV REFERENTE A LA GENERACIÓN LIMPIA DISTRIBUIDA EN EL PAÍS (CRE, 2019).	43
GRÁFICA 7.- SE MUESTRA EL INCREMENTO DE LOS CONTRATOS DE INTERCONEXIÓN OTORGADOS BAJO EL ESQUEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA (CRE, 2019).	43
GRÁFICA 8.- SE MUESTRAN LOS COSTOS INVOLUCRADOS EN LA PRODUCCIÓN DEL POLISILICIO, YA SEA MEDIANTE EL USO DE REACTOR SIEMENS O REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO (FBR) (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	67
GRÁFICA 9.- SE MUESTRAN LOS COSTOS EN LA MANUFACTURA DEL LINGOTE DE SI-MONO Y EL REBANADO DE LAS CELDAS DE 156 MM X 156 MM (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	68
GRÁFICA 10.- SE MUESTRAN LOS COSTOS EN LA MANUFACTURA DEL LINGOTE DE SI-POLI Y EL REBANADO DE LAS CELDAS DE 156 MM X 156 MM (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	69
GRÁFICA 11.- SE MUESTRAN LOS COSTOS INVOLUCRADOS EN LAS ETAPAS DEL PROCESAMIENTO DE CELDAS PERC DE SI-MONO (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	70
GRÁFICA 12.- SE MUESTRAN LOS PRECIOS DEL PROCESAMIENTO DE CELDAS FV PARA DIFERENTES PAÍSES, CONSIDERANDO EL COSTO NACIONAL DE CADA REGIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE OBLEAS DE SI CRISTALINO (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	71
GRÁFICA 13.- SE MUESTRAN LOS COSTOS DE MATERIAL EN EL ENSAMBLE DEL MFV DE TECNOLOGÍA SI-MONO PERC (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	72
GRÁFICA 14.- SE MUESTRAN LOS COSTOS PARA EL ENSAMBLE DEL MFV PARA DIFERENTES PAÍSES, CONSIDERANDO EQUIPOS CON UNA EFICIENCIA PROMEDIO DE 19 %, CONSTITUIDOS POR 60 CELDAS DE 19.5 % DE EFICIENCIA (NREL, 2018, REVISIÓN 2020).	73

Lista de Acrónimos

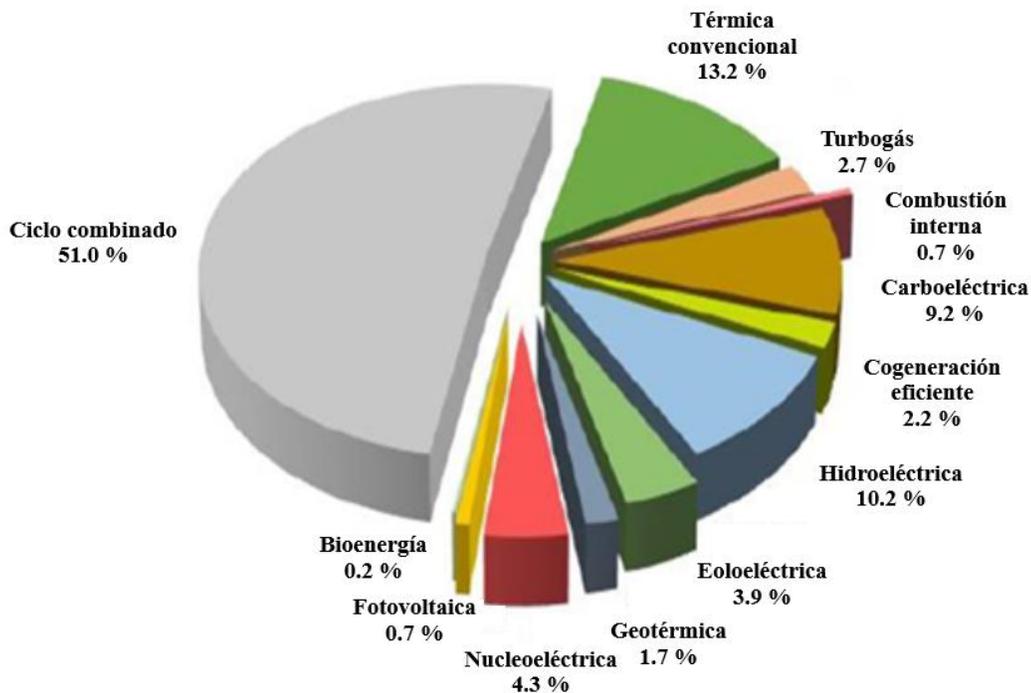
Acrónimo	Definición
AFV	Arreglos Fotovoltaicos
AMIF	Asociación Mexicana de la Industria Fotovoltaica A.C
ANES	Asociación Nacional de Energía Solar A.C.
ASOLMEX	Asociación Mexicana de Energía Solar A.C
BOS	Balance del Sistema (Balance Of System)
BSF	Campo de superficie posterior (Back Surface Field)
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CFV	Cadena Fotovoltaica
CIFV	Capacidad Instalada Fotovoltaica
CRE	Comisión Reguladora de Energía
DOF	Diario Oficial de la Federación
EFV	Efecto Fotovoltaico
ESFV	Energía Solar Fotovoltaica
EVA	Etil-Vinil-Acetato
FEM	Fuerza Electromotriz
FER	Fuentes de Energía Renovable
FIRCO	Fideicomiso de Registro Compartido
FRB	Reactor de Lecho Fluidizado
FV	Fotovoltaico
GEF	Instalación Ambiental Global (Global Environment Facility)
GFV	Generador Fotovoltaico
GIZ	Agencia Internacional Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
HJT	Heterounión con Película Delgada Intrínseca (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer)
IEC	Comisión internacional de Electrotecnia (International Electrotechnical Commission)
IER	Instituto de Energías Renovables
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISES	Sociedad Internacional de Energía Solar (International Solar Energy Society)
ISFV	Industria Solar Fotovoltaica
LAERFTE	Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética
LASE	Ley para el Aprovechamiento Sustentable de Energía

Acrónimo	Definición
LCOE	Costo Nivelado de Energía (Levelized Cost of Energy)
MC4	Multi Contacto de 4 mm
MEM	Mercado Eléctrico Mayorista
MFV	Módulo Fotovoltaico
PDRS	Proyecto de Desarrollo Rural Sustentable
PERA	Proyecto de Energía Renovable para la Agricultura
PERC	Celda Solar con Emisor y lado Posterior Pasivado (Passivated Emitter and Rear Cell)
PLP	Productos de Línea Preformados (Preformed Line Products)
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional
PRONASOL	Programa Nacional de Solidaridad
PSFV	Plantas Solares Fotovoltaicas
PVF	Fluoruro de Polivinilo (mejor conocido como Tedlar)
RGD	Red General de Distribución
RGT	Red General de Transmisión
SAGARPA	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENER	Secretaría de Energía
SFV	Sistemas Fotovoltaicos
Si	Silicio
Si-mono	Silicio Monocristalino
Si-poly	Silicio Policristalino
TBFER	Tecnologías Basadas en Fuentes de Energía Renovable
TCS	Triclorosilano
TSFV	Tecnología Solar Fotovoltaica
UNDP	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (United Nations Development Programme)
USA	Estados Unidos de América (United States of America)
UV	Ultravioleta

Introducción

Es conocido que todos los sectores que integran a la sociedad, ya sea el económico, de transporte, agrario, de salud, etc., dependen en alguna medida de la energía eléctrica para el buen desempeño de sus múltiples actividades y confort humano. Año con año, la población crece y la demanda de energía requerida para satisfacer sus actividades cotidianas aumenta, en el caso de la electricidad, el abastecimiento lo debe proporcionar el suministrador de potencia eléctrica que, en nuestro país, le corresponde a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Red General de Distribución (RGD) y la Red General de Transmisión (RGT) que conforman junto con subestaciones el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

En México, al igual que en muchos otros países, la matriz energética del Sector Eléctrico está constituida principalmente por centrales de ciclo combinado, termoeléctricas, hidroeléctricas, nucleares, geotérmicas, y de unos años para acá, se tiene una pequeña aportación de tecnologías denominadas “Limpias” por no emitir contaminantes durante su operación, como la energía eólica y la FV. En el caso de las centrales de ciclo combinado y termoeléctricas, las cuales tienen la mayor participación, estas operan consumiendo combustible fósil, como lo es el gas, el combustóleo, el carbón y residuos vegetales, los cuales, despiden grandes cantidades de gases contaminantes que contribuyen al calentamiento global y perjudican la salud de la población. La Gráfica 1 muestra la participación de las diferentes tecnologías en el aporte de energía de la matriz energética de nuestro país, donde, el 76.8 % corresponde a la generación con tecnologías que aprovechan los recursos fósiles y el 23.2 % a tecnologías de Generación Limpia (SENER, 2019).



Gráfica 1.- Se muestra la distribución de la matriz energética del SEN y la participación de cada tipo de tecnología en la generación eléctrica total (317.278 GWh) para el cierre del año 2018 (SENER, 2019).

Durante los últimos años, el mundo se ha concientizado de la problemática que representa, tanto ambiental como económicamente, el uso de combustibles fósiles pues, aunado al calentamiento global y la contaminación del aire, las reservas de petróleo son finitas y en algún momento comenzarán a escasear, por lo que, de una u otra forma, se requerirá de una transición hacia Tecnologías basadas en Fuentes de Energía Renovable (TBER).

Por esta razón, numerosos países han entrado en una etapa de cambio, diversificando su matriz energética con la meta de reemplazar o disminuir el tiempo de operación de las tecnologías convencionales que consumen combustible fósil, por TBER que son más amigables con el ambiente. De entre estas tecnologías, la TSFV es una de las más prometedoras para tal fin ya que, en su proceso de generación eléctrica usa la energía solar y no se tienen: emisiones contaminantes, ruido, ni residuos.

Las Plantas Solares Fotovoltaicas (PSFV) no requiere insumos operacionales como combustibles, aceites o agua, los MFV pueden ser reciclables después de su vida útil (más de 20 años) y están diseñados para operar de forma automática sin la intervención de un operador; por lo que se genera un impacto ambiental mínimo y, generalmente, cubren su propia huella de carbono en un periodo de tiempo de entre 2 y 6 años dependiendo de la TSFV empleada y las condiciones climatológicas a las que sean expuestos durante su vida útil (Gou, Lin, & Li, 2019).

Se estima que durante 2019 se instalaron 114.9 GW de TSFV en el mundo y, de toda la energía generada durante dicho año, el 3 % fue a base de TSFV; cerrando así el tercer año consecutivo en que se ha logrado instalar más de 100 GW de potencia FV a nivel mundial (103.4 GW en 2017 y 102.2 GW en 2018). Orgullosamente, durante 2018, México calificó como uno de los 10 países con mayor aumento en su Capacidad Instalada Fotovoltaica (CIFV) a nivel mundial, logrando una adición de 2.7 GW y posicionándose en sexto lugar, siendo superado únicamente por China, India, Estados Unidos de América (USA, por sus siglas en inglés), Japón, Australia y Alemania. Posteriormente, en 2019, a pesar de que México ya no figuró entre los 10 países con la mayor adición de potencia a su CIFV, si se quedó en tercer lugar de toda América con una adición de casi 2 GW (REN 21, 2020), siendo rebasado únicamente por USA (13.3 GW), y por Brasil (2 GW) (IEA, 2019).

De acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) (SENER, 2019), México se compromete a implementar sistemas de generación eléctrica con base en fuentes de energía limpia para lograr una participación en la matriz energética del: 30 % para el 2021, 35 % al 2024; 37.7 % al 2030 y 50 % al 2050. Muchos estudios sobre la valoración del potencial de energías limpias y renovables en México muestran que, efectivamente, se cuenta con los recursos suficientes para satisfacer estas cifras y, en general, todas las necesidades energéticas de manera eficiente y segura. Dentro de la República Mexicana, existen zonas con gran potencial para la explotación de diversas formas de energía renovable: eólica en Oaxaca, Tamaulipas y Coahuila; hidráulica en Chiapas, Michoacán y Nayarit; geotérmica en Michoacán y Baja California; maremotriz en las costas; y de forma más abundante, y distribuida en toda la República Mexicana, la Energía Solar Fotovoltaica (ESFV).

El recurso solar que tiene México es abundante en comparación con otras regiones: su posición geográfica lo convierte en un país privilegiado al estar ubicado dentro de lo que se denomina como “el cinturón solar”; el cuál, se encuentra entre las latitudes 40° Norte y 35° Sur. Éste, es una franja

imaginaria paralela al ecuador que rodea toda la tierra en donde se capta una Irradiación¹ promedio diario anual de 5 kWh/m² por día o más y engloba a 60 países. De entre éstos, México se encuentra en el 5° lugar a nivel mundial con un recurso solar de 5.72 kWh/m² (NASA, 2020), uno de los valores de radiación solar diaria promedio anual más altos, lo que lo posiciona en el primer puesto de toda América latina. Lamentablemente, a pesar de contar con un recurso solar tan abundante y con las condiciones climatológicas favorables para el aprovechamiento y explotación de la ESFV, son las centrales de ciclo combinado las que predominan con el 49 % de la capacidad instalada total del sector eléctrico mexicano (2018), dejando muy atrás a la energía solar fotovoltaica, la cual representó menos del 3 % en 2018 y alcanzó un 3.9 % para el cierre del 2019 (SENER, 2019).

La TSFV basada en Si cristalino es una de las más populares actualmente, debido a que éste es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre; el material semiconductor fabricado a base de este mineral, que es usado para convertir la luz solar en electricidad, tiene la mejor relación costo beneficio de entre todas las tecnologías disponibles en el mercado actual y es una de las que presenta más avances tecnológicos de forma relativamente constante.

Las celdas solares de Si cristalino fueron empleadas por primera vez en la década de los 50, limitando su uso para aplicaciones espaciales debido a su alto costo inicial, sin embargo, con el paso de los años, esta tecnología ha sido cada vez más accesible para el público en general y durante los últimos 10 años, los SFV con tecnología de Si cristalino han ido ganando terreno en México debido al descenso paulatino y constante de sus costos de fabricación e instalación, abriendo nichos de mercado muy grandes para su implementación, en donde la razón costo beneficio de los proyectos se ha vuelto muy atractiva para competir con los sistemas convencionales a base de combustibles fósiles. Esta oportunidad de inversión que se presenta ha traído como consecuencia un aumento en la CIFV en el SEN, la cual alcanzó una potencia de aproximadamente 5.6 MW para el cierre del 2019 con la expectativa de rebasar una capacidad de 11.6 GW acumulada para el año 2032, integrada tanto por plantas centralizadas de generación como SFV de generación distribuida (SENER, 2018).

El auge mostrado en México ha sido una consecuencia de las regulaciones que, desde el año 2008, ha emitido el Gobierno Federal a través de la Secretaría de Energía (SENER), la Comisión Reguladora de Energía (CRE), el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) y la CFE; las cuales, han facilitado que los SFV sean interconectados a la red para reforzar el sector eléctrico mexicano mediante la implementación de grandes plantas generadoras centralizadas o sistemas de generación distribuida con potencias inferiores a 500 kW (sistemas domésticos, residenciales, comerciales e industriales). En el caso de la generación distribuida se espera un gran crecimiento en el número de SFV interconectados entre el 2018 y el 2023, según proyecciones emitidas por la CRE. Al cierre de 2018 ya se tenía una capacidad instalada de 693 MW, y para el cierre del siguiente año (2019) se contaba con 818 MW (REN 21, 2020), esperándose que, para el 2023 se alcance los 2.89 GW (CRE, 2019).

Optar por la generación distribuida mediante SFV representa una oportunidad de progreso para el SEN pues, al estar la generación de energía más cerca del usuario final, se presenta lo siguiente: se reduce el tiempo de operación de las plantas convencionales, se tienen ahorros económicos al disminuir las pérdidas por la transmisión y distribución de energía, se reduce el gasto de

¹ Densidad de energía de la radiación solar, medida en unidades de Wh/m².

combustibles fósiles para producir electricidad, se mitigan las emisiones contaminantes y, mediante el fomento de las TSFV, ya sea por políticas gubernamentales o por conciencia ambiental, se creará un aumento en su demanda, se generarán nuevas empresas fabricantes de tecnología y empresas comercializadoras, generación de empleos, la oferta y demanda tenderá a que los costos se abatan, se incrementará la sana competencia entre empresas, surgirán más avances tecnológicos y seguirá incrementando su demanda, creando así, un ciclo de desarrollo para esta tecnología.

Sin embargo, generalmente, todos los SFV que se han instalado y comercializado en México, están integrados por componentes que provienen del extranjero. Los MFV han sido importados de países como USA, Japón, Alemania, España y China, entre otros; sin embargo el mercado potencial fotovoltaico mexicano es tan grande que ha motivado la creación de fábricas de MFV en nuestro país, teniendo registradas a la fecha 11 empresas de origen mexicano que ensamblan MFV en territorio nacional; desafortunadamente, importan el 100 % de las partes y componentes que integran a dichos dispositivos, repercutiendo en una, cada vez más alta, dependencia hacia el producto extranjero.

México tiene grandes expectativas para el uso de la TSFV en el sector eléctrico: según las últimas proyecciones por parte de la SENER, se estima que para el 2032, el porcentaje de la capacidad instalada que representará la TSFV en dicho sector, contando centrales generadoras y sistemas de generación distribuida, se incrementa de 2.5 % en 2018 a 8.9 % en 2032. Lo anterior solo se puede cumplir si se adiciona, año con año, por lo menos una potencia de 370 MW a partir del próximo año (2021) (SENER, 2018).

Lo anterior amplía más el nicho de mercado, y si, como política gubernamental se pretende garantizar la no dependencia de producto extranjero para estos proyectos, se deberán de implementar políticas de fomento industrial para impulsar la participación de todos los sectores técnicos que estén involucrados en el proceso de fabricación de los equipos, partes y componentes que integran a los SFV, y para esto es necesario establecer la Cadena de Fabricación asociada a esta tecnología.

Si el Gobierno Federal quiere cumplir las metas del PRODESEN y darle un porcentaje de participación nacional a la TSFV acorde con las proyecciones estimadas de la penetración de dicha tecnología en el mercado eléctrico, debe fomentar el desarrollo tecnológico de la ISFV mexicana, e identificar que industrias mexicanas se deben fortalecer en términos tecnológicos para satisfacer la demanda de los insumos considerados en la cadena de fabricación de dicha tecnología.

Por lo anterior es importante elaborar estudios que analicen los requerimientos de componentes que, en un futuro próximo, serán necesarios para abastecer la demanda de la ISFV mexicana y, aunque en México hay estudios donde se han identificado las partes y componentes que integran la cadena de fabricación de la generación distribuida fotovoltaica en México, estos no son recientes ni tampoco analizan la situación a futuro.

Este trabajo surge de la necesidad de analizar el mercado potencial a corto, mediano y largo plazo, determinando las áreas de oportunidad y las debilidades de la cadena de fabricación de los SFV interconectados al SEN, y para esto, se ha desarrollado con los objetivos que se presentan a continuación.

Objetivo general

Identificar y analizar la cadena de fabricación de las componentes esenciales que integran un SFV de interconexión.

Objetivos Específicos

- a. Definir los procesos de manufactura de celdas FV y MFV de Si Cristalino.
- b. Identificar las partes más significativas que integran un MFV de Si cristalino con base en la oferta nacional actual por parte de fabricantes nacionales.
- c. Determinar el requerimiento promedio anual de la ISFV nacional durante la próxima década.
- d. Cuantificar el material que se requiere para integrar un MFV de Si cristalino de 60, 72 y 96 celdas y un SFV interconectado a la red con una potencia pico de 1.0 kW.
- e. Identificar las empresas mexicanas que estén fabricando productos que se puedan usar en la ISFV nacional para integrar SFV de interconexión.
- f. Evaluar el potencial técnico de la ISFV mexicana para satisfacer el mercado FV nacional proyectado para los próximos 10 años, sin depender, en la medida de lo posible, de producto extranjero.

Los objetivos planteados se han obtenido de acuerdo con la estructura del presente trabajo, la cual, se presenta a continuación:

Estructura de la tesis

En el primer capítulo se plantea el estado del arte de la TSFV en la actualidad a nivel mundial, el funcionamiento interno de las celdas de Si cristalino y los diferentes tipos de celda a base de este material que se ofertan en el mercado, así como las características que distinguen a cada una de estas.

En el segundo capítulo se presenta la situación del mercado FV mundial y mexicano, el tipo de tecnología que se oferta de manera local fabricada por productores mexicanos y el uso que se le da a la TSFV en el SEN, tanto en el presente como para las proyecciones que se tienen a futuro.

Posteriormente, en el capítulo III, se definen las partes que componen la cadena de fabricación de los MFV para el caso de México y se determinan los insumos y productos involucrados en cada una de estas, desde la extracción de la sílice, hasta la puesta en marcha de los SFV.

El cuarto capítulo se identifican las empresas productoras de origen mexicano que ofertan partes y componentes requeridos para MFV y SFV, y se determina que componentes son manufacturados exclusivamente por fabricantes en el extranjero.

Por último, en el capítulo 5 se identifican y cuantifican las partes y componentes que requiere una instalación FV de 1.0 kW y se escala para determinar la cantidad de material que se requiere para cubrir la demanda de material proyectada por la SENER para la próxima década. Posteriormente se coteja esta información con la oferta disponible en México procedente de fabricantes locales para determinar qué componentes se fabrican de forma suficiente para cubrir dicho requerimiento. Para cerrar el capítulo, se incluye una recopilación de los costos asociados a la obtención de los productos involucrados en cada etapa del ciclo de vida del Si, desde la extracción de la sílice, la elaboración de la celda, el ensamble del MFV y la integración del SFV; tomando como referencia los procesos que se llevan a cabo por el país que encabeza el mercado solar FV actual (China); y una aproximación de la inversión necesaria para poner en marcha plantas para: purificación de Si, crecimiento de lingotes y rebanado de obleas, procesamiento de celdas solares y ensamble de MFV.

I Tecnologías fotovoltaicas y celdas basadas en Si cristalino

I.1 Introducción del capítulo

La energía solar es abundante y al alcance de todos y está contribuyendo a satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad con el uso de tecnologías que aprovechen la luz solar como, la Solar Térmica y la Solar FV, entre otras. En el mercado actual, la Tecnología Solar Térmica se ha aplicado para calefacción de fluidos a baja, mediana y alta temperatura entre las que destacan el calentamiento de agua y recirculación de aire; mientras que la TSFV, que se basa en el Efecto Fotovoltaico (EFV), se ha aplicado para la generación de electricidad.

La unidad mínima de conversión del EFV se le conoce con el nombre de celda solar, la cual, es un dispositivo optoelectrónico que se construye generalmente con semiconductores y que, al ser expuesto a la luz solar, absorbe la energía de ésta, convirtiéndola en electricidad del de corriente directa. Las características eléctricas de las celdas solares dependen de las propiedades fisicoquímicas de los semiconductores que la forman, y como consecuencia, existe una amplia gama de semiconductores que pueden usarse para construir TSFV.

La potencia eléctrica en Corriente Directa (CD) que genera una celda solar es baja (valores típicos menores de 5 W) y para que pueda ser utilizada en las actividades de nuestra vida diaria, se deben hacer conjuntos de celdas conectadas en serie, llamados MFV, para aumentar su potencia eléctrica. Dado que nuestros enseres eléctricos que normalmente usamos en nuestra vida cotidiana consumen Corriente Alterna (CA), para que puedan utilizarse los MFV, es necesario acondicionar la energía eléctrica generada de CD a CA, y para esto es necesario construir un SFV, el cual, de forma general se integra por tres subsistemas: el generador fotovoltaico constituido por MFV interconectados, las cargas eléctricas que se requieren energizar, y un tercer conjunto de elementos llamado "Balance del sistema" (BOS, por sus siglas en inglés), el cual engloba todos los elementos necesarios para que la energía generada por los MFV se aplique de forma correcta a las cargas eléctricas, como: acondicionadores de potencia, unidades de almacenamiento de energía, unidades

de control y monitoreo, soportería y conductores eléctricos, etc. Una representación gráfica de un SFV se muestra en la Figura 1.



Figura 1.- Representación gráfica de un SFV (Sánchez Juárez, Martínez, de la Luz Magdaleno, Ortega Cruz, & Sánchez Pérez, 2017).

Los SFV representan la mejor alternativa para fortalecer el SEN, ya que, al no requerir combustibles fósiles en el proceso de generación, se reduce su consumo, se mitiga la emisión de gases de efecto invernadero, y dado que, la generación se puede dar en los sitios de consumo, se reducen los gastos de operación en el proceso de distribución de electricidad.

Aunque hay diferentes TSFV comerciales disponibles, el mercado FV mundial siempre ha estado dominado por las celdas solares de Si cristalino, tanto Monocristalinas (Si-mono) como Policristalinas (Si-poli), participando con más del 90 % del total; y dado que este posicionamiento también se ha observado en México, con un incremento casi exponencial en su demanda, logrando una adición en la CIFV de 2.7 GW en 2018 y de 2 GW durante 2019 (IEA, 2019). Dicho producto fue importado de los diferentes países fabricantes, el interés de este trabajo es analizar la cadena de fabricación asociada a dicha tecnología con el fin de determinar si, en un futuro próximo, México podría tener fábricas que proporcionaran los insumos correspondientes para abastecer el mercado potencial de los SFV en nuestro país. Los pilares de la cadena de fabricación en el país podrían ser fábricas de refinamiento de Si, fábricas de lingotes y obleas de Si, fábricas de celdas solares y fábricas de MFV.

El objetivo de este capítulo es identificar los procesos involucrados en la fabricación de las celdas solares de Si con base en el entendimiento de su funcionamiento y la cuantificación de los materiales que se requieren para obtener el producto final conocido como MFV.

I.2 Efecto fotovoltaico y celdas solares

Cuando en un dispositivo optoelectrónico se produce en sus extremos una diferencia de potencial derivado de la absorción de la luz solar en éste, se dice que se está llevando a cabo el EFV. Una representación geométrica se presenta en la Figura 2, mostrando la existencia de dicha diferencia de potencial derivado a que, con la absorción de la luz, se fotogenera un potencial positivo en uno de los extremos del dispositivo optoelectrónico, y en el otro, un potencial negativo, como el resultado de una acumulación de cargas positivas (para el potencial positivo) y una acumulación de cargas negativas (para el potencial negativo) en dichos extremos.

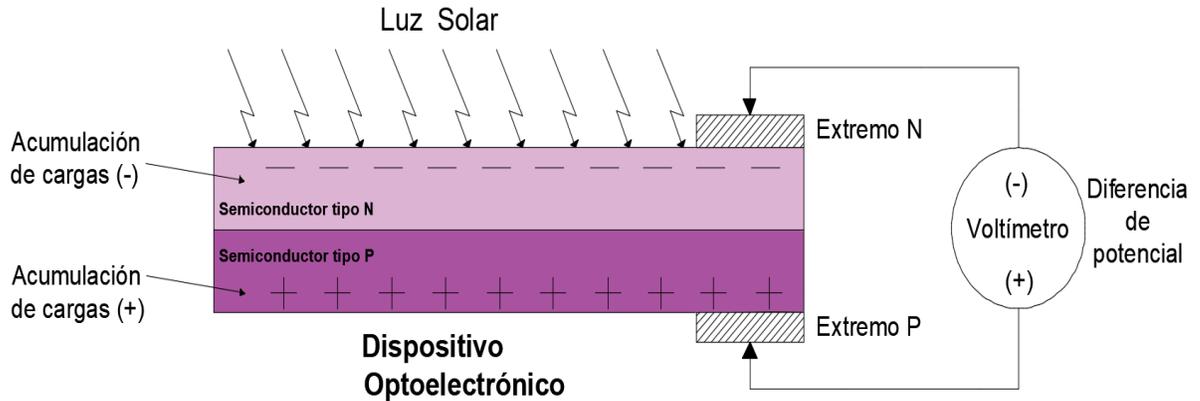


Figura 2.-Representación esquemática del EFV, no muestra dimensiones reales.

Las acumulaciones de cargas solo se pueden mantener si es que existe dentro del dispositivo electrónico un campo eléctrico autoconstruido, el cual se produce cuando un semiconductor con características eléctricas positivas (tipo P), se une íntimamente con un semiconductor con características eléctricas negativas (tipo N), construyéndose lo que se conoce con el nombre de unión P-N, base fundamental de los dispositivos electrónicos llamados diodos rectificadores de corriente. El campo eléctrico se crea siempre en la zona en donde se unen los materiales semiconductores, llevando la dirección del semiconductor N al semiconductor P.

Si la unión P-N recibe la radiación solar y es absorbida, como resultado de dicho proceso se tiene que, por cada fotón de luz absorbido, se crea un par de portadores de carga, electrón-hueco, que se pueden mover libre y aleatoriamente dentro de los materiales semiconductores. Si estos portadores de carga se acercan a la zona en donde radica el campo eléctrico interno, E , los electrones son enviados al semiconductor N acumulándose en su superficie creando un potencial negativo, mientras que los huecos (ausencia de electrón) se acumulan en la superficie del semiconductor P creando el potencial positivo (ver Figura 3).

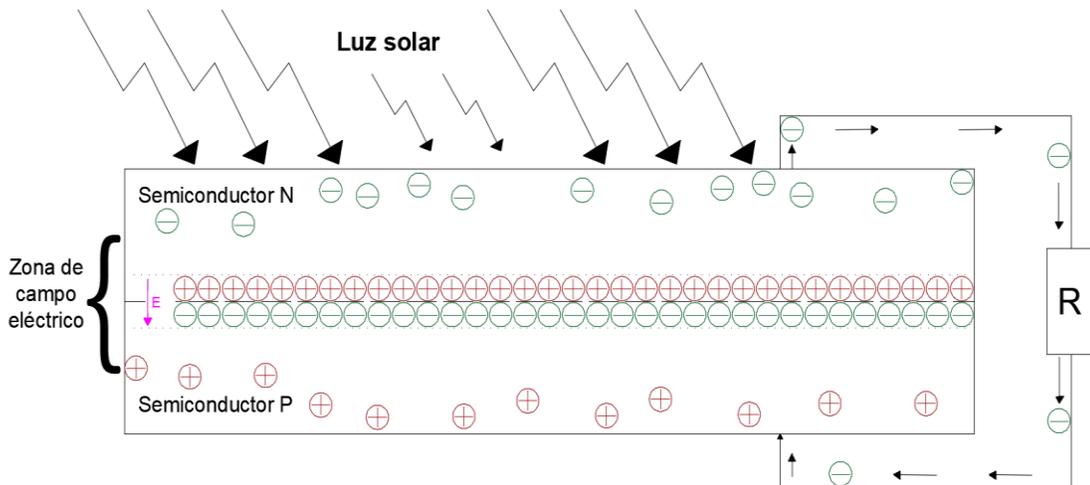


Figura 3.- Se muestra un esquema de lo que ocurre dentro de un material en el cual se lleva a cabo el EFV.

La diferencia de potencial mostrado en la Figura 3 puede ser medida con un voltímetro esperándose valores cuya magnitud puede ser hasta de 2 Volts, dependiendo de quienes sean los semiconductores que la formen, los cuales definen la TSFV.

Bajo las condiciones anteriores, la unión P-N se transforma en una fuente de Fuerza Electromotriz (FEM) en CD y al voltaje que se genera, debido a la absorción de luz en el dispositivo optoelectrónico, se le llama *fotovoltaje*. Si los extremos del dispositivo se cierran con un camino de conducción mediante una resistencia eléctrica (es decir, se crea un circuito eléctrico usando conductores de electricidad y la resistencia), la tensión eléctrica fotogenerada envía a la resistencia un flujo de electrones o corriente eléctrica a través de los conductores que forman el circuito, produciendo trabajo eléctrico en ésta. Este fenómeno proporciona la evidencia física de que se está produciendo potencia eléctrica en el dispositivo optoelectrónico. En sí, lo antes dicho es el resultado del EFV. El tipo de electricidad que se está generando en dicho dispositivo es CD.

A los dispositivos que convierten la luz solar en electricidad, se les conoce como generadores fotovoltaicos, y a la unidad mínima de generación, se le conoce con el nombre de celda solar o celda FV. Dado que la celda solar es una unión P-N rectificadora, cualquier celda solar se comporta como un diodo rectificador de corriente. Dado que los electrones fotogenerados “salen” del semiconductor N hacia el circuito eléctrico exterior, este material recibe el nombre de emisor y su función primordial al crear el campo eléctrico interno con el semiconductor tipo P es “colectar” los electrones fotogenerados para que se muestre la evidencia de la “conversión” de la luz solar en la electricidad, es decir, el semiconductor tipo N es un colector-convertidor en una celda solar. Por otra parte, la fotogeneración de pares electrón hueco se realiza primordialmente en el semiconductor tipo P en donde se absorbe la luz solar, y en consecuencia se le suele llamar el “absorbedor-generador”.

Ya se ha establecido que una celda solar es un dispositivo construido por una unión P-N. Si el semiconductor es el mismo elemento o compuesto, pero con diferente conductividad eléctrica, el dispositivo optoelectrónico se le conoce por el nombre de homounión P-N. Si el material semiconductor tipo N es diferente al material semiconductor tipo P, al dispositivo optoelectrónico se le conoce por el nombre de heterounión P-N. Sin embargo, no necesariamente el material negativo o positivo debe ser un semiconductor, pudiendo ser un metal, y al dispositivo formado por la unión metal-semiconductor, se le conoce con el nombre de unión Barrera Schottky. También el efecto se presenta en uniones tipo semiconductor-aislante-semiconductor, o en otro tipo de uniones, como, por ejemplo, aquella formada con materiales orgánicos o bien con tintes líquidos.

I.3 Características eléctricas de la celda solar

Cuando la celda solar se expone a la luz, ésta se convierte en una fuente de FEM, la cual, presenta las siguientes características eléctricas:

- a) Voltaje a circuito abierto (V_{OC}).- Cuando sus terminales de salida están a circuito abierto, se presenta el voltaje máximo que puede producir la celda solar, el cual es llamado V_{OC} ;

- b) Corriente de corto circuito (I_{SC}).- Cuando sus terminales se cortocircuitan mediante el uso de un conductor externo, la corriente a través del conductor que une a las dos terminales de salida es máxima y se le llama I_{SC} . La magnitud de esta corriente, llamada también corriente fotogenerada de corto circuito es función lineal de la potencia de la radiación solar (irradiancia W/m^2) y de la superficie de captación del dispositivo optoelectrónico.
- c) Potencia máxima (P_M).- Cuando a las terminales de salida se le conecta una resistencia de carga (R_L), el voltaje de acoplamiento y la corriente que fluye a través de R_L dependen de la magnitud de R_L a través de la Ley de Ohm ($I=V/R_L$), y solo hay un par de valores (V,I) que hacen que la potencia que se consume en R_L sea máxima; y se ha convenido simbolizar a dichos valores como V_M, I_M , tal que $P_M=(V_M)(I_M)$. Así, se puede establecer que la P_M es el valor máximo de potencia eléctrica que puede generar el dispositivo optoelectrónico bajo las condiciones de medición. Si se grafica en un plano cartesiano I vs V , los parámetros eléctricos antes definidos, y el comportamiento de la corriente y el voltaje que consumen la resistencia de carga R_L cuando se varia su magnitud desde 0 hasta infinito, se obtiene la curva que se muestra en la Figura 4.

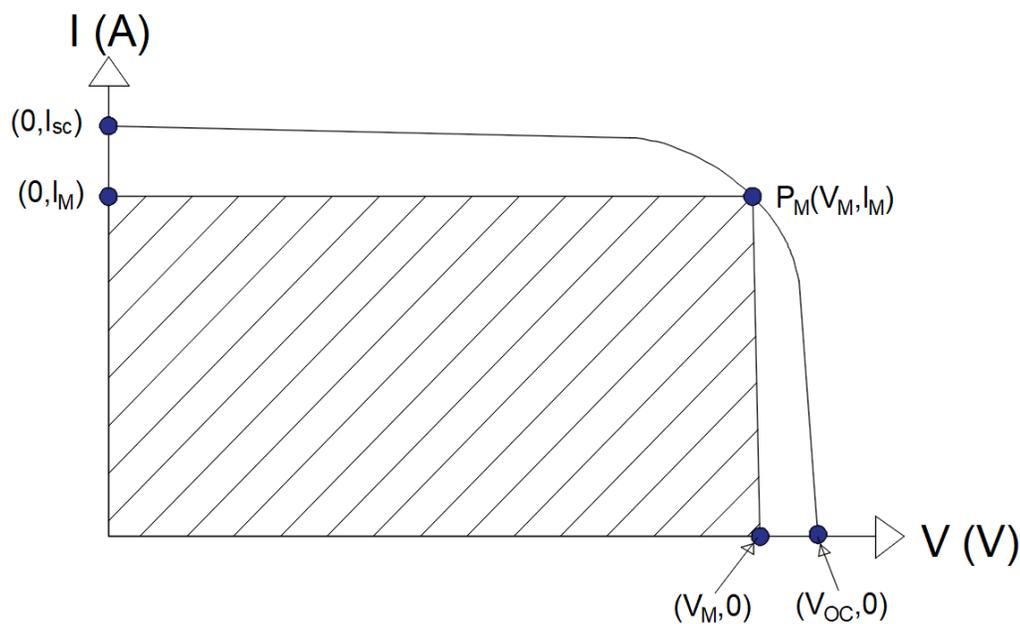


Figura 4.- Comportamiento I vs V de una celda solar.

- d) Factor de forma (FF).- Se establece como la razón entre el área del rectángulo formado por los puntos de coordenadas que definen P_M y el área del rectángulo formado por los puntos de coordenadas que definen el voltaje a circuito abierto y la corriente de corto circuito (ver Figura 5); es decir:

$$FF=(I_M \cdot V_M)/(I_{CC} \cdot V_{CA})$$

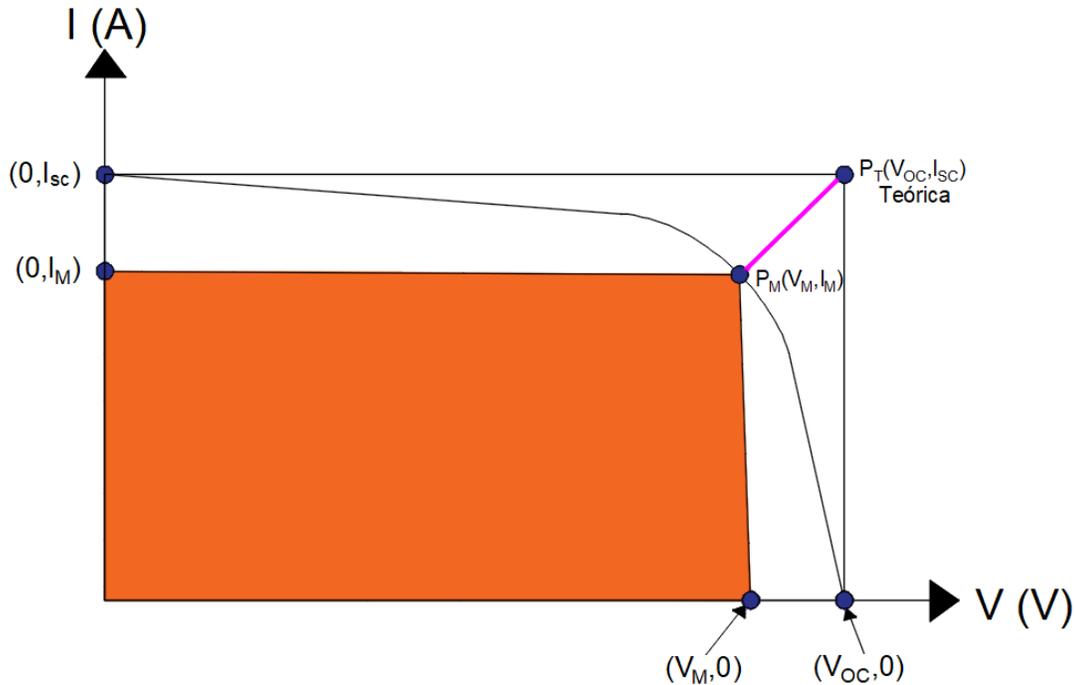


Figura 5.- Interpretación geométrica del factor de forma.

- e) Eficiencia de conversión de la celda (η): Es la relación entre la potencia que entrega la celda y la irradiancia que recibe. Se obtiene mediante el cociente del valor de la máxima potencia generada P_M entre la potencia de la radiación luminosa incidente P_S , siendo esta, el producto de la irradiancia G por el área activa S . Con esta definición se puede establecer la siguiente relación:

$$\eta = P_M / P_S = P_M / (G \cdot S).$$

I.4 Tecnologías FV disponibles en el mercado actual

A pesar de que existe una gran variedad de materiales semiconductores que pueden usarse para formar uniones P-N y convertirlas en celdas solares, solo un puñado de ellos han logrado posicionarse firmemente en el mercado FV mundial actual debido a su alta eficiencia, buen desempeño (durabilidad) y costo asequible. El termino TSFV se asocia al material semiconductor que se desempeña como el absorbedor principal. Actualmente, las tecnologías comerciales se basan en los siguientes semiconductores: Si-mono, Si-poli, Si amorfo hidrogenado, Telurio de Cadmio (CdTe), Cobre Indio Galio Selenio (CIGS) y Arseniuro de Galio (GaAs). La Figura 6 muestra la ruta de avance en eficiencias de conversión de las diferentes tecnologías a nivel laboratorio mientras que la Figura 7 muestra el desempeño de la eficiencia de conversión en los MFV comerciales (NREL, 2020). La Tabla 1 muestra el estado actual en investigación en las celdas solares de acuerdo con la referencia internacional de la revista PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS (A. Green, D. Dunlop, Hohl Ebinger, & Yoshita, 2019).

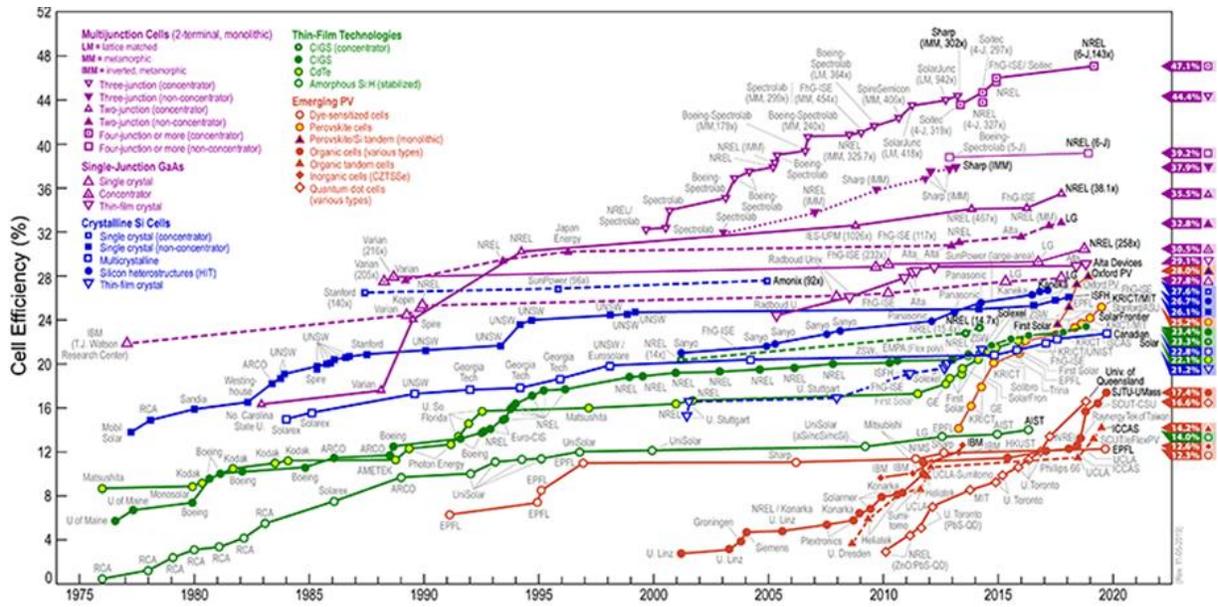


Figura 6.- Características eléctricas de las mejores celdas experimentales (NREL, 2020).

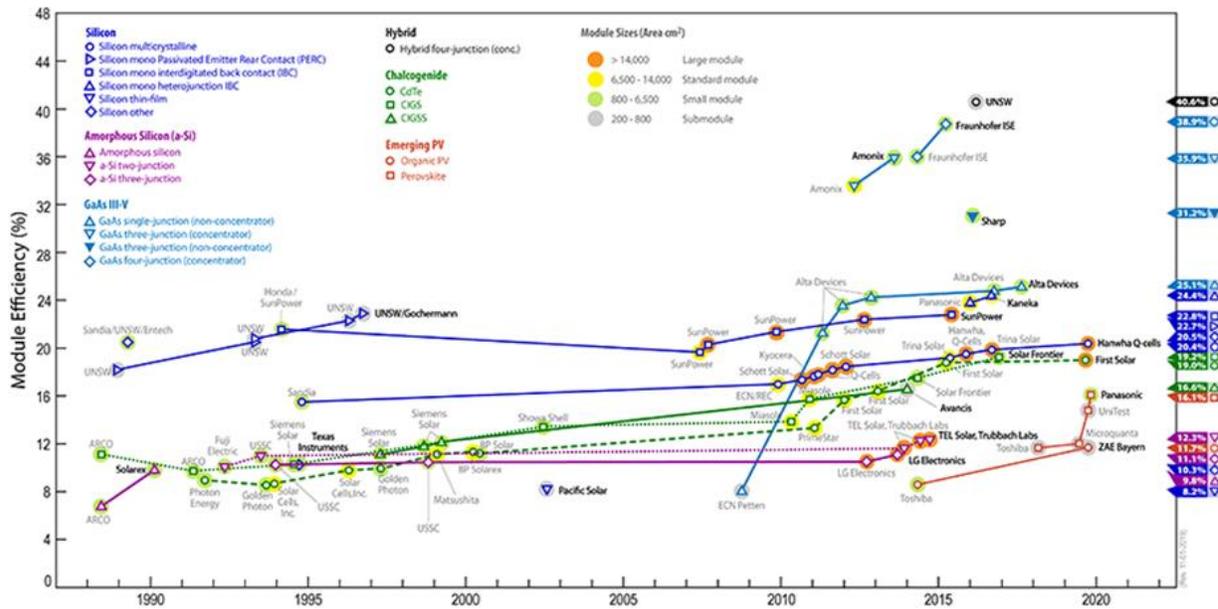


Figura 7.- Mapa de ruta de las eficiencias en MFV para las diferentes tecnologías (NREL, 2020).

Con respecto a los parámetros eléctricos que se indican en la Tabla 1, se observa que, la magnitud del voltaje a circuito abierto depende de la tecnología, mientras que la densidad de corriente de corto circuito depende de los fenómenos de transporte eléctrico en los diferentes materiales, comportamientos que han sido estudiado exhaustivamente en los diferentes laboratorios de investigación. La Figura 8, muestra fotografías simples de algunas de las diferentes tecnologías listadas en la Tabla 1.

Tabla 1.- Estado actual de las eficiencias de MFV para las diferentes tecnologías del mercado FV actual (A. Green, D. Dunlop, Hohl Ebinger, & Yoshita , 2019).

Classification	Effic., %	Area, cm ²	V _{oc} , V	I _{sc} , A	FF, %
Si (crystalline)	24.4 ± 0.5	13 177 (da)	79.5	5.04 ^a	80.1
Si (DS wafer)	20.4 ± 0.3	14 818 (ap)	39.90	9.833 ^b	77.2
GaAs (thin-film)	25.1 ± 0.8	866.45 (ap)	11.08	2.303 ^c	85.3
CIGS (Cd-free)	19.2 ± 0.5	841 (ap)	48.0	0.456 ^c	73.7
CdTe (thin-film)	19.0 ± 0.9	23 573 (da)	227.8	2.560 ^b	76.6
a-Si/nc-Si (tandem)	12.3 ± 0.3 ^d	14 322 (t)	280.1	0.902 ^e	69.9
Perovskite	16.1 ± 0.5 ^f	802 (da)	57.3	0.3207 ^b	70.3
Organic	8.7 ± 0.3 ^g	802 (da)	17.47	0.569 ^h	70.4
<u>Multijunction</u>					
InGaP/GaAs/InGaAs	31.2 ± 1.2	968 (da)	23.95	1.506	83.6
<u>"Notable Exception"</u>					
CIGS (large)	18.6 ± 0.6	10 858 (ap)	58.00	4.545 ^b	76.8

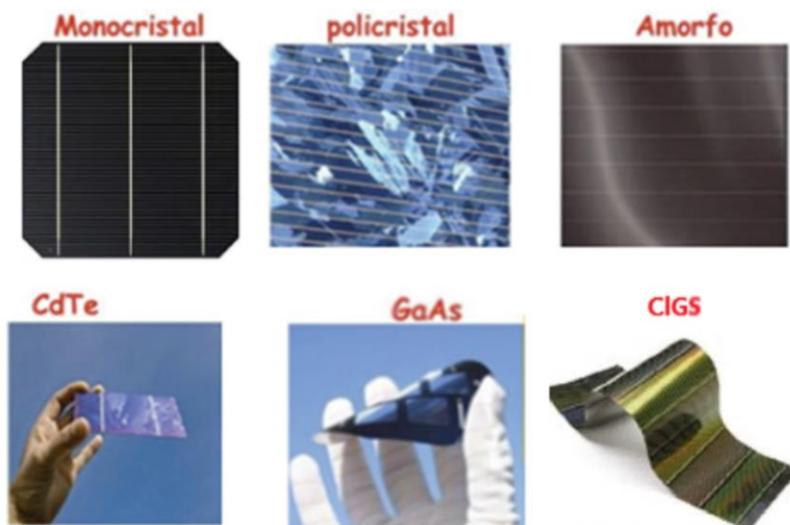


Figura 8.- Imágenes de las diferentes TSFV en el mercado. Imagen Modificada del libro Aplicaciones Fotovoltaicas de la Energía Solar (Sánchez Juárez, Martínez, de la Luz Magdaleno, Ortega Cruz, & Sánchez Pérez, 2017).

Dado que el mercado FV ha estado dominado por la tecnología del Si cristalino y que este trabajo tiene como meta identificar los materiales asociados a la construcción de la celda solar y el MFV, se decidió investigar únicamente los procesos para producir celdas de Si cristalino ya que, la tendencia internacional y nacional es seguir usando dicho material por las bondades que ha mostrado entre las que destacan las siguientes: la abundancia de este elemento en la naturaleza (27.69 %, únicamente superado por el oxígeno con 46.71 %), su estabilidad fisicoquímica a temperatura

ambiente, procesos de transporte eléctrico e impurificación muy bien conocidos y establecidos, tecnologías disponibles de elaboración a gran escala , comportamiento eléctrico de la unión P-N estable y durable, y la tecnología asociada a su fabricación a gran escala, con costos realmente económicos.

Con base en dicho semiconductor, dentro de la TSFV de Si, las investigaciones encaminadas a reducir costos de fabricación e incremento de eficiencia de conversión han generado variantes y procesos de fabricación que han tenido los resultados esperados. A continuación, se proporciona una descripción general de los procesos de elaboración del Si cristalino y de las celdas solares basadas en dicho material.

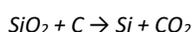
I.5 Tecnologías de celdas solares de Si cristalino

Dado que el Si es un elemento que se encuentra en la naturaleza formando compuestos y que para su uso en las celdas solares es preciso obtenerlo en forma pura, a continuación, se describe de forma general los procesos involucrados en la refinación del Si, así como aquellos que se requieren realizar para obtener como producto final las celdas solares basadas en este elemento.

I.5.1 Refinación del Si

El Si es un material que en la naturaleza se encuentra en forma de compuestos tales como amatista, obsidiana, antracita, cuarzo y sílice o arena de cuarzo, los cuales son ricos en óxido de Si (SiO_2), llamados comúnmente sílices, de los cuales, el más común por su abundancia es la arena de cuarzo. Los sílices tienen muchas impurezas y se requieren de varios procesos físicos y químicos de purificación antes de poder ser utilizados para el desarrollo de celdas de Si-mono y Si-poli. Al tipo de Si que ha alcanzado las características apropiadas para ser usado en aplicaciones FV, se le denomina Polisilicio grado solar y debe tener una pureza mínima de 99.9999 %. Ignacio Mártil de la Plaza, Doctor en Física y Catedrático de Electrónica en la Universidad Complutense de Madrid, define las siguientes etapas para el proceso de obtención del polisilicio grado solar (Mártil, 2016):

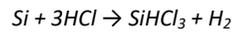
- 1) Extracción de la sílice.
Proceso de minería que consiste en la extracción de la arena de Si de la corteza terrestre.
- 2) Obtención de Si grado metalúrgico (mg-Si) a partir de la arena de cuarzo.
Esta fase se lleva cabo a través de un proceso de reducción metalúrgico. Consiste en fundir la sílice en presencia de un agente reductor, en este caso carbón mineral, en un horno de arco eléctrico y a una temperatura por encima del punto de ebullición del SiO_2 ($> 2,500$ °C). Durante el proceso, el oxígeno se desprende de la sílice y es atrapado por el carbono para formar monóxido de carbono y otros subproductos tales como carburos de Si y SiO siguiendo la siguiente reacción química:



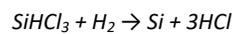
El monóxido es extraído del horno, dejando en el fondo un depósito líquido de Si, el cual, es extraído y enfriado lentamente para ser pulverizado posteriormente en granos de diferentes tamaños. El Si obtenido mediante este proceso es denominado Si de grado metalúrgico y tiene una pureza de entre 98 % y 99 %.

3) Obtención del polisilicio grado solar.

Este producto, es obtenido a partir de la purificación del Si grado metalúrgico mediante el método de "Siemens", el cual, implica las siguientes etapas principales: Primero, el Si grado metalúrgico es convertido en "Triclorosilano" (TCS) en un Reactor de Lecho Fluidizado (FBR, por sus siglas en inglés) que se encuentra a 300 °C a través de la reacción:



El triclorosilano (SiHCl_3) resultante, es un líquido rico en Si y se le denomina TCS grado-semiconductor. Como siguiente paso, el TCS, que alcanza su punto de ebullición a 32 °C, se destila para eliminar impurezas. Por último, el TCS se descompone en una atmósfera reductora a una temperatura de 1,000 °C aproximadamente, mediante la reacción:



de modo que los átomos de Si, suspendidos en el vapor originado durante este proceso, pasan a formar delgadas barras cilíndricas mediante un proceso termodinámico de sublimación inversa (también conocido como deposición o desublimación). Una vez finalizado el proceso de Siemens, las varillas de polisilicio obtenidas con una pureza mínima de 99.9999 % (6N), se retiran del reactor y se rompen en pequeños trozos que serán fundidos para producir lingotes de Si-mono o Si-poly y, posteriormente, celdas FV.

I.5.2 Crecimiento de Si monocristalino

El Si-mono se produce mediante el proceso clásico de "Czochralski", el cual, consiste en crecer un material semiconductor sólido, en forma de lingotes cilíndricos, a partir del estado líquido del semiconductor, teniendo sus átomos un crecimiento preferencial en el espacio, lo que le da un orden cristalino único en todo el volumen. Para conseguir lo anterior, el crecimiento del lingote se hace a partir de una "semilla cristalina de crecimiento" que es la que proporciona la orientación preferencial que van a tener los átomos del semiconductor que formarán el sólido. La Figura 9 proporciona un diagrama esquemático simplificado de las etapas del crecimiento de lingotes de Si-mono.

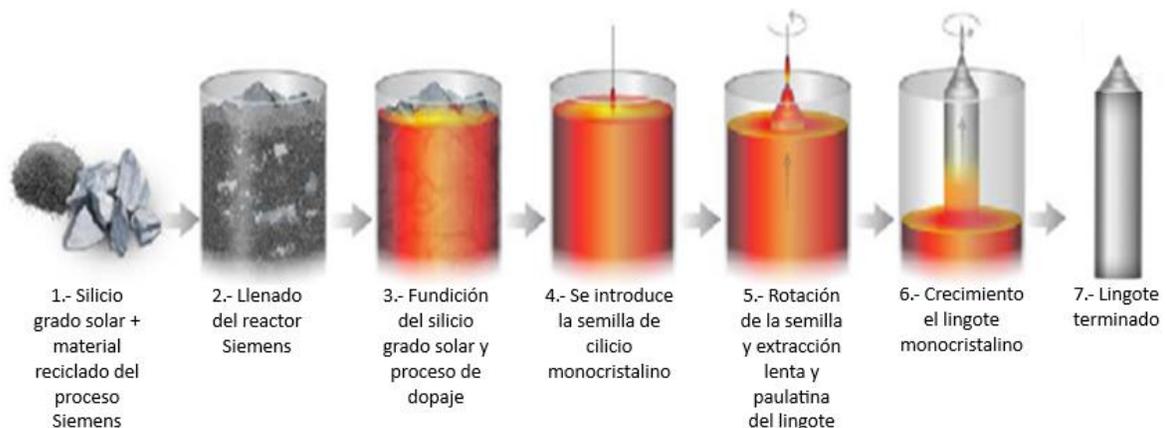


Figura 9.- Se muestra el proceso Czochralski para crecer lingotes cilíndricos de Si-mono a partir de polisilicio grado solar (NREL, 2018, revisión 2020).

Como se puede apreciar en la Figura 9, el proceso de Czochralski se lleva a cabo de la siguiente manera: de izquierda a derecha, se funde el polisilicio, se introduce una semilla con una estructura cristalina definida, la semilla se somete a una rotación constante propiciando que los átomos de Si se adhieran a ésta por cohesión, y al extraerla lentamente, estos se solidifican en la misma dirección cristalina de ella. Ya que la semilla está girando y se extrae lentamente, la solidificación se realiza en forma de un cilindro o lingote de Si; y dado que solo hay una sola dirección de solidificación para los átomos, el resultado es un “monocristal”. Dado que la movilidad eléctrica de los electrones en un cristal es afectada por la orientación de los átomos en el espacio del cristal, en el caso del Si, la movilidad electrónica con mayor magnitud se lleva a cabo en la dirección [100], los lingotes que se utilizan para hacer celdas solares de Si-mono se crecen usando semillas de Si cuyos átomos están en la dirección [100].

El lingote de Si se puede dopar durante su crecimiento agregando una atmosfera de gases en específico para que resulte con una déficit de electrones (material tipo P) o con un exceso de electrones (material tipo N). Los siguientes son ejemplos de gases que se pueden usar para lograr el dopaje del Si: si el crecimiento del lingote se hace en una atmosfera de boro (diborano como gas dopante, B_2H_6) y silano (SiH_4), el lingote se obtiene con una conductividad tipo p; conversamente, si el crecimiento del lingote se hace en una atmosfera de fosforo (fosfina como gas dopante, PH_3) y silano (SiH_4), el lingote se obtiene con una conductividad tipo N (Le Comber & Spear, 2018). En la industria solar actual, lo más común es dopar el lingote con boro para que contenga un déficit de electrones y posteriormente, durante el procesamiento de la celda, se lleva a cabo un segundo dopaje para conseguir que una de las caras de ésta tenga un exceso de electrones, mediante la adición de Fosforo (regularmente Cloruro de Fosforilo ($POCl_3$) como dopante) .

Posteriormente, una vez que el material se cristaliza, los lingotes son rebanados para obtener obleas con espesores entre 100 y 300 micras. En la Figura 10, se muestra el proceso de rebanado para la obtención de la oblea de Si-mono

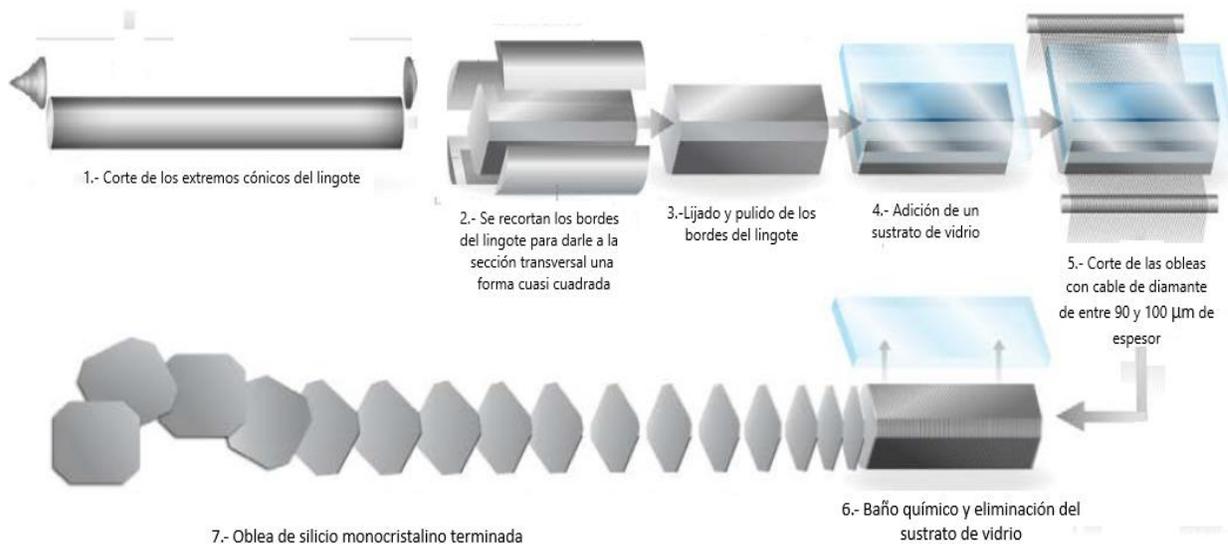


Figura 10.- Secuencia de rebanado de obleas solares de Si-mono (NREL, 2018, revisión 2020).

I.5.3 Crecimiento de Si policristalino

El proceso más popular para la elaboración de Si-poli consiste en la simple solidificación del Si fundido en un contenedor de grafito con forma de un paralelepípedo rectángulo de sección transversal cuadrada, en una atmosfera de Boro (ver Figura 11). Durante el enfriamiento paulatino, los átomos de Si tienden a solidificarse sin tener alguna dirección preferencial, por lo cual se tiene como resultado un sólido con muchas fronteras de grano cristalino, lo que le da su carácter de policristal. A este proceso se le conoce con el nombre de Solidificación Direccional (DS, por sus siglas en inglés) o casting.

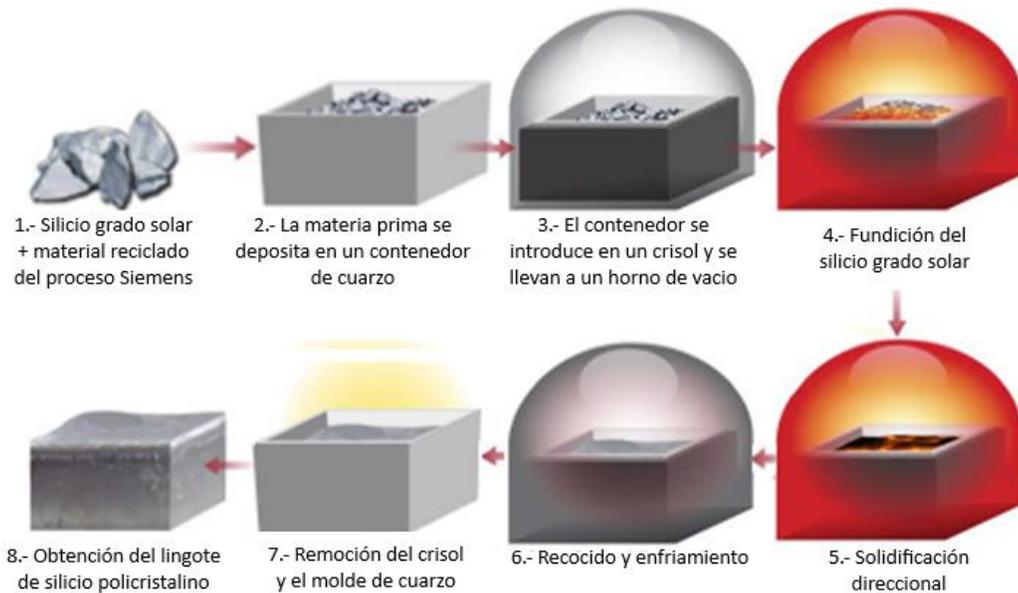


Figura 11.- Se muestra a grandes rasgos el proceso de obtención de las celdas de Si-poli a partir de polisilicio grado solar (NREL, 2018, revisión 2020).

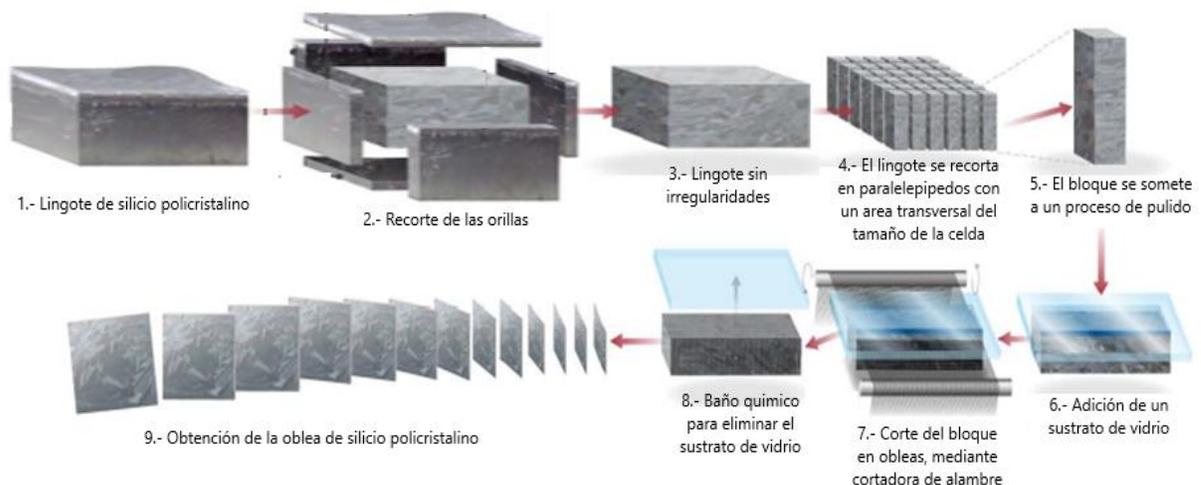


Figura 12.- Secuencia de rebanado de obleas de Si-poli (NREL, 2018, revisión 2020).

Posteriormente, el lingote es sometido a un proceso de rebanado para obtener las obleas de Si-poli. En la Figura 12, se puede observar el proceso de obtención de la oblea a partir del lingote terminado.

I.5.4 Elaboración de celdas de Si cristalino

Las celdas de Si-mono que dominan el mercado provienen de obleas rebanadas de lingotes tipo P crecidos por el método Czochralski. Por otra parte, las celdas de Si-poli se obtienen a partir de obleas rebanadas de lingotes tipo P crecidos por el método de Casting. El procesamiento habitual para la obtención de este tipo de celdas es el siguiente (ver Figura 13):

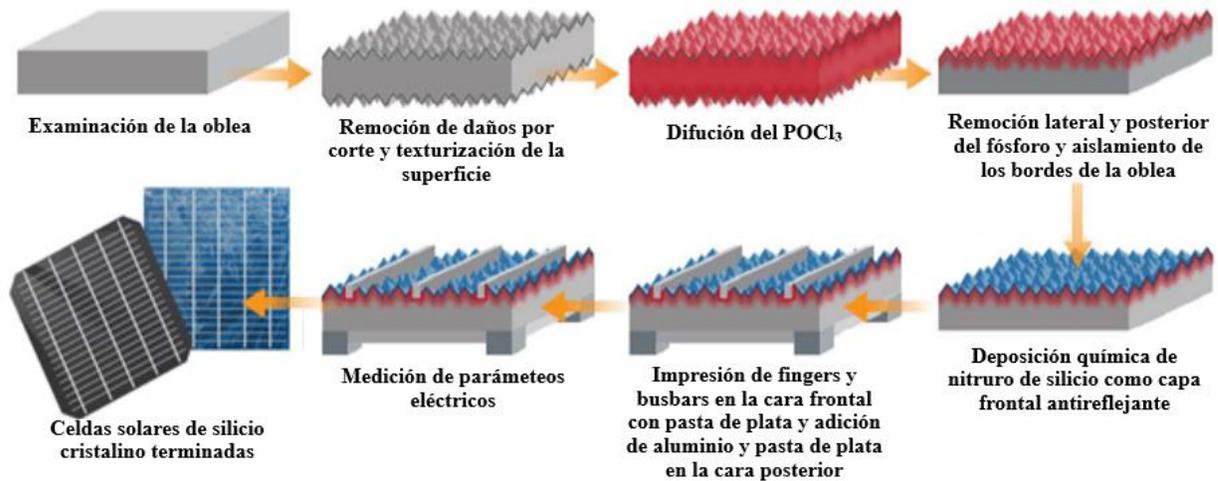


Figura 13.- Se muestra el procesamiento de celdas solares de Si cristalino de 156 mm x 156 mm (NREL, 2018, revisión 2020).

- Las obleas son sometidas a un proceso de texturización en una solución alcalina para obtener sobre su superficie “pirámides” que disminuyen notablemente la reflexión óptica superficial, dándole a la celda una apariencia color negro.
- Estas obleas, con la superficie texturizada, son sometidas a un proceso de difusión térmica en una atmosfera rica en fósforo (usualmente se emplea POCl_3 y PH_3) para formar la capa N^+ y crear una unión $\text{N}^+\text{-P-N}^+$.
- Se determina cual será la parte posterior de las dos superficies de la oblea, y sobre de ésta, se deposita una capa de aluminio (Al).
- Posteriormente, las obleas son sometidas a una difusión térmica para que el Al se introduzca dentro de la oblea de Si, reemplazando átomos de Si; y como consecuencia de dicho reemplazo, se forma en dicha superficie una aleación eutéctica Al/Si, y más hacia dentro, con una profundidad de hasta $1.0 \mu\text{m}$, una capa de Si fuertemente impurificado con Al (creando una capa P^+ , ya que, los átomos de Al desplazan a los de Si y se comportan como átomos aceptores). El proceso anterior crea una zona denominada Campo de Superficie Posterior o Back Surface Field (BSF), el cual, disminuye la recombinación superficial de electrones fotogenerados en el fondo de la celda.
- Enseguida, sobre la cara posterior, se agrega una capa metálica que absorbe la radiación infrarroja que atraviesa las capas anteriores.

- f) Sobre la superficie que tiene las rejillas se deposita una película de nitruro de Si que actúa como una capa antirreflejante y que le da a la celda una apariencia de color azul.
- g) Seguidamente, se deposita sobre la superficie posterior Al/Si una capa de plata (Ag) para que actúe como el contacto eléctrico posterior; sobre la superficie N⁺(Si) se depositan las rejillas metálicas necesarias para la colección de los electrones fotogenerados, en donde el tamaño, separación y espesor de ellas está determinado para obtener la menor sombra posible y menor resistencia eléctrica.

I.5.5 Configuración y componentes de una celda solar de Si cristalino

Las celdas comerciales convencionales de Si cristalino, tanto Si-mono como Si-poli, presentan una configuración de capas semiconductoras como las que se muestra en la Figura 14 (Sánchez Juárez, Martínez, de la Luz Magdaleno, Ortega Cruz, & Sánchez Pérez, 2017), nótese las capas semiconductoras N⁺, P, P⁺, el contacto metálico por la parte posterior, la rejilla metálica de colección, así como sus dimensiones por la parte frontal (por donde incide la luz) y los contactos principales que actúan como las terminales de salida de la celda solar.

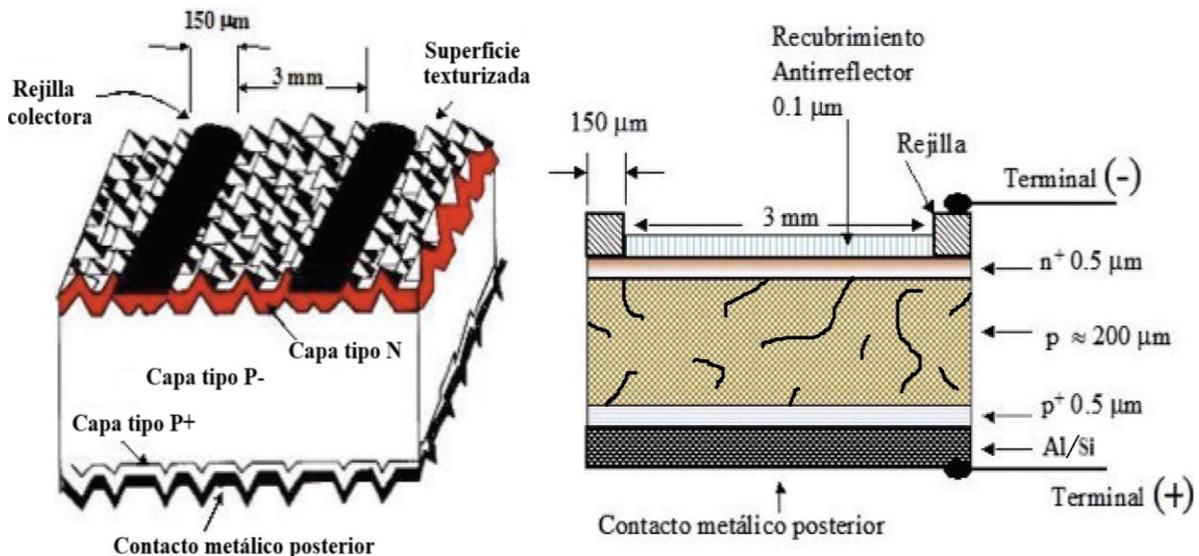


Figura 14.- Diagrama esquemático de un corte transversal de celdas solares de Si cristalino (a la izquierda la celda de Si-poli y a la derecha la de Si-mono) que muestran las capas semiconductoras que componen a la celda solar, así como las rejillas y capa metálica para los contactos eléctricos (Sánchez Juárez, Martínez, de la Luz Magdaleno, Ortega Cruz, & Sánchez Pérez, 2017).

Aunque las técnicas de crecimiento tanto de Si-mono como de Si-poli no limitan el diámetro de los lingotes, los industriales que fabrican las celdas solares de Si cristalino han convenido en estandarizar el diámetro de sus productos de tal manera que, en la actualidad, las obleas de Si cristalino más populares son aquellas de configuración cuadrada de 156 mm por lado y con espesores típicos de entre 100 μm y 200 μm (obleas tipo M2). Sin embargo, en el transcurso de los últimos dos años, algunas empresas como Zhonghuan Semiconducto y LONGi, han tratado de introducir al mercado otros formatos de celda cuadrada como el M6 de 166 mm x 166 mm, el M10 de 182 mm x 182 mm o el M12 con 210 mm por lado.

De hecho, LONGi, uno de los fabricantes, de obleas de Si, más grandes del mundo, anunció recientemente que, con la colaboración de otros varios Productores, está planteando un nuevo estándar para las dimensiones de las obleas en un futuro cercano. Hasta donde se sabe, las empresas: LONGi, JinkoSolar, Canadian Solar, JA Solar, Runyang Yueda Photovoltaic Technology, Lu'an Solar Technology y Zhongyu Photovoltaic Technology; buscan estandarizar el formato de celda cuadrada M10, la cual, tiene 182 mm por lado y, según LONGi, ofrece beneficios para la nueva generación de módulos con más de 500 W de potencia pico (Hutchins, 2020).

I.5.6 Celdas bifaciales

Las celdas convencionales son “monofaciales”, es decir, capturan la luz del sol únicamente por su cara superior, mientras que la cara inferior está recubierta por el contacto metálico posterior que es opaco. Las celdas bifaciales, como su nombre lo indica, están diseñados de tal manera que puedan aprovechar la luz solar tanto en la cara frontal como en la posterior (Figura 15); es decir, por la parte posterior, el contacto metálico posterior es también una rejilla metálica idéntica a la que se coloca en la parte frontal.

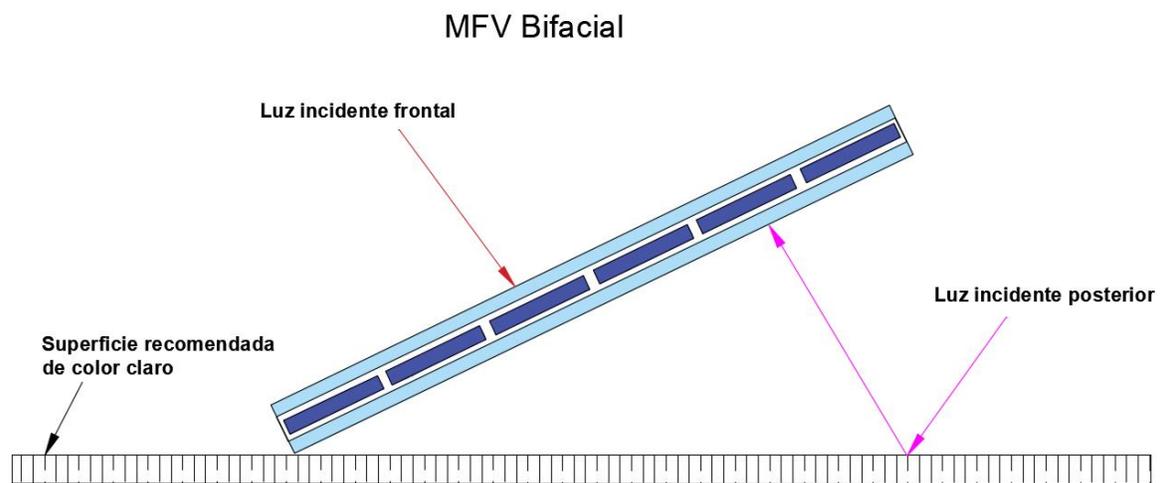


Figura 15.- Se muestra un MFV bifacial y la forma en la que aprovecha la radiación solar reflejada por el suelo (albedo).

Cabe destacar que, el propósito de la tecnología bifacial no es incrementar la eficiencia de conversión de la celda, por el contrario, al aprovechar la radiación solar directa y también la reflejada por el suelo (albedo), ofrecen un incremento únicamente en su producción de potencia eléctrica en función del albedo. Esta tecnología está disponible actualmente para MFV de Si cristalino y ofrece incrementar la producción eléctrica de este entre 5 % y 30 % (TRINA SOLAR, 2019).

I.5.7 Celdas con tecnología PERC

La tecnología de Celda solar con Emisor y lado Posterior Pasivado o PERC (por sus siglas en inglés, Passivated Emitter and Rear Cell), ha ganado popularidad en el mercado actual, consiste en dotar a la celda de Si cristalino de una capa extra para aumentar la eficiencia de los MFV sin que los costos se disparen. Una celda de Si cristalino convencional se compone de tres capas con propiedades eléctricas distintas: la capa tipo N⁺ llamada emisora, que es por donde incide la radiación solar, siendo esta muy delgada (0.5 μm aproximadamente), con una alta transmitancia y que comúnmente

se le llama capa tipo ventana; la capa tipo P que es gruesa comparada con la tipo N, cuya función es absorber la radiación solar y producir pares electrón-hueco; y una última capa inferior de aluminio y su proceso de difusión que ha creado un campo posterior BSF que disminuye la recombinación superficial de electrones fotogenerados en el fondo de la celda y que absorbe la radiación infrarroja que atraviesa las capas anteriores. En cambio, como se aprecia en la Figura 16, una celda con tecnología PERC incorpora una capa adicional con características dieléctricas y con una reflectancia óptica en el infrarrojo que se deposita sobre la superficie de la capa tipo P; y posteriormente a ésta, se deposita la capa de aluminio. La idea principal de esta capa adicional es reflejar la radiación solar no absorbida antes de que llegue a la capa de aluminio, donde se absorberían produciendo calor. En su lugar, la capa PERC refleja la radiación infrarroja hacia las capas superiores, brindando una nueva oportunidad para ser aprovechados excitando electrones antes de ser absorbidos o salir del material, generando así, una mayor cantidad de electrones fotogenerados, y en consecuencia, mayor potencia (especialmente durante las primeras horas de la mañana, últimas de la tarde o en días de cielo nublado) (Sunfields, 2018). La eficiencia típica de conversión para esta tecnología es aproximadamente del 22 %; es decir una celda de 156 mm por 156 mm puede generar 5.354 W bajo condiciones estándares de medición.

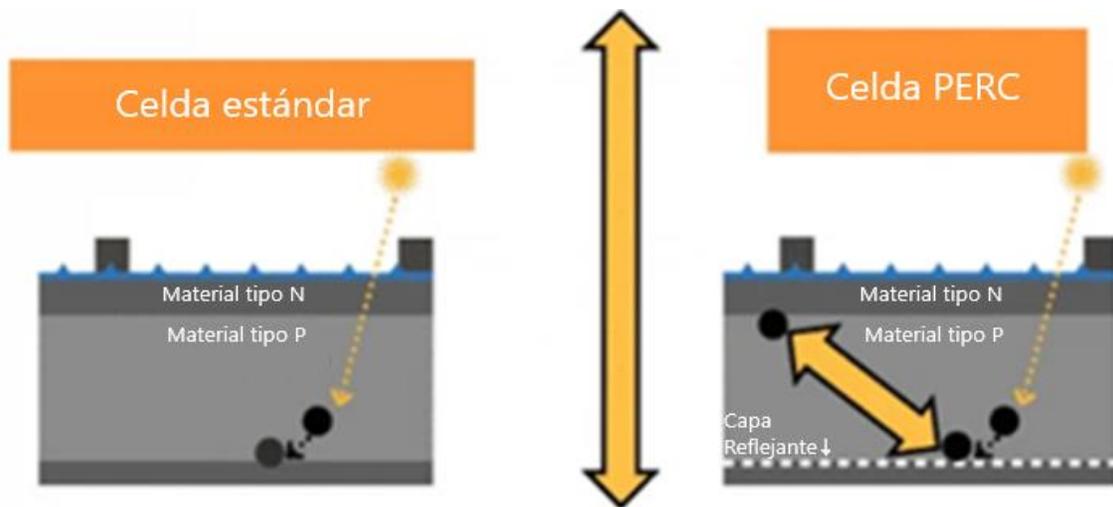


Figura 16.- Se muestra la composición de una celda convencional de Si a la izquierda, y a la derecha la composición de una celda que incluye tecnología PERC. Nótese la interacción del fotón dentro del material (EUROPE, 2018).

I.5.8 Celdas HJT

Este nombre viene de las siglas en inglés Heterojunction with Intrinsic Thin Layer (HJT), esta tecnología consta de la unión de Si cristalino tipo N, con una película delgada de Si amorfo (a-Si:H) dopada tipo p, y entre las cuales se encuentra una capa delgada intermedia de Si amorfo intrínseco como pasivante. Estas celdas se construyen partiendo de una oblea de Si tipo N y mediante un proceso de depósito químico en fase de vapor asistido por plasma, se deposita sobre la oblea capas sucesivas de Si amorfo hidrogenado tanto intrínseco como impurificado tipo N⁺ y tipo P⁺, y sobre estas capas se depositan capas delgadas de contactos conductores transparentes (TCO: transparent conducting oxides). La Figura 17 muestra un corte transversal de las celdas HJT.

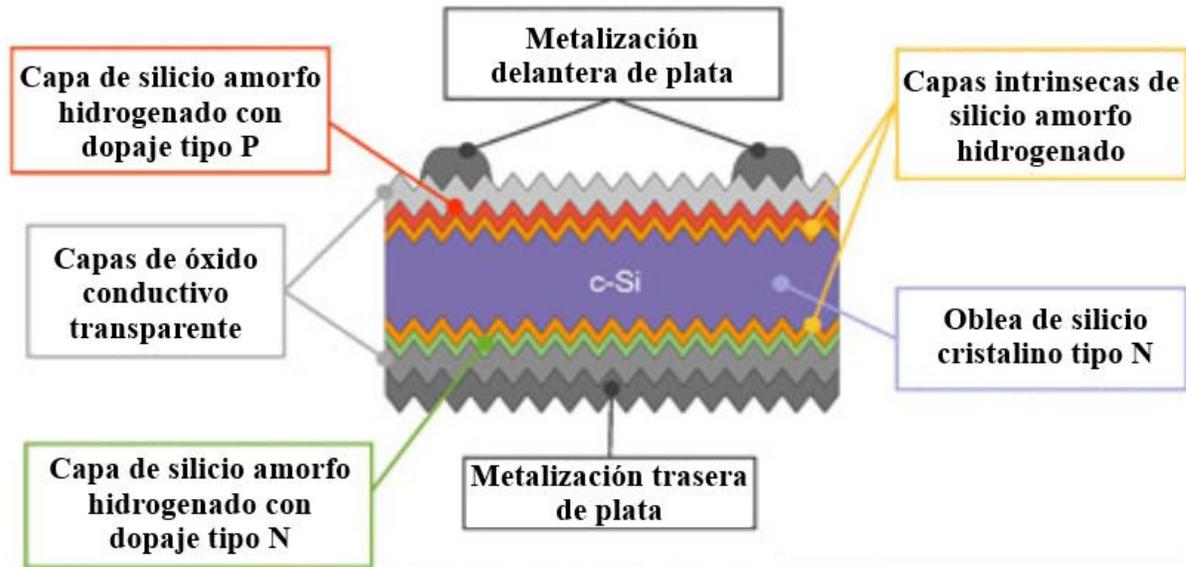


Figura 17.- Se muestran las capas que integran una celda HJT (Gifford, 2017).

La tecnología de celdas HJT combina la alta eficiencia de las celdas solares de Si cristalino con el bajo coeficiente de pérdida de potencia por temperatura del Si amorfo para lograr mayores eficiencias, elevando los voltajes de circuito abierto y disminuyendo los coeficientes de pérdida de potencia por temperatura al orden de $\gamma = -0.25\%/K$, asegurando un mayor rendimiento, en comparación con otras tecnologías de Si, al estar trabajando a temperaturas elevadas. Las celdas de heterounión alcanzan una eficiencia superior a 24 % y generan hasta un 35 % más de kWh/m² que las celdas de Si convencionales, por lo tanto, alcanzan el costo nivelado de electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés) más bajo del mercado (Shubert, 2018).

I.5.9 Celdas “Shingled Cells” (sin conexiones alámbricas) y celdas con contactos posteriores (back contact cells)

En cuanto a las celdas Shingled Cells, el fabricante de tecnología fotovoltaica SunPower ofrece una innovación interesante, no solo pretende eliminar las tiras metálicas frontales de las celdas, también plantea eliminar las conexiones metálicas entre celda y celda, con el fin de incrementar el rendimiento de las *placas solares*. El resultado es un diseño innovador (Figura 18) en el que las celdas se colocan en cascada y simulan una superficie de baldosas (Shingled Cells, en inglés).

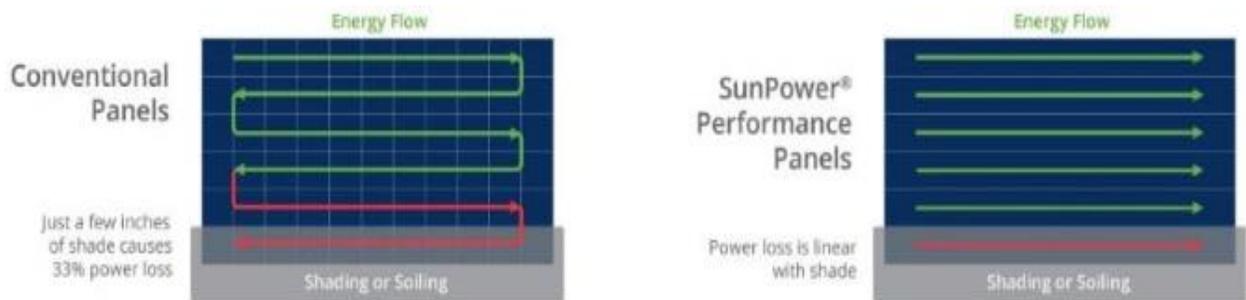


Figura 18.- Se presenta la estructura de los módulos con tecnología Shingled cells (SUNPOWER, 2019).

Las conexiones entre las celdas están en la cara posterior del panel y son flexibles y redundantes, de manera que el flujo de energía es constante. Actualmente el fabricante SunPower ha desarrollado módulos con esta tecnología con eficiencias del orden de 17-21 % con 335 W y 350 W de potencia (SUNPOWER, 2019).

Por otra parte, tenemos a las celdas con contactos traseros, esta tecnología apuesta por aumentar al máximo el área de captación de cada celda solar eliminando las tiras metálicas en la cara superior de ellas (busbars y fingers). Se trata de un nuevo modo de plantear la estructura de la celda, evitando que las conexiones frontales resten área de captación “útil” (Figura 19).

En particular, esta tecnología apuesta por aumentar al máximo el área de captación de cada celda solar eliminando las tiras metálicas en la cara superior de ellas (busbars y fingers). Se trata de un nuevo modo de plantear la estructura de la celda, evitando que las conexiones frontales resten área de captación “útil” (Figura 19).

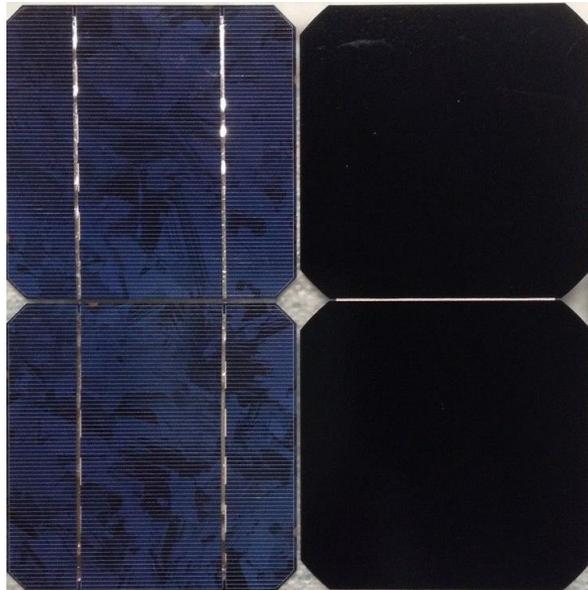


Figura 19.- Se muestran, a la izquierda, celdas de Si cristalino convencional y, a la derecha, celdas de Si con contactos posteriores (SUNPOWER, 2019).

II Módulos de Si cristalino y sistemas FV

II.1 Introducción de capítulo

Ya que la potencia eléctrica generada por las celdas solares es pequeña (voltajes máximos de 0.8 volt con densidades máximas de corriente de 42 mA/cm^2) y teniendo la ventaja de que el tipo de electricidad es CD, estas se pueden conectar en serie para incrementar el voltaje y tener un dispositivo de mayor potencia. Dado que las celdas solares deben ser expuestas a la luz solar, estas deben protegerse contra los efectos de la climatología del sitio donde se instalen; en consecuencia, deben aislarse del ambiente mediante técnicas de laminado. El encapsulado de las celdas solares

conectadas en serie recibe el nombre de MFV. En la Figura 20 se muestra la representación esquemática de un MFV empleada en la elaboración de esquemas eléctricos.

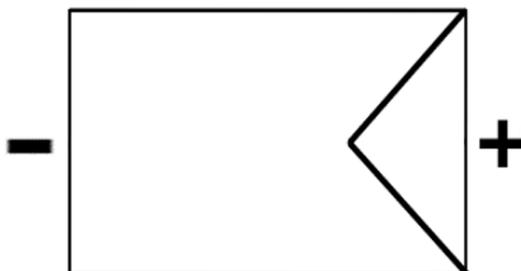


Figura 20.- Representación esquemática de un MFV empleada en la elaboración de diagramas eléctricos.

A continuación, se proporciona los requerimientos normativos para la fabricación de los MFV

II.2 Constitución general de un módulo FV

La norma IEC 61730-1 de la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC, por sus siglas en inglés) establece, en su primera sección, los requerimientos de construcción y seguridad para MFV (Photovoltaic (PV) Module Safety Qualification). En forma general se establece que, el MFV debe construirse usando un super estrato de vidrio templado que será la cara frontal del MFV; un sándwich formado por un polímero transparente, las celdas conectadas en serie y un polímero opaco (o transparente), que se lamina junto con el super estrato a una temperatura y presión que permite la vulcanización de ambos polímeros; un marco de aluminio que provee el medio de fijación mecánica; una caja en donde se instalan dos terminales metálicas que permiten la conexión y aislamiento de los conductores de salida de la combinación serie de las celdas; los diodos de paso que deben de estar incluidos en la caja; y los conductores de salida con sus conectores correspondientes (INTERNATIONAL ESTANDARD IEC 61730-1, 2016). Un corte esquemático que muestra las partes y componentes de un MFV se presenta en la Figura 21.

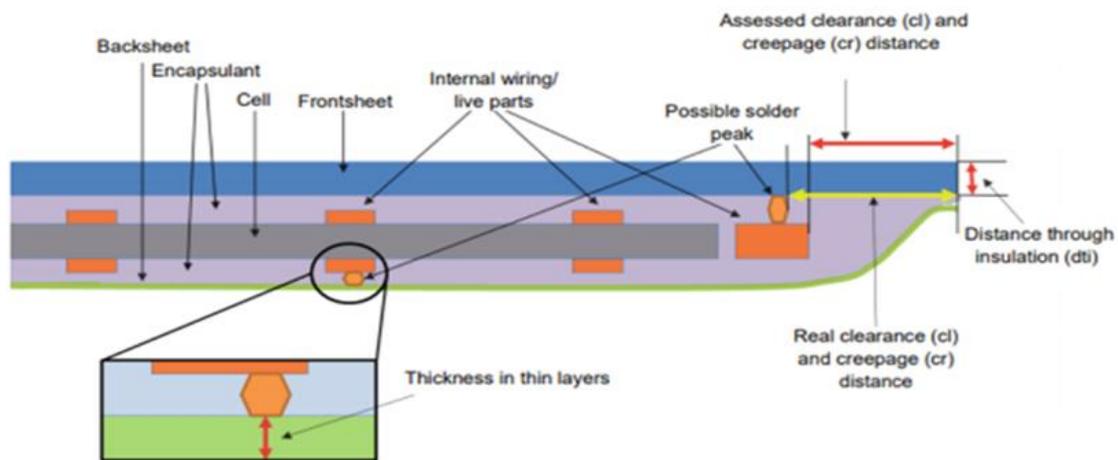


Figura 21.- Se muestra el corte transversal del MFV con las partes identificadas por la norma IEC 61730-1 (INTERNATIONAL ESTANDARD IEC 61730-1, 2016).

Las partes que considera la norma IEC 61730-1 para la integración de un MFV son las siguientes:

- a) Celdas solares FV.- La norma no considera un tipo de tecnología en particular.
- b) Lámina posterior (backsheet).- Capa externa del MFV ubicada en su parte posterior, la cual provee aislamiento eléctrico y protección a los componentes internos contra elementos climáticos.
- c) Conductores de salida y Conectores.- Componente que termina los conductores con el fin de proporcionar conexión y desconexión de un componente de acoplamiento adecuado. En la actualidad, el modelo de conector más utilizado en la ISFV es el Multi Contac de 4 mm (MC4).
- d) Encapsulante.- Capa(s) intermedia(s), ubicada(s) entre la lámina frontal y la lámina posterior que encierran las partes vivas del MFV.
- e) Lámina frontal (frontsheet).- Capa externa, ubicada en la parte frontal del MFV. La mayor parte de los modelos usan como lámina frontal vidrio templado de 3 mm de espesor con bajo contenido en hierro. Al igual que la lámina posterior, protege los componentes internos del MFV contra tensiones externas y elementos climatológicos.
- f) Barrera de aislamiento.- Configuración elevada o empotrada de un aislante para aumentar la distancia de fuga entre superficies conductoras.
- g) Diodos de desahogo antirretorno (Bypass).- Estos diodos deben tener la capacidad para soportar la corriente y el voltaje en base a los parámetros eléctricos del MFV. Su función es proveer un camino alternativo para los electrones cuando las celdas FV no permita un flujo apropiado debido al sombreado de una o más unidades (ver Figura 22).

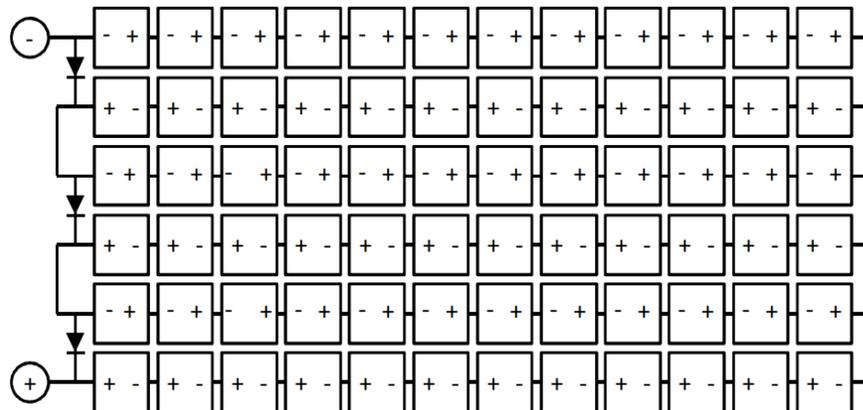


Figura 22.- Se muestra la interconexión de 72 celdas integrando un MFV y la forma en que están conectados los diodos de paso (un diodo de paso por cada 24 celdas en serie) para brindar un camino alternativo para el flujo de electrones en caso de un sombreado (Gostein , Littmann, Caron , & Dunn, 2013).

- h) Caja de conexiones.- Caja eléctrica, ubicada en la parte posterior del MFV en la que se realizan las conexiones del cableado eléctrico.
- i) Sello.- Sellado de componentes y conductores asociados con un compuesto para excluir contaminantes externos.

II.3 Construcción de un MFV de Si cristalino

Como ejemplo se puede decir que el proceso de manufactura para MFV de 60 celdas es el siguiente (ver Figura 23): como primer paso, se conectan celdas fotovoltaicas en grupos de 10 unidades en serie, posteriormente se organiza una matriz conformada por 6 cadenas en paralelo; enseguida se interconectan eléctricamente las cadenas con cintas metálicas para formar un solo bloque de 60 celdas en serie, después, se monta el arreglo de cadenas entre dos capas de encapsulante y a su vez, entre dos capas de vidrio o una de vidrio y una lámina rígida de polímero en la parte posterior. Los polímeros encapsulantes deben ser de un material termoplástico que se funde cuando se calienta durante el proceso de laminación, comúnmente se usa Etil-Vinil-Acetato (EVA) para encapsular las celdas FV y Fluoruro de Polivinilo (PVF), mejor conocido como Tedlar, para proteger la parte posterior del MFV; dejando orificios entre ambos materiales para llevar a cabo la interconexión de las celdas FV con un circuito externo. Posteriormente, un marco de aluminio extruido se fija alrededor del perímetro del MFV para brindarle protección y puntos de anclaje (NREL, 2018, revisión 2020). Finalmente, se añade sobre la lámina posterior una caja aislante para proteger los conductores eléctricos de salida y los diodos de desahogo.

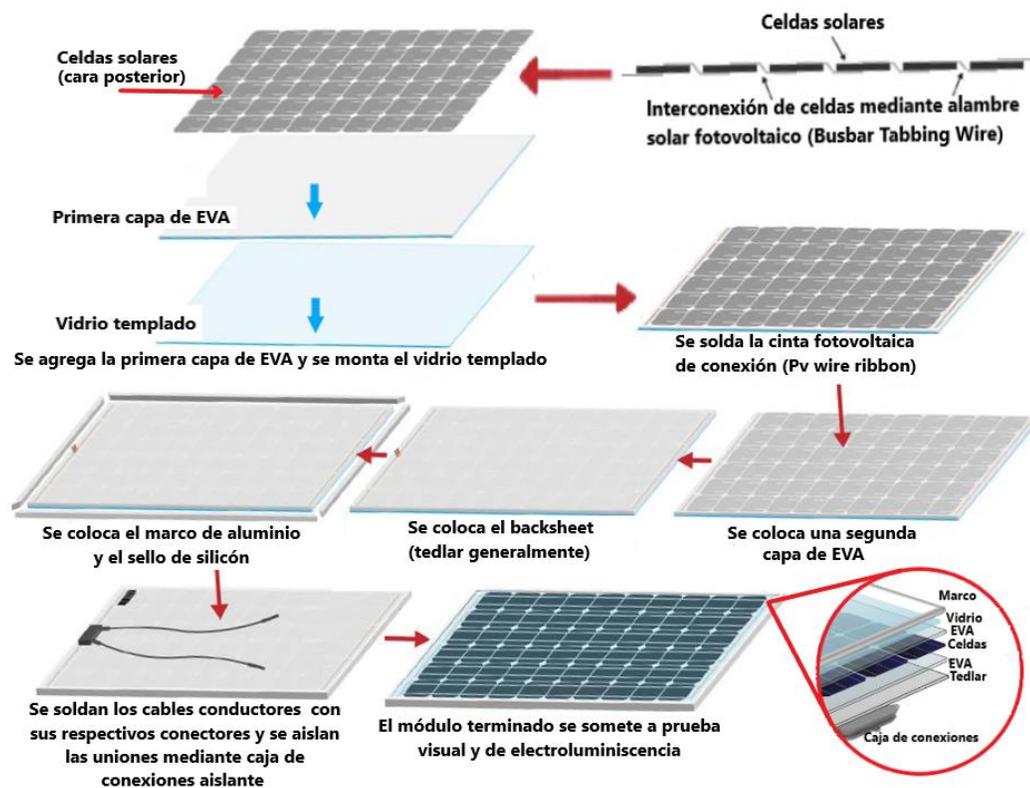


Figura 23.- Se muestra el proceso de ensamblaje del MFV estándar de Si cristalino (NREL, 2018, revisión 2020).

La Figura 23 muestra el flujo de proceso representativo que se lleva a cabo durante el ensamblaje de los MFV de Si cristalino, sin embargo, algunas empresas ofertan MFV de Si-mono y Si-poli con algunas variantes: sin cintas colectoras, modelos integrados por 60, 72, 96 y 144 celdas; también MFV de media celda, modelos que usan celdas bifaciales, MFV sin marco y ensamblajes con doble vidrio sin lámina posterior, entre otras opciones.

Cada modelo de MFV cuenta con características únicas que lo definen, tanto eléctricas (tipo y número de celdas que lo componen) como físicas (área, grosor, peso, etc.). Al dimensionar sistemas fotovoltaicos, se debe seleccionar el MFV que mejor se acople a las necesidades del usuario en base a los parámetros eléctricos de cada MFV.

Por norma, todo MFV debe tener una placa en la parte posterior que indique sus parámetros eléctricos y algunas características de seguridad y certificación de forma clara e indeleble. Es obligación del fabricante dar a conocer esta información y mantenerla de carácter público para el usuario en todo momento. Según la norma IEC 61730-1, los datos a considerar en dicha placa son los siguientes:

- Nombre comercial registrado o marca registrada del fabricante
- Tipo o número de modelo
- Número de serie
- Fecha y lugar de fabricación
- Polaridad de las terminales o los cables
- "Tensión máxima del sistema" o " V_{sys} "
- "Voltaje en circuito abierto" o " V_{oc} ", incluidas las tolerancias de fabricación
- "Corriente en cortocircuito"; o " I_{sc} ", incluidas las tolerancias de fabricación
- "Potencia máxima del MFV" o " P_{max} ", incluidas las tolerancias
- "Grados de protección contra sobre corriente máxima y descargas eléctricas"
- Certificaciones oficiales: logotipo del organismo que ha certificado la veracidad de los datos y cumplimiento de la norma correspondiente

La Figura 24 muestra fotografías de las placas de datos eléctricos de dos MFV de Si cristalino disponibles en el mercado mexicano actual.



Figura 24.- Se muestran imágenes de las placas de datos de dos MFV reales disponibles en el mercado mexicano comercial actual.

La oferta comercial de MFV incluye modelos de 36, 54, 60, 72, 96, 144 celdas conectadas en serie. Los que tienen mayor comercialización son los monofaciales de 60 y 72 celdas, mostrándose cada vez más una tendencia de mayor fabricación con los de 72 celdas por su mayor potencia de

generación y manejabilidad en sus dimensiones. Ya que las celdas solares de Si cristalino más populares se comercializa con dimensiones de 156 mm por 156 mm, el tamaño típico para un MFV de 60 celdas es de 1.0 m x 1.65 m, mientras que para uno de 72 celdas es de 1.0 m x 2.0 m.

II.4 Oferta comercial de MFV manufacturados en México

Dentro de la oferta comercial de MFV de Si cristalino en el mercado FV mexicano actual, se pueden encontrar alrededor de 10 empresas (ver Tabla 2) fabricantes de MFV integrados por un número de celdas que va desde 28 hasta 144 unidades conectadas en serie.

Tabla 2.- Se listan las empresas mexicanas productoras de MFV más populares.

Fabricantes	Ubicación	Inicio de operaciones	Capacidad anual (MW)
ERDM SOLAR	Tuxtla, Veracruz	2007	200
IUSASOL	Jocotitlán, Estado de México	2013	500
SAECSA	Cuatlancingo, Puebla	1995	-
SAYA ENERGY	Aguascalientes, Aguascalientes	2006	100
SOLAREVER	Hidalgo	2012	-
SOLARSOL	Mérida, Yucatán	2014	20
SOLARVATIO	Oaxaca, Oaxaca	2013	5
SYDEMEX SOLAR	Colima, Colima	2010	-
XTENDER SOLAR	Tijuana, Baja California	2019	75

Tabla 3.- Se muestran los valores típicos (rangos) de parámetros eléctricos y dimensiones para cada tipo de MFV, en base al número de celdas que lo integran, ofertados en el mercado FV mexicano actual y manufacturados por fabricantes nacionales.

Tecnología de Silicio Policristalino								
Tipo de módulo por número de celdas	Superficie (m ²)	Peso (kg)	Rango de parámetros eléctricos ofertados					
			P _p (W)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _m (V)	I _m (A)	η (%)
28	0.784	8	140	18.43	9.75	15.68	8.832	17.85
36	.48-1.02	5.86-11.84	65-180	21.61-23.692	3.8-9.7	16.85-20.38	3.6-8.8	14-18.9
48	0.715	8.85	100	22.5	6.61	17.4	5.65	18.93
54	1.46	18	275	34.2	10.16	30.16	9.12	18.78
60	1.6	18-23.7	130-305	20.2-39.9	8.48-10.16	15.7-33.45	8.07	7.9-19.5
72	1.9	20-25	240-340	43-51	7.67-10.16	33.6-40.45	7.14-9.12	12.3-18.8
Tecnología de Silicio Monocristalino								
Tipo de módulo por número de celdas	Superficie (m ²)	Peso (kg)	Rango de parámetros eléctricos ofertados					
			P _p (W)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	V _m (V)	I _m (A)	η (%)
28	0.784	8	165	19.83	10.36	16.7	9.88	21.04
36	1	10.0-13.0	170-210	23.46-32.12	8.98-10.36	18-21.35	8.48-9.88	16.6-21.12
48	0.715	8.85	100-110	29.6	4.35	23.53-24.53	4.12	13.9-15.3
54	1.46	17-18	270-315	38.25-38.34	8.91-13.36	31.88-32.02	8.45-9.88	18.4-21.51
60	1.6	18-20.5	200-350	36.6-42.6	8-10.35	28.8-35.58	6.95-9.88	14.7-21.38
72	1.2-1.9	15.5-28	160-400	43.8-52.14	5-10.36	34.4-43.55	4.64-9.88	14.9-21.97
96	1.68	20	235	58.1	5.4	46.6	5.04	14
144 (celda recortada)	1.98	23	380	48.9	9.75	40.5	9.39	19.16

Se recopilaron 169 fichas técnicas de los modelos de MFV ofertados por los fabricantes mexicanos, tanto de Si-mono como de Si-poli, en la Tabla 3 se muestra una recopilación de las características físicas y eléctricas consultadas de todas las fichas técnicas encontradas (Revisar Anexo 1).

II.5 El arreglo fotovoltaico

Los MFV pueden interconectarse entre, para incrementar la potencia generada, siempre y cuando tengan características eléctricas semejantes. Las conexiones entre MFV pueden ser en serie o en paralelo, e independientemente de la manera en que se conecten, el MFV, la conexión en serie, la conexión en paralelo, o la combinación en serie-paralelo, reciben el nombre indistintamente de Generadores Fotovoltaicos (GFV) o Arreglos Fotovoltaicos (AFV).

II.5.1 Conexión en serie de MFV

La conexión de varios MFV en serie, con las mismas características eléctricas, tiene como resultado un nuevo AFV que produce un voltaje de salida igual a la suma de los voltajes de los MFV conectados en serie y una corriente igual al valor de la corriente que genera cada uno de ellos en la serie. A la conexión en serie de MFV se le llama Cadena Fotovoltaica (CFV) o panel. Dado que los MFV se proveen de conductores o cables de salida con conectores terminales polarizados, si estos se instalan mecánicamente de forma adecuada, la conexión en serie entre ellos no requiere material adicional conductor (cables) para realizar dicha conexión. Sin embargo, para llevar la electricidad desde las terminales de salida de la conexión en serie hacia el punto de acoplamiento con acondicionadores de energía o cargas eléctricas se requerirá de conductores extensión con sus respectivos conectores polarizados (ver Figura 25).

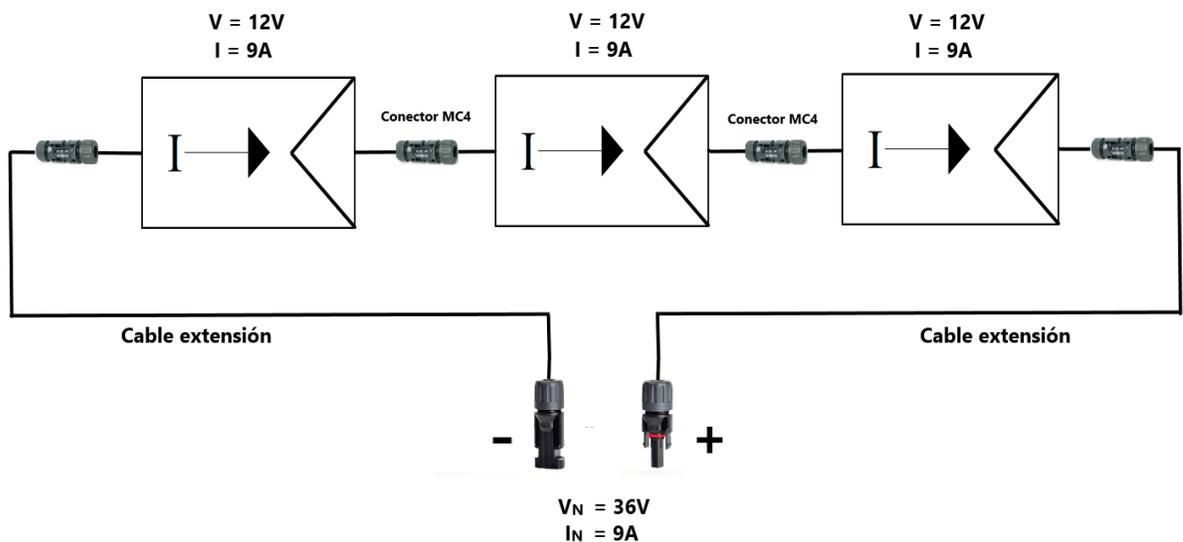


Figura 25.- Se muestra un ejemplo de 3 MFV, con características eléctricas idénticas, conectados en serie para incrementar el voltaje de salida. Nótese que la corriente sigue siendo la misma que la de uno solo de los MFV interconectados.

La conexión serie entre MFV se requiere cuando la carga eléctrica que se va a alimentar necesita una tensión superior a aquella que genera un solo MFV, por lo cual, el voltaje de salida de la combinación serie debe ser igual al voltaje que requiere la carga eléctrica.

II.5.2 Conexión en paralelo de módulos FV

Cuando se conectan varios MFV en paralelo con las mismas características eléctricas, se obtiene un nuevo AFV cuyo voltaje de salida tiene un valor igual al voltaje de salida de cada MFV y una corriente de salida igual a la suma de cada una de las corrientes de los MFV conectados en paralelo. La conexión en paralelo, tanto en la terminal positiva como negativa, debe realizarse en un bus metálico diseñado para tal propósito, por lo que, cada MFV que se conecte en paralelo en el bus metálico debe de tener un cable conductor extensión con conector cuya longitud dependerá de la distancia de la terminal de salida de cada MFV hacia el bus metálico (Ver Figura 26).

La conexión en paralelo entre MFVs se requiere cuando la carga eléctrica que se va a alimentar necesita más corriente que aquella que puede suministrar un solo MFV. La cantidad de MFV a conectarse en paralelo dependerá de la magnitud de la corriente que genera cada uno de ellos talque la suma total de la corriente para la combinación en paralelo sea aquella que requiera la carga eléctrica.

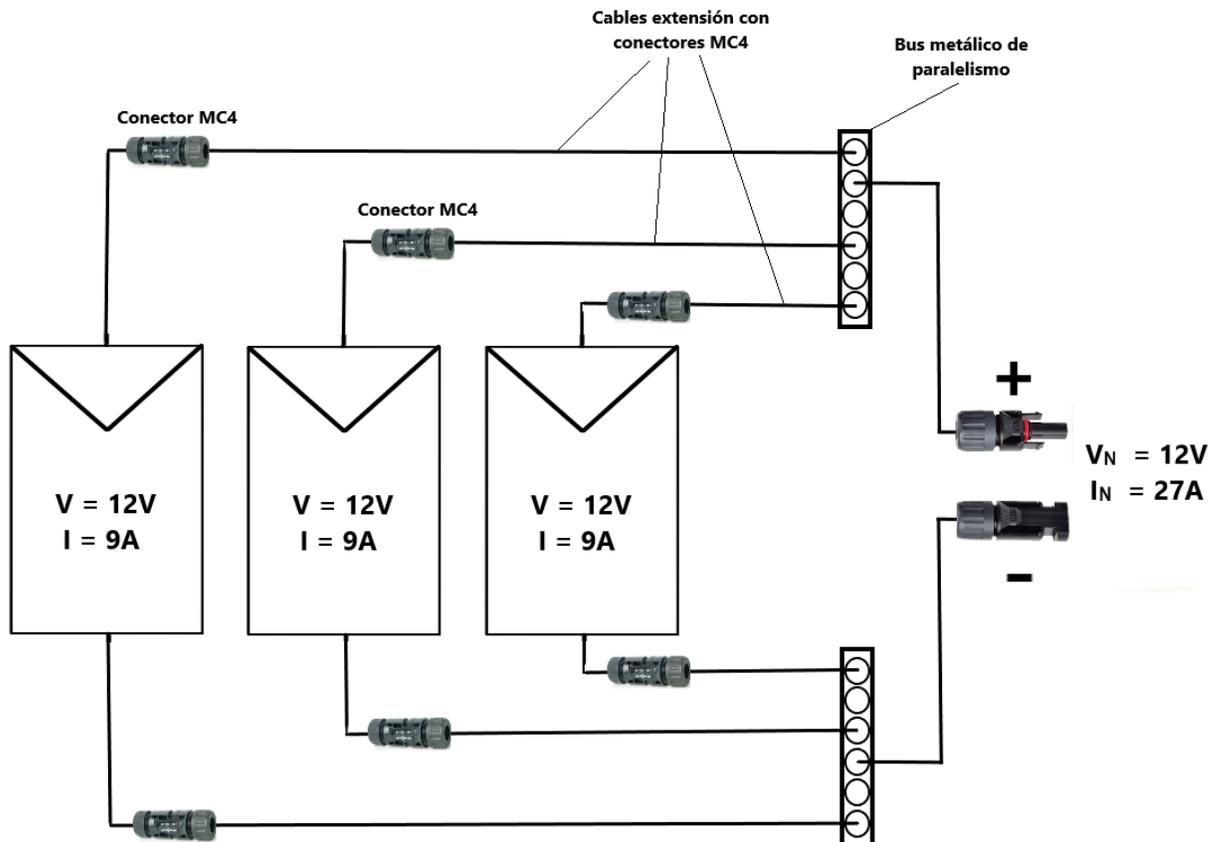


Figura 26.- Se muestran dos MFV conectados en paralelo para aumentar el valor de su corriente, nótese que, hay un diodo antirretorno conectado después de cada módulo para evitar que un MFV le mande corriente al otro (corrientes de retorno).

II.5.3 Conexión serie-paralelo

Cuando una carga eléctrica requiere determinada potencia, es decir, un voltaje y corriente de operación, y el MFV genera una potencia (voltaje y corriente) inferior a la que requiere la carga eléctrica, entonces para que dicha carga pueda ser alimentada es necesario conectar MFV en serie para que generen el voltaje de alimentación y conectar estas CFV en paralelo, tantas como se requieran, para generar la corriente de alimentación para la carga eléctrica. La Figura 27 muestra una combinación serie y paralelo de MFV con idénticas características eléctricas.

El siguiente arreglo serie-paralelo está constituido por 6 MFV en un arreglo de 3 cadenas en paralelo formadas, cada una, por 2 MFV en serie, se puede expresar como: 2Sx3P. nótese que los conductores eléctricos provenientes de cada cadena deben ser unidos a través de una barra conductora especializada (bus de paralelismo) y no mediante empalmes entre los cables.

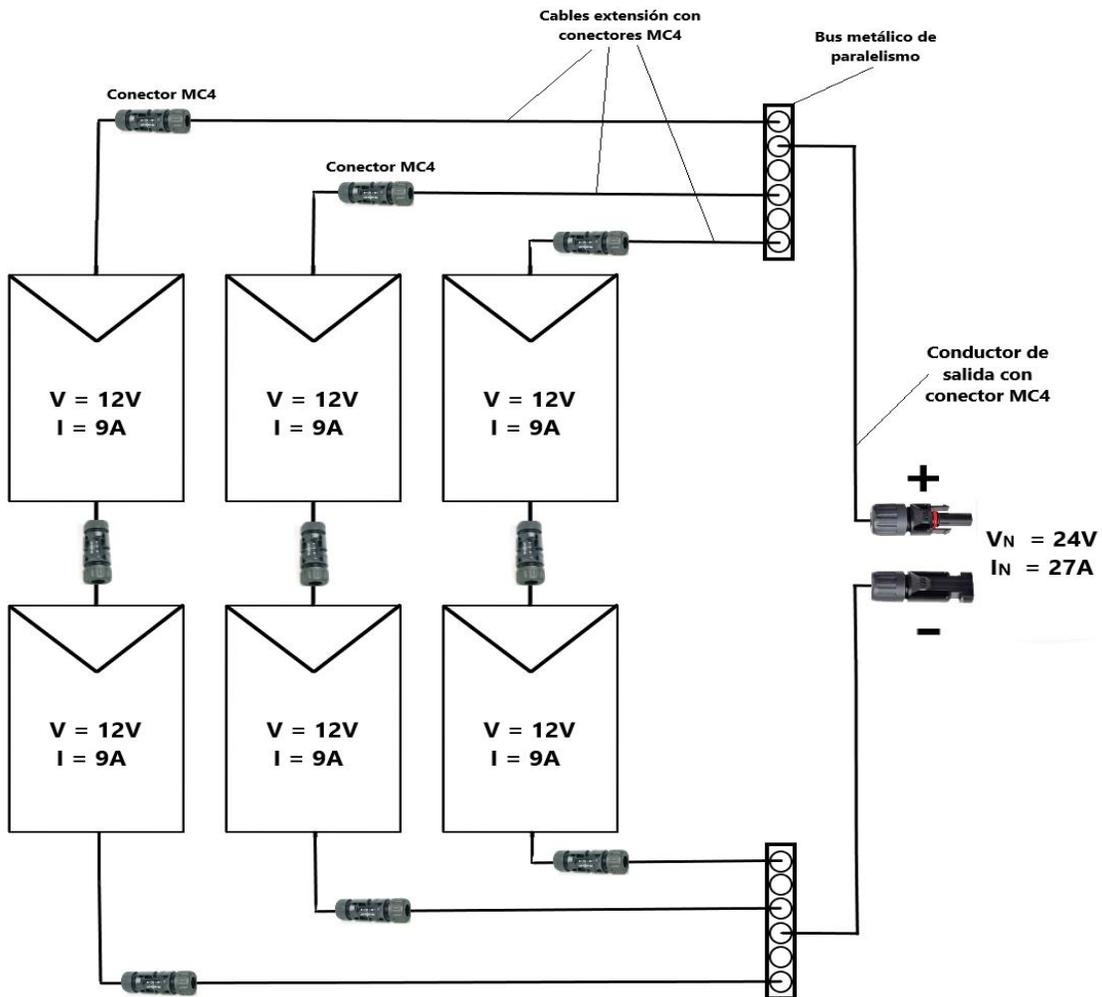


Figura 27.- Se muestra un arreglo de varios MFV interconectados en serie-paralelo. Nótese que el valor de la corriente y el voltaje, aumentan de forma simultánea.

II.6 El sistema fotovoltaico

Los MFV pueden aplicarse o usarse de forma individual o mediante AFV en serie, paralelo o ambos, para todo tipo de proyectos donde se requiera de una fuente de energía eléctrica confiable desde el punto de vista de estabilidad en la tensión y despachable desde el punto de vista de disponibilidad; y para esto, considerando que la electricidad FV es del tipo CD, y solo se produce durante las horas sol, es necesario que el BOS tenga la capacidad de controlar la energía generada por el AFV, almacenarla, acondicionarla y distribuirla hacia las cargas eléctricas. La integración del GFV junto con el BOS y las cargas eléctricas forman el SFV. La Figura 28 muestra una representación esquemática de la manera en que se constituye un SFV.



Figura 28.- Se muestra un diagrama esquemático de un SFV (Sánchez Juárez, Martínez, de la Luz Magdalena, Ortega Cruz, & Sánchez Pérez, 2017).

Los SFV tienen una amplia gama de aplicaciones en todos los sectores de la sociedad, tanto en el ámbito rural como en el ámbito urbano, de hecho, el uso de esta tecnología solo está limitada por la imaginación del diseñador y las necesidades del mismo usuario.

II.7 Partes y componentes del SFV

Esencialmente, el SFV puede dividirse en cuatro partes fundamentales: 1) El GFV (módulos conectados en serie y paralelo); 2) El BOS, que incluye, según la aplicación, el sistema de almacenamiento de energía, controladores de carga, inversores de corriente alterna a corriente directa; 3) Estructuras y canalizaciones, que toma en cuenta a las estructuras de aluminio, tornillería y demás requerimientos de soporte; 4) Parte eléctrica, la cual involucra los conductores, las cajas de conexión, las protecciones eléctricas y las canalizaciones; 5) Obra civil, la cual, hace referencia a las modificaciones que requiere el terreno para montar el sistema, tales como, mojoneras, zapatas, anclajes y barrenos, entre otras. En la Figura 29 se pueden apreciar los materiales necesarios para la instalación de un SFV de interconexión genérico, considerando las primeras 4 partes antes mencionadas. A lo largo del capítulo VI, se presentará una cuantificación de los materiales requeridos para un SFV hipotético de 1.0 kW de potencia pico.



Figura 29.- Se muestran, a grandes rasgos, las partes que integran un SFV genérico. Nótese que, el GFV y el BOS están considerados en el primer grupo (Equipo fotovoltaico y acondicionadores de potencia)

II.8 Conclusión de capítulo

En las secciones anteriores se ha presentado información general respecto de la TSFV y sus aplicaciones que permiten identificar y tener estimaciones de los materiales que forman parte de la cadena de fabricación, tanto en la obtención de la celda solar como del MFV, procesos considerados como estratégicos para la sustentabilidad de la ISFV.

Los datos anteriores muestran que no hay impedimento tecnológico para procesar polisilicio grado solar, elaborar obleas de Si tipo P y elaborar celdas solares de Si-mono o Si-poli. La decisión económica para invertir en estos tres tipos de procesamientos o fábricas está siendo limitada por el propio mercado, sin embargo, dadas las expectativas de crecimiento de la demanda de TSFV sugieren una oportunidad de inversión única que no debería dejarse a un lado.

Dado que en México no se refina el Si cristalino ni se fabrican celdas solares de este material, y tampoco se fabrican los elementos o partes que integran el MFV, no por una cuestión técnica si no por falta de una visión de negocio a futuro, los datos vertidos en este capítulo proporcionan información sobre el tipo de material y cantidad por unidad de potencia para la fabricación de celdas de Si cristalino, así como para su integración en un MFV. Con esta información se pretende despertar el interés de inversionistas para el nicho de mercado FV e incentivar, a la industria mexicana, para que invierta en procesos que produzcan cualquiera de las partes y componentes necesarias para la integración del MFV y el SFV, fortaleciendo así la sustentabilidad futura para la ISFV mexicana.

III Mercado potencial mexicano y la cadena de fabricación de la TSFV

III.1 Introducción

El nicho de oportunidad de la TSFV es muy amplio, puede ser empleada en aplicaciones para zonas rurales, urbanas, apartadas o aisladas de la red eléctrica pública; de hecho, los SFV pueden ser empleados en prácticamente todas las aplicaciones donde se requiera el uso de la electricidad. Esta utilidad y versatilidad han provocado una caída en el precio promedio mundial de la TSF, repercutiendo en un auge de adición en la CIFV global total durante la última década, alcanzando una adición anual consecutiva de más de 100 GW durante los últimos 3 años (IEA, 2019).

Aunado a esto, la integración de la TSFV como un sistema energético requiere de un conjunto de equipos, partes y componentes que conforman al BOS. Como consecuencia es importante identificar la *CADENA DE FABRICACIÓN* asociada a la conformación de los SFV, ya sea para generación distribuida o para las grandes plantas de generación de potencia eléctrica FV.

En este capítulo se provee de información general relacionada con el mercado FV nacional e internacional y la cadena de fabricación asociada a él.

III.2 Desarrollo del mercado fotovoltaico internacional

Anterior al año 2000, la mayor parte de las instalaciones FV abarcaban dos nichos de mercado: SFV de baja potencia instalados en el ámbito rural y pequeñas PSFV demostrativas interconectadas a las RGD Eléctrica con capacidades no mayores a 500 kW. Gracias al desarrollo de la electrónica aplicada a los acondicionadores de energía, que hizo factible la interconexión de sistemas de generación de potencia eléctrica al SEN de manera segura y confiable, el nicho de aplicación de los SFV en el ámbito urbano se fortaleció de tal manera que su demanda creció casi de manera exponencial. Así mismo, la aplicación de dichos SFV para la generación de grandes potencias comenzó a ser atractivo desde el punto de vista económico, derivado de una reducción en el costo y una gran oferta comercial de TSFV.

Como resultado de lo anterior se ha observado desde el año 2000 un crecimiento casi exponencial en la CIFV a nivel mundial. La Figura 30 muestra el crecimiento de la CIFV observándose la tendencia antes mencionada.

Al cierre del 2018 la CIFV acumulada en el mundo alcanzó los 505 GW y los 627 GW para el final del 2019 (IEA, 2019), representando una inversión mundial, considerando fuentes gubernamentales y privadas, de 139.7 billones de dólares durante 2018 (REN 21, 2020) y 141 billones de dólares durante 2019 (REN 21, 2020) con tendencias de incrementarse durante los próximos años. Cabe remarcar que, durante 2018, México se posicionó entre los 10 países con la mayor aportación a la CIFV mundial (ver Figura 31) con una participación de 2.7 GW (IEA, 2019), sumando 3.4 GW de CIFV acumulada en territorio nacional. Posteriormente en 2019, se posicionó en el tercer puesto de toda América con una adición de casi 1.0 GW (REN 21, 2020) de potencia instalada, siendo superado únicamente por USA (13.3 GW) y por Brasil (2.0 GW) (IEA, 2019).

El dato anterior significó que, durante los últimos 2 años (2018 y 2019), en México se han instalado 4.7 GW de potencia pico con producto fotovoltaico importado, lo que induce a pensar que en nuestro país hay un mercado potencial muy grande para la tecnología fotovoltaica. Dado que el mercado potencial fotovoltaico, tanto nacional como internacional, sigue con una tendencia de crecimiento derivado tanto de factores económicos como de factores ambientales, la producción de MFV tiene que ser sostenida e incrementada, y como consecuencia, muchos países dependerán tecnológicamente de aquellos que fabriquen y suministren materiales e insumos para la ISFV.

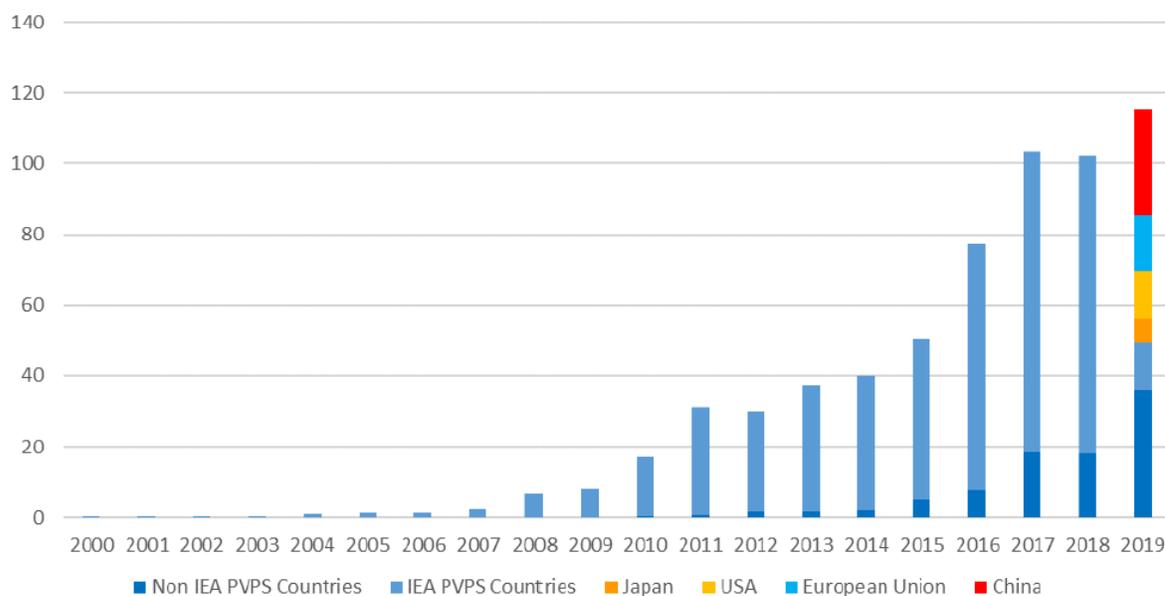


Figura 30.- Se muestra la evolución anual de la CIFV a nivel mundial en GW por año (IEA, 2019).

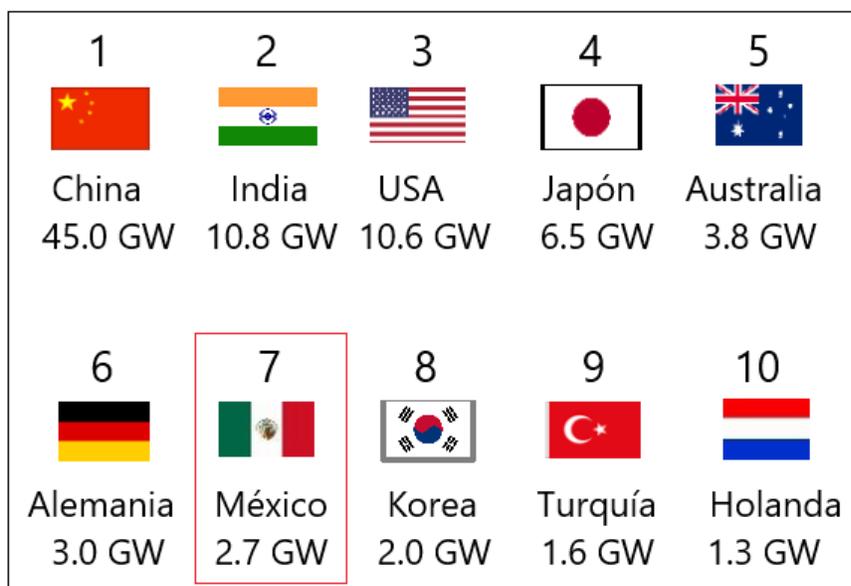


Figura 31.- Se aprecian los diez países con las mayores adiciones de CIFV a nivel mundial durante 2018. Elaborado con datos del documento Snapshot of Global PV Markets (IEA, 2019).

III.3 Participación de la tecnología de Si cristalino en el mercado solar FV mundial

De toda la CIFV añadida durante el año 2018, la tecnología FV que predominó ha sido la basada en Si. Como se puede apreciar en la Figura 32, durante dicho año se produjeron alrededor de 103.0 GWp de MFV en todo el planeta, de los cuales, la mayor parte fue producida con tecnología de Si cristalino.

Debido a la alta disponibilidad y relativo bajo precio de producción, siempre ha existido un predominio en el mercado por parte de la TSFV a base de Si cristalino. La Figura 33, muestra la evolución en las últimas 4 décadas, de la participación de dicha tecnología en la producción mundial, en la cual, se puede apreciar que, para finales del 2017, la tecnología de Si cristalino alcanzó una participación del 93 % del total producido (Philips & Warmuth, May, 2020).

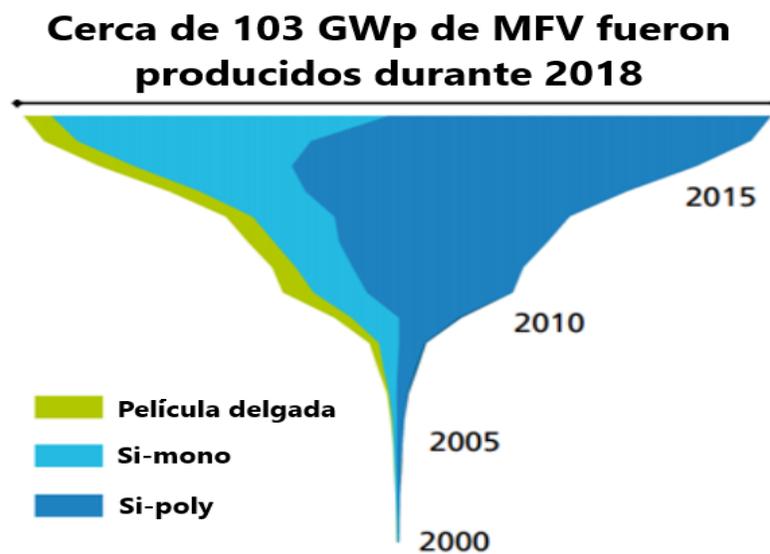


Figura 32.- Se muestra la producción total por tipo de tecnología, de MFV durante el año 2018 y el predominio del Si cristalino sobre las tecnologías de película delgada (Philips & Warmuth, May, 2020).

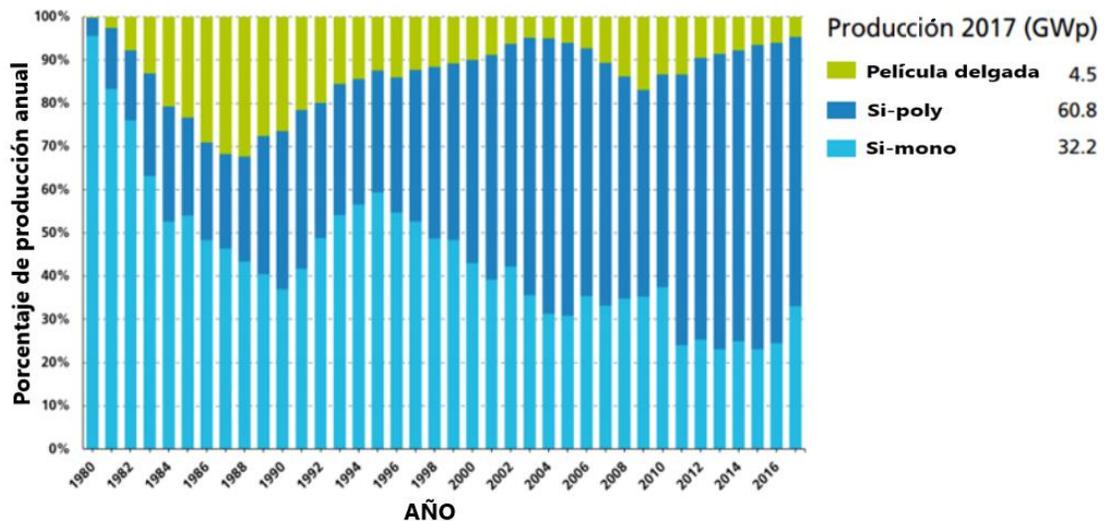


Figura 33.- Se muestra la producción mundial de MFV con tecnología a base de Si cristalino hasta el año 2017 y una comparación con las tecnologías de película delgada (Philips & Warmuth, May, 2020).

Este auge en la producción y el uso de SFV a base de Si cristalino provocó que durante el 2019 , el precio promedio mundial de esta tecnología cayera drásticamente, alcanzando los 0.21 usd\$/W y 0.24 usd\$/W pico para Si-poli y Si-mono respetivamente permitiendo, para el caso de la TSFV, que el precio de los SFV domésticos de interconexión haya alcanzado un valor promedio mundial muy accesible, llegando en 2019 a un precio de venta aproximado de usd\$1.40/W instalado² proyecto “llave en mano” , posicionando a los SFV de generación distribuida como una opción viable, tanto económica como energéticamente, para fortalecer el sistema eléctrico de cada país.

III.4 El desarrollo del sector fotovoltaico en México

El desarrollo del SEN mediante la integración de SFV en México ha sido lento en comparación con otros países, sin embargo, la implementación de la TSFV en la matriz energética nacional es un compromiso que nunca se ha dejado de lado. A continuación se describen brevemente algunos de los acontecimientos más importantes referentes a la TSFV en México consultados, en su mayoría, del libro titulado: “Aplicaciones Fotovoltaicas de la Energía Solar” (Sánchez Juárez, Martínez, de la Luz Magdalena, Ortega Cruz, & Sánchez Pérez, 2017).

En un principio el uso de los SFV en México se limitaba al sector rural debido a la falta de cobertura del SEN. Entre los años 1988 y 1994 se desarrolla el primer programa social masivo llamado PRONASOL (Programa Nacional de Solidaridad) para la electrificación rural mediante TSFV impulsado por el Gobierno Federal, lográndose la instalación de aproximadamente 1.4 MW de CIFV en territorio nacional. Durante ese mismo periodo de tiempo, Telmex instalo alrededor de 1.3 MW de CIFV mediante su programa de telefonía rural.

La CIFV acumulada desde el año 1980 hasta el año 1992 fue de 3.7 MW. Posteriormente entre los años 1994 y 1999, se instalaron con éxito 195 SFV de bombeo, resultado de los esfuerzos conjuntos entre la entidad gubernamental FIRCO (Fideicomiso de Registro Compartido) en colaboración con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA), los laboratorios SANDIA y el Departamento de Energía de USA.

Tras el éxito del programa anterior, FIRCO solicitó al banco mundial, que se le concediera un donativo procedente del Fondo Mundial del Medio Ambiente, para seguir impulsando las experiencias en materia FV. Como resultado, se crea el programa PERA (Proyecto de Energía Renovable para la Agricultura), el cual consistía en cursos, eventos y capacitaciones de técnicos y funcionarios de los Gobiernos Estatales, de SAGARPA, FIRCO y empresas prestadoras de servicios y productores con el fin de minimizar el desconocimiento sobre la ESFV. Como resultado se obtuvieron: más de 1,900 SFV de bombeo instalados con éxito, 40 técnicos de FIRCO fueron capacitados como instructores en el desarrollo de proyectos FV y, por último, se capacitaron más de 1,500 técnicos de diferentes instituciones gubernamentales, proveedores, estudiantes y usuarios.

² El precio por Watt varía tanto de las cadenas de proveedurías como del tipo de instalación mecánica y puede ser tan económico como 1.0 USD/W_{instalado} hasta tan caro como 3.0 USD/W_{instalado} para sistemas interconectados a la red. Información provista por A. Sánchez Juárez (datos obtenidos mediante cotizaciones).

Posteriormente, a finales de la década de los 90, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) establece alianzas con CFE y la extinta Luz y Fuerza para estudiar el comportamiento de sistemas interconectados a la red eléctrica para aplicaciones residenciales de baja potencia.

El comienzo del Siglo XXI trajo nuevos horizontes para la ESFV, en 2004, se emitió un apartado en la ley del impuesto sobre la renta que fomenta el uso de equipo y maquinaria relacionados con las FER. Con este apartado, las personas morales pueden deducir de impuestos el 100 % del costo de un SFV. En el 2005 se instala el primer SFV interconectado a la red contando con una potencia pico de 30 kW, para alimentar un restaurante vegetariano llamado The Green Corner.

En 2007 la Comisión Reguladora de Energía (CRE) emite el modelo de contrato de interconexión a la red eléctrica pública, bajo el esquema de medición neta para SFV menores a los 30 kW de potencia pico. En el 2007, el IIE recibe financiamiento por parte del Programa para el Desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP por sus siglas en inglés: United Nations Development Programme) y del Global Environment Facility (GEF) mediante el programa de Estrategias para la Mitigación del Cambio Climático para desarrollar el proyecto titulado: “Small grid connected photovoltaic systems”, el cual tenía como principal objetivo facilitar la introducción a gran escala de los SFV interconectados a la red dentro del territorio nacional.

En 2008 el Gobierno Federal emite el contrato de interconexión a la red para SFV de mediana escala con capacidades de hasta 500 kW. En 2008 se publica en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Ley para el Aprovechamiento de las FER y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE). Durante el mismo año se publica la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de Energía (LASE). En el 2008 se desarrolla el Proyecto de Desarrollo Rural Sustentable (PDRS) por parte de FIRCO, el cual proporcionó apoyos económicos a los productores para la implementación de tecnologías que fomenten la protección del medio ambiente.

Uno de los eventos que marcaron una pauta en el desarrollo de la TSFV en México, fue el establecimiento de las Reglas Generales de Interconexión al SEN para generadores o permisionarios con FER o Cogeneración Eficiente durante el 2012.

En 2016 se lleva a cabo la primera subasta eléctrica en México logrando acuerdos para la instalación de 1.69 GW de ESFV dentro de territorio nacional y dejando un precedente para los dos años siguientes (2017 y 2018).

Capacidad contratada	Primera subasta	Segunda subasta	Tercera subasta
Solar	1,691 MW	1,853 MW	1,323 MW
Eólica	394 MW	1,283 MW	689 MW
Geotermia		25 MW	
Gas			550 MW
Precio promedio (USD por MWh)	41.8	33.47	20.57

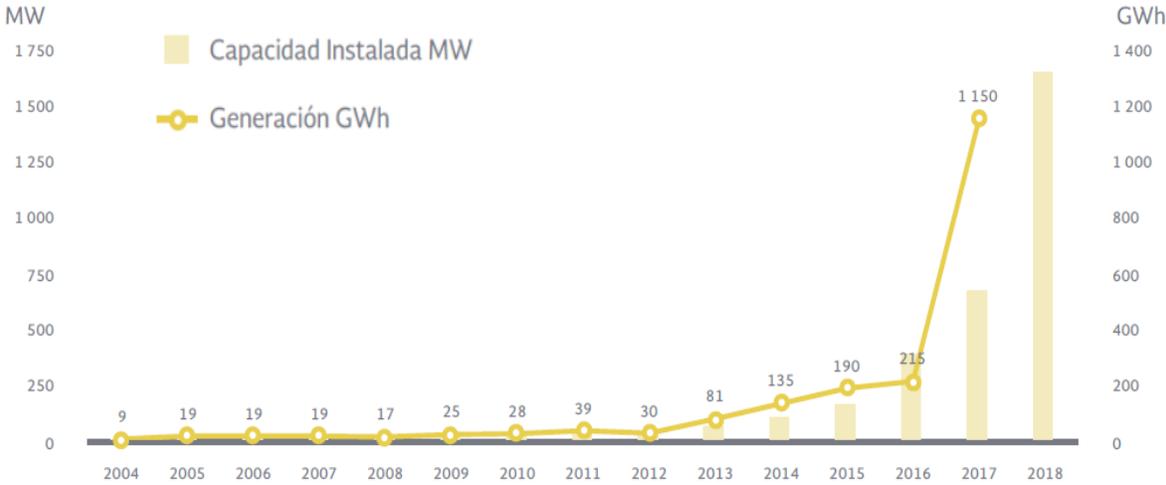
Tabla 4.- Se muestran las potencias acordadas para la puesta en marcha de proyectos de ESFV durante las tres subastas eléctricas que tuvieron lugar en México entre los años 2016 y 2018 (SENER, 2018).

Cabe remarcar que, estas subastas permitieron que, durante 2018, México se posicionara entre los 10 países con mayores adiciones de CIFV de ese año, instalando 2.7 GW, logrando que la generación eléctrica por FER y fuentes limpias alcanzara 24.12%, menos de un punto porcentual por debajo de la meta planteada del 25 % para la generación de energía limpia que se estableció para ese año. Actualmente las subastas se encuentran suspendidas, pero, durante las 3 que se llevaron a cabo, se acordaron proyectos de ESFV (ver Tabla 4) por más de 4.8 GW.

Un año más tarde, para el cierre de 2019, nuestro país alcanzó una adición de CIFV de 2.0 GW (REN 21, 2020) y se posicionó entre los tres países con mayor adición de toda América, superado únicamente por USA (13.3 GW) y por Brasil (2.0 GW) (IEA, 2019).

III.4.1 Evolución de la CIFV mexicana

Como se puede ver en esta pequeña recopilación de datos históricos referentes a la ESFV en México, la implementación de la TSFV dentro de territorio nacional no ha sido tan rápida en comparación con otros países, hasta antes del 2017, el aprovechamiento de la energía solar para generar energía eléctrica era particularmente bajo (ver Gráfica 2) y, no fue hasta el 2018 que la ESFV dio un gran salto, pasando de 0.7 GW a 3.4 GW de potencia instalada, resultado de los proyectos acordados gracias a la implementación de las subastas de energía por parte del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM).

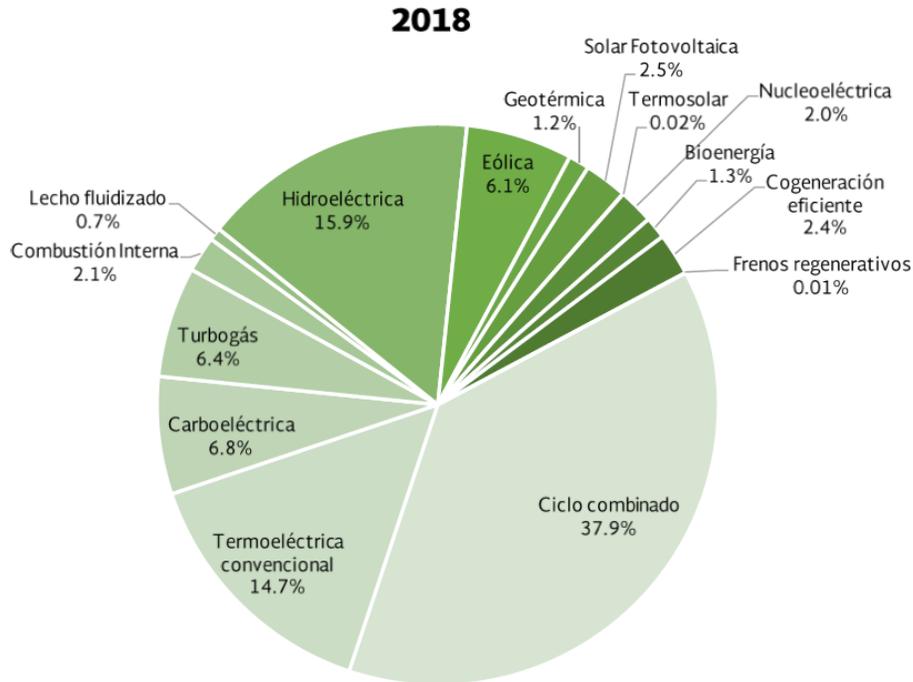


* Incluye Generación Distribuida

Gráfica 2.- Se muestra la evolución histórica de la CIFV en el país entre los años 2004 y 2018 (SENER, 2018).

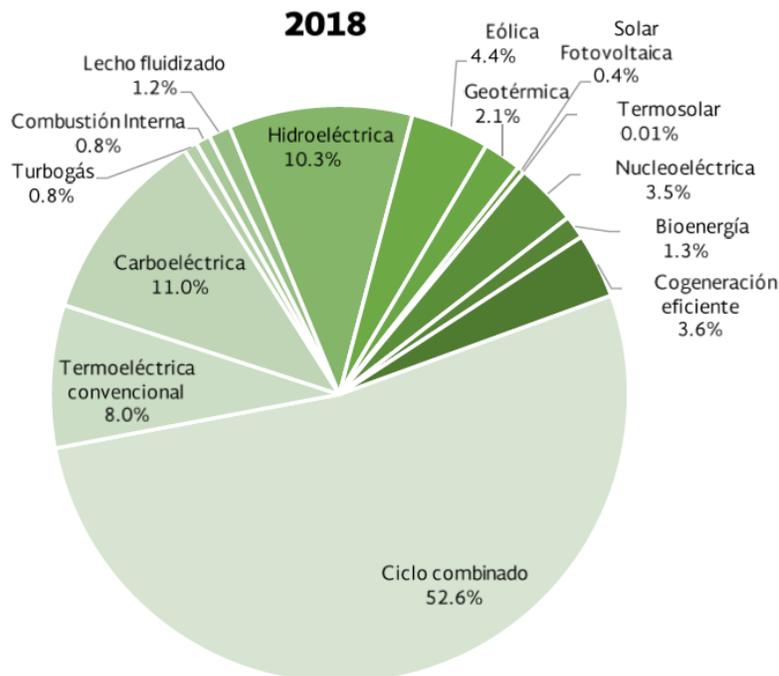
III.5 El mercado potencial mexicano

La matriz energética que conforma el SEN mexicano sigue predominada por las tecnologías fósiles (ver Gráfica 3). Al cierre del 2018, de toda la CIFV disponible al cierre del 2018 en el SEN (70,053 MW) (SENER, 2019), la capacidad instalada que representó la ESFV ascendió solo al 2.5 %.



Gráfica 3.- Se muestra la participación de las energías limpias en la capacidad instalada del SEN (SENER, 2018).

Según el último dato reportado por la SENER, al cierre del 2018, de toda la energía producida en México (317,278 GWh) (SENER, 2018), menos del 25 % fue con base en energías limpias, de las cuales únicamente el 0.4 % fue mediante TSFV (ver Gráfica 4), incrementándose a 3.9 % para finales de 2019 (IEA, 2019).



Gráfica 4.- Se muestra la participación de las diferentes fuentes de energía que integran la matriz energética del SEN, en la generación de electricidad durante el 2018 (SENER, 2018).

A pesar de que México cuenta con uno de los recursos solares más abundantes del planeta, la producción de electricidad a base de este recurso natural esta desaprovechada, sin embargo, nuestro país tiene el compromiso de implementar sistemas de generación eléctrica basándose en fuentes de energía limpia para lograr una participación en la matriz energética del: 30 % para el 2021, 35 % al 2024; 37.7 % al 2030 y 50 % al 2050. Según datos de la SENER, se espera que del 2018 al 2032, la participación de la ESFV pase de 2.5 % a 8.9 % en capacidad instalada y de 0.4 % a 4.1 % en generación de electricidad (SENER, 2018).

El aprovechamiento del recurso solar en México va en constante aumento y se lleva a cabo de dos maneras diferentes, tecnología solar térmica y TSFV. El aprovechamiento de la energía solar para generar electricidad a través de la TSFV puede dividirse en dos grandes rubros: proyectos de generación centralizada a gran escala, los cuales se desarrollan principalmente para suministrar los requerimientos de energía por parte de empresas de generación como la CFE, y por parte de grandes consumidores de energía privados; por otra parte, tenemos los SFV de pequeña y mediana escalas para generación distribuida, los cuales, están instalados lo más cerca posible del usuario para abastecer las necesidades de energía en sitio, y, regularmente, son interconectados a la SEN bajo los esquemas tarifarios correspondientes de regulación nacional: medición neta, medición neta con venta de excedentes y venta total (Rodríguez Suárez, y otros, 2017).

En el presente trabajo se pretende estudiar los requerimientos de material que se necesitan para aquellos SFV que cumplan con las especificaciones técnicas necesarias para ser interconectados al SEN bajo los esquemas de generación distribuida para lo cual, es necesario determinar cuál será el incremento de la CIFV para los próximos años. A continuación, se presenta la información correspondiente a las proyecciones del requerimiento FV en territorio nacional tanto en CIFV acumulada como en la capacidad adicionada año con año.

III.5.1 Evolución esperada de la CIFV en México

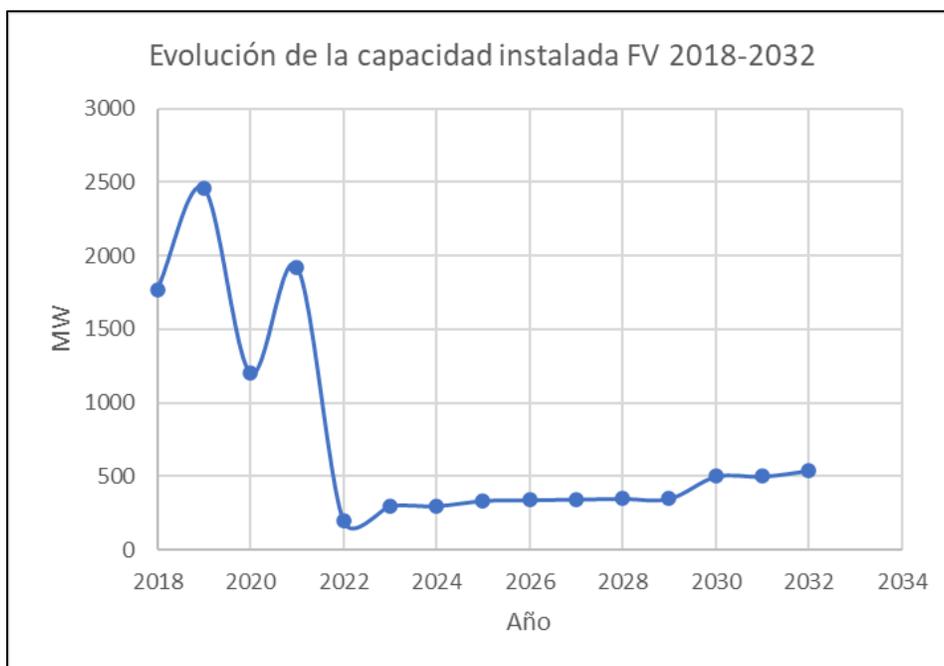
Según proyecciones gubernamentales, se espera que las adiciones a la CIFV se lleven a cabo en la cronología que se muestra en la Tabla 5 y Gráfica 5.

Tabla 5.- Se muestra la evolución esperada de la CIFV en México para los próximos años (SENER, 2018).

Año	CI-FV esperada (MW)	Adición en ese año (MW)
2018	1971	1767
2019	4426	2455
2020	5630	1204
2021	7555	1925
2022	7755	200
2023	8055	300
2024	8355	300
2025	8691	336
2026	9031	340
2027	9377	346
2028	9727	350
2029	10077	350
2030	10577	500
2031	11077	500
2032	11617	540

La proyección de SENER para la adición a la CIFV para el cierre de 2018 estimaba poco más de 1.7 GW instalados, sin embargo, la cifra final durante ese año fue de 2.7 GW, superando con creces las expectativas y posicionando a México entre los 10 países con la mayor adición de TSFV de ese año (IEA, 2019). Posteriormente, para el año 2019 se tenía proyectado que la adición de TSFV en México sería de 2.45 GW, no obstante, se instalaron alrededor de 2 GW (REN 21, 2020).

En la Gráfica 5 se puede apreciar que se espera un repunte en la adición a la CIFV durante el año 2021, alcanzando un valor de 1.9 GW y, a partir de esa fecha, se estima una adición promedio de aproximadamente 370 MW anuales durante la próxima década. Esta drástica disminución a las adiciones esperadas a la capacidad instalada, parece ser resultado de la cancelación de las subastas eléctricas a partir del 2019.

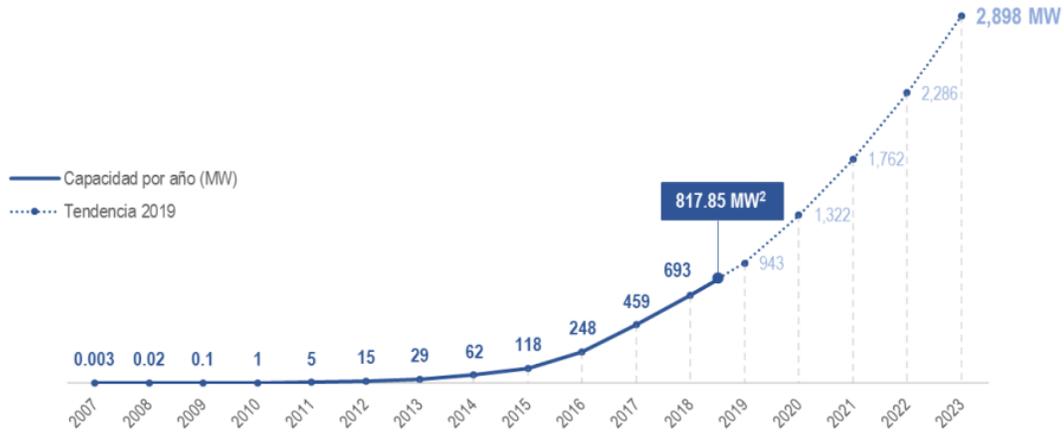


Gráfica 5.- Se presenta la evolución esperada de la CIFV según proyecciones gubernamentales (SENER, 2018).

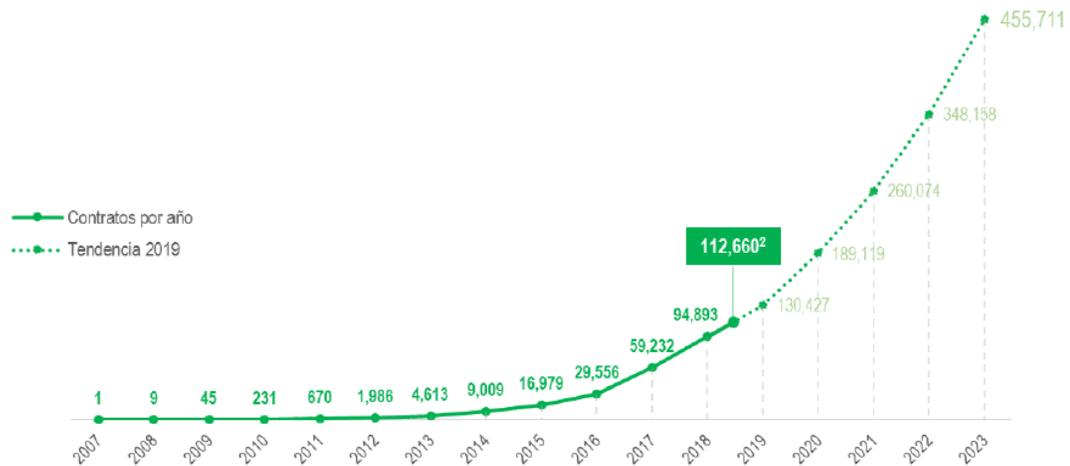
III.5.2 Generación distribuida

En el caso particular de la generación distribuida, los datos más recientes publicados por la CRE respecto de la evolución de la CIFV desde el 2007 y su proyección para los próximos 3 años, muestran que, para finales del 2018 se tenían registrados cerca de 95 mil contratos (ver Gráfica 7) con una CIFV aproximada de 693 MW (ver Gráfica 6).

La CIFV acumulada en generación distribuida que se espera para el cierre del año 2023 es de 2,898 MW, este incremento hace que el estudio de la cadena de fabricación de SFV interconectados sea de gran importancia para el sector energético de nuestro país. Es necesario cuantificar los insumos y materiales que se necesitarán para fabricar la potencia FV exigida por los usuarios, considerando que la manufactura y la proveeduría de todos los insumos y materiales sean de carácter nacional, sin depender, en la medida de lo posible, de componentes de origen extranjero.



Gráfica 6.- Se muestra la tendencia de crecimiento de la CIFV referente a la generación limpia distribuida en el país (CRE, 2019).



Gráfica 7.- Se muestra el incremento de los contratos de interconexión otorgados bajo el esquema de generación distribuida (CRE, 2019).

A continuación, se presentan las etapas que conforman la cadena de fabricación de los SFV de interconexión, y una cuantificación de los materiales requeridos en cada una de ellas.

III.6 La cadena de fabricación de los sistemas solares fotovoltaicos

El diccionario en línea “Oxford Spanish Dictionary”, define la palabra fabricación como: “Confección o elaboración de un producto a partir de la combinación de sus componentes o materias primas”. En el caso de los SFV, el término Cadena de Fabricación hace referencia a los insumos, procesos y productos involucrados en cada etapa de su ciclo de vida, desde la extracción de la materia prima, la construcción de las partes y componentes de la celda y el MFV, hasta la integración y puesta en marcha del SFV.

En la obtención de los SFV de interconexión, están involucrados múltiples componentes representativos, que destacan por la gran cantidad de materia prima requerida a lo largo de la cadena de fabricación del SFV, por ejemplo: el Si para la elaboración de lingotes, obleas, celdas y MFV; el cobre para los conductores eléctricos, el aluminio para los marcos y las bases de los MFV, el vidrio para el ensamble del MFV, etc. En este documento de tesis nos centraremos, únicamente, en el análisis de la ruta crítica³ del Si, cuyas etapas a considerar, se pueden apreciar en la Figura 34.

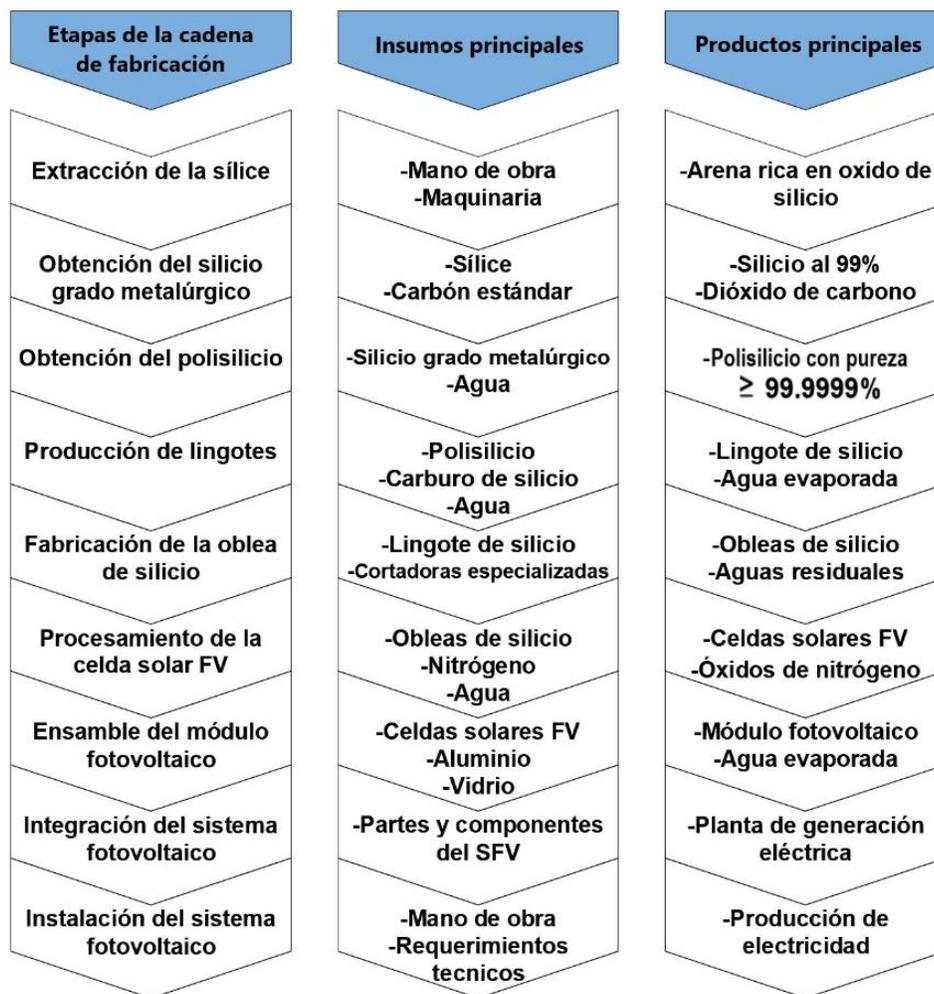


Figura 34.- Se muestran las etapas de la cadena de fabricación de los SFV en general, así como los principales insumos y productos en cada una de ellas.

No obstante, la cadena de fabricación de la ISFV involucra la participación de varios sectores de la sociedad y de múltiples empresas, resultando en un conjunto amplio de cadenas de fabricación individuales, las cuales, en conjunto, compondrán a la cadena de fabricación de la ISFV. En este sentido, tomando como referencia la Tabla 6, se pueden identificar los conceptos generales que componen la cadena de fabricación del SFV y los principales actores en cada uno de estos.

³ Se denomina ruta crítica al proceso más directo y eficiente para la culminación de un proyecto, o en este caso, para la obtención de un producto: un SFV de tecnología de Si cristalino, considerando desde la extracción de la materia prima hasta la puesta en marcha de un SFV funcional de interconexión (GOE, 2013).

Tabla 6.- Se muestra un panorama general de la cadena de fabricación de los SFV de interconexión en México. Imagen modificada del documento: Cadena de valor de la generación distribuida en México (INEEL, 2019).

Conceptos generales	Pre-Mercado		Mercado				
	Investigación e Innovación	Producción de materia primas		Producción de manufacturas		Calidad/ Distribución	Ejecución de proyectos fotovoltaicos
	I+D+i	Minería/ Extracción	Procesamiento	Partes/ Accesorios	Ensamblajes/ Conjuntos	Insumos para la ISFV	Instalación
Ciclo de vida del MFV	<ul style="list-style-type: none"> Celdas MFV 	<ul style="list-style-type: none"> Grava de cuarcita Cobre Zinc Plomo Plata 	<ul style="list-style-type: none"> Polisilicio Productos químicos Gases a granel Pasta de plata 	<ul style="list-style-type: none"> Obleas Celdas Vidrio solar Marcos de aluminio Cable FV Cajas de conexión Conectores 	<ul style="list-style-type: none"> Módulos fotovoltaicos 	<ul style="list-style-type: none"> Ensayos y validación Inspección y control Certificación y auditoría Comercialización 	<ul style="list-style-type: none"> Construcción Instalación Puesta en marcha
Ciclo de vida del SFV	<ul style="list-style-type: none"> Inversores Componentes eléctricos y mecánicos 	<ul style="list-style-type: none"> Minerales ferrosos y no ferrosos 	<ul style="list-style-type: none"> Metales ferrosos y no ferrosos a granel Productos químicos Gases a granel 	<ul style="list-style-type: none"> Cables Conectores Cajas de combinación Interruptores Protecciones 	<ul style="list-style-type: none"> Inversores Estructuras Medidores Equipo de monitoreo 	<ul style="list-style-type: none"> Logística y transporte Gestión aduanera 	
Organizaciones involucradas	<ul style="list-style-type: none"> Universidades Centros de investigación Laboratorios de pruebas 	<ul style="list-style-type: none"> Empresas mineras 	<ul style="list-style-type: none"> Fabricantes de polisilicio Empresas metalúrgicas Fabricantes de productos químicos 	<ul style="list-style-type: none"> Fabricantes de obleas y celdas Fabricantes de cables y componentes eléctricos-electrónicos Fabricantes de vidrio solar Fabricantes de estructuras 	<ul style="list-style-type: none"> Fabricantes de módulos e inversores Fabricantes de estructuras Fabricantes de dispositivos eléctricos y electrónicos 	<ul style="list-style-type: none"> Comercializadores mayoristas y minoristas Empresas de logística y transporte Agencias aduanales Laboratorios de pruebas 	<ul style="list-style-type: none"> Bancos/ Intermediarios financieros Instaladores Unidades de verificación
Recursos humanos involucrados	<ul style="list-style-type: none"> Investigadores 	<ul style="list-style-type: none"> Ingenieros Mineros Geólogos 	<ul style="list-style-type: none"> Ingenieros metalúrgicos Ingenieros químicos 	<ul style="list-style-type: none"> Ingenieros y técnicos especializados en manufacturas FV y de equipo electrónico Técnicos en producción Técnicos en mantenimiento 		<ul style="list-style-type: none"> Mercadólogos Vendedores técnicos Ingenieros en logística y transporte Agentes aduanales Choferes Almacenistas 	<ul style="list-style-type: none"> Instaladores FV Ingenieros eléctricos Ingenieros electrónicos Trabajadores de la construcción
	<ul style="list-style-type: none"> Posgrados, educación superior, educación técnica y técnica superior, capacitación y certificación por competencias 						
Sector	<ul style="list-style-type: none"> Servicios educativos y de I+D+i 	<ul style="list-style-type: none"> Minería 	<ul style="list-style-type: none"> Industrias manufactureras, maquiladoras y de servicios de exportación 			<ul style="list-style-type: none"> Comercio al mayores y menudeo 	<ul style="list-style-type: none"> Servicios profesionales y técnicos Servicios financieros
Legislación, Regulación y Normatividad	<ul style="list-style-type: none"> Ley de Ciencia y Tecnología 	<ul style="list-style-type: none"> Ley de Minería Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental NOM-120-SEMARNAT 		<ul style="list-style-type: none"> Decreto IMMEX Normatividad internacional y nacional: Normas IEC y NMX, UL NOM-001-SEDE-2018 			<ul style="list-style-type: none"> Ley de la Industria Eléctrica Ley de Transición Energética Manual de interconexión Disposiciones administrativas

III.7 Conclusión de capítulo

La participación de las FER en el mundo avanza rápidamente, en el caso de la ESFV, al cierre de 2019 se alcanzaron los 627 GW de CIFV a nivel mundial, con muy baja participación de México en esta potencia. Sin embargo, en el PRODESEN de 2019 se tiene planteado que en el lapso contemplado entre 2018 y 2032, la participación de la TSFV pase de 2.5 % a 8.9 % en CIFV y de 0.4 % a 4.1 % en generación de energía eléctrica.

Aunque el mercado potencial en la fabricación de producto para aplicaciones FV es muy grande en México, a la fecha, no se encuentra empresas registradas que se dediquen a la manufactura de insumos para la ISFV mexicana, teniéndose, por el contrario, una alta dependencia hacia productos de origen extranjero.

Las proyecciones realizadas por la SENER muestran que, durante el año 2021 se espera que la TSFV alcance una adición de 1.92 GW a la CIFV en territorio nacional, así como una adición promedio de 370 MW cada año durante la próxima década a partir del 2022. Este nicho de mercado abre una oportunidad para la industria mexicana para que fabrique los insumos, partes y componentes que integran un SFV y, de esta manera, pueda cubrir las necesidades FV proyectadas sin depender de materia prima de origen extranjero.

Por ahora, la TSFV de Si cristalino es la que domina el mercado FV en México y el mundo, por lo cual, si se quiere impulsar a los industriales mexicanos a que participen en la fabricación de insumos FV, es necesario realizar un estudio sobre la cadena de fabricación en MFV y SFV que permita sentar las bases para fomentar el interés entre fabricantes para que participen en dicho mercado.

IV Cuantificación de insumos y material para cada etapa de la cadena de fabricación de un SFV de 1.0 kW

IV.1 Introducción de capítulo

En la sección anterior se planteó la necesidad de cubrir la demanda potencial de TSFV que se tendrá en los próximos años con producto nacional, y a partir del PRODESEN se está hablando de un requerimiento de 1.9 GW durante 2021 y posteriormente de un promedio anual de 370 MW entre el 2022 y el 2032; de esta manera, la posibilidad de invertir en la producción de insumos para la ISFV se vuelve particularmente viable y atractivo, pero no basta con identificar dicho requerimiento, se necesita la cuantificación de los materiales requeridos en cada una de las etapas de la cadena de fabricación del SFV.

En este capítulo, se presenta la cuantificación del material requerido en cada etapa de la cadena de fabricación de la ISFV para implementar un SFV de 1.0 kW de potencia. Considerando la ruta crítica del Si, desde la extracción de la sílice hasta la instalación del SFV, poniendo especial atención en los requerimientos para la obtención de la celda FV de Si cristalino y el ensamble del MFV. La Figura 35 muestra un esquema simplificado de los diferentes procesos que conllevan a la instalación de un SFV, los cuales, serán considerados en esta sección.

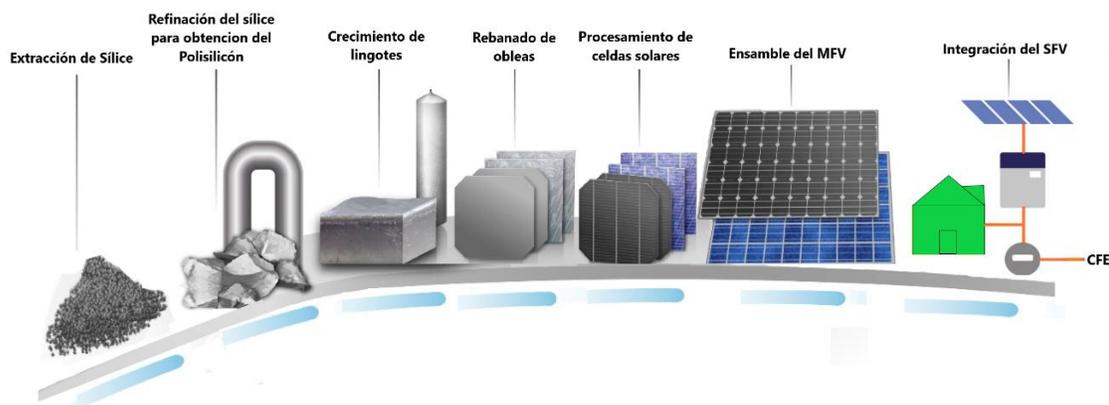


Figura 35.- Se muestran las etapas consideradas en la cadena de fabricación para la cuantificación de material requerido en cada una de ellas. Imagen modificada del documento: *Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing (NREL, 2018, revisión 2020)*.

IV.2 Silicio producido en territorio nacional

Según el último dato publicado por la Subsecretaría de Minería, la producción de sílice dentro de territorio nacional fue de más de 4.6 Mton durante 2018 (ver Tabla 7); considerando que se requieren a aproximadamente 20.5 kg de arena de sílice para elaborar 1.0 kW de MFV integrados por celdas con una eficiencia de $\eta = 16\%$ (Yinyin, Xin, & Zengwei, 2014), se pudieron producir más de 225.3 GW con la materia prima extraída durante dicho año.

Si consideramos que por cada tonelada de sílice, se obtienen aproximadamente 270 kg de polisilicio (Yinyin, Xin, & Zengwei, 2014), por lo tanto, se requerirían 5,272 toneladas de sílice para cubrir el requerimiento proyectado por la SENER de 370 MW; estas toneladas de sílice representarían únicamente el 0.11 % de la producción nacional del último año reportado, lo cual significa que, sí se tiene la capacidad de producción suficiente en la industria minera mexicana de sílice para abastecer la ISFV (2018).

Tabla 7.- Se muestra la producción, en toneladas, de sílice extraído en México y los principales estados productores (Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, Edición 2019).

Estados/Años	2014	2015	2016	2017	2018 p/
Total:	2,548,336.00	1,742,438.00	3,171,826.00	2,693,700.91	4,619,455.67
Baja California	-	-	-	-	76,963.00
Chihuahua	-	-	-	-	42,761.00
Coahuila	994,233.00	505,300.00	1,843,391.00	1,254,321.00	1,812,642.24
Guanajuato	13,266.00	-	120.00	-	-
Nuevo León	194,423.00	123,900.00	-	296,000.00	-
San Luis Potosí	39,589.00	21,200.00	48,000.00	-	48,000.00
Sonora	-	18,600.00	119,863.00	43,119.91	61,896.86
Veracruz	1,306,825.00	1,073,438.00	1,160,452.00	1,100,260.00	2,577,192.57

*/ Considera arena sílica, cuarzo y materiales silíceos.

IV.3 Cuantificación de insumos en la obtención del Si grado metalúrgico y el polisilicio

Las siguientes tablas fueron realizadas usando datos del artículo Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China (Yinyin, Xin, & Zengwei, 2014), y muestran los requerimientos de material durante la refinación de la sílice para la obtención del Si grado metalúrgico y el polisilicio grado solar.

Tabla 8.- Insumos y productos en la elaboración de Si grado metalúrgico

Obtención del silicio grado metalúrgico			
Insumos		Productos	
Arena sílica	20.48 kg	Silicio grado metalúrgico (99%)	6.08 kg
Carbón estándar	45.40 kg	Dióxido de carbono	132.91 kg
-	-	Monóxido de carbono	1.70 kg
-	-	Escoria de silicio	4.38 kg
-	-	Dióxido de silicio	1.70 kg
-	-	Dióxido de sulfuro	0.79 kg

Tabla 9.- Insumos y productos en la elaboración del polisilicio grado solar.

Obtención del polisilicio			
Insumos		Productos	
Silicio grado metalúrgico	6.08 kg	Polisilicio (99.9999999)	5.52 kg
Óxido de calcio	6.52 kg	Residuos químicos al agua	82.21 g
Ácido clorhídrico (30%)	2.93 kg	Emisiones de clorosilano	28.56 g
Ácido fluorhídrico (20%)	0.06 kg	Emisiones de cloruro de hidrogeno	36.24 g
Hidrogeno (>99.8%)	0.50 kg	Emisiones de fluoruro de hidrógeno	0.22 g
Ácido nítrico	0.22 kg	Dióxido de nitrógeno	3.15 g
Nitrógeno gaseoso	71.16 kg	Polvo de silicio no recuperable	8.29 g
Tetracloruro de silicio (>99%)	8.29 kg	Polvo de silicio recuperable	0.83 kg
Hidróxido de sodio (20%)	4.81 kg	Tetracloruro de silicio	9.23 g
Agua	10,396.87 kg	Sólidos suspendidos	54.81 g
Electricidad	2287.25 MJ	Emisiones de triclorosilano	31.33 g
Vapor	385.02 kg	Vapor	5991.76 kg

IV.4 Cuantificación de insumos en la obtención del lingote de Si y el rebanado de las obleas

Las siguientes tablas fueron realizadas usando datos del artículo Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China (Yinyin, Xin, & Zengwei, 2014) y muestran los requerimientos de material requeridos durante el crecimiento del lingote de Si-mono y el rebanado de las obleas.

Tabla 10.- Insumos y productos en la elaboración del lingote de Si-mono.

Obtención del lingote de silicio			
Insumos		Productos	
Polisilicio	5.52 kg	Lingote de silicio	5.47 kg
Carburo de silicio	61.92 g	Fluoruro de hidrógeno	0.60 g
Argón	10.5 kg	Carburo de silicio	61.43 g
Ácido fluorhídrico	254.03 g	Ácidos remanentes	348.72 g
Aire comprimido	18.76 m ³	Evaporación de agua	375.08 kg
Hidróxido de sodio	46.88 g	-	-
Agua	492.47 kg	-	-
Electricidad	157.54 MJ	-	-
Vapor	7.60 kg	-	-

Tabla 11.-Insumos y productos en la elaboración de obleas para aplicaciones FV.

Obtención de las obleas			
Insumos		Productos	
Lingote de silicio	5.47 kg	Obleas de silicio	3.34 kg
Vidrio	2.47 kg	Ácido acético	0.60 kg
Carburo de silicio	175.78 g	Vidrio	2.47 kg
Alambre de acero	17.11 kg	Residuos de pegamento	243.28 g
Ácido acético	0.60 kg	Costra de silicio (recuperable)	2.07 kg
Detergente	2.23 kg	Aguas residuales	336.94 kg
Aire comprimido	29.05 m ³	-	-
Agua	528.63 kg	-	-
Electricidad	24.01 MJ	-	-

IV.5 Cuantificación de insumos en el procesamiento de celdas solares FV

Tabla 12.-Insumos y productos en el procesamiento de celdas solares FV.

Procesamiento de una celda solar fotovoltaica			
Insumos		Productos	
Obleas de silicio	1 pza (16 g)	Celdas solares fotovoltaicas	1 pzs
Amoniaco	423.56 mg	Emisiones de amoniaco	37.78 mg
Etanol (99.7%)	1.11 g	Emisiones de cloruro de hidrogeno	23.65 mg
Ácido clorhídrico (37%)	12.36 g	Emisiones de fluoruro de hidrógeno	18.89 mg
Ácido fluorhídrico	3.75 g	Óxidos de nitrógeno	293.26 mg
Ácido nítrico	6.88 g	Compuesto orgánico volátil ajeno al metano	166.53 mg
Nitrógeno	36.63 g	Agua	4.26 kg
Ácido fosfórico	44.76 mg	-	-
Hidróxido de potasio (21%)	13.27 g	-	-
Plata	326.44 mg	-	-
Aluminio	1.38 g	-	-
Agua	4.16 kg	-	-
Gas natural	2.84 g	-	-
Electricidad	3,301.39 MJ	-	-
Vapor	125.72 g	-	-

La Tabla 12 fue realizada usando datos del artículo Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China (Yinyin, Xin, & Zengwei, 2014) y muestra la cantidad de obleas que pueden ser obtenidas de 3.4 kg de material rebanado, así como la cuantificación del material requerido para procesar celdas solares FV por unidad. Considerando que cada oblea FV de Si-mono requiere de 16 gramos de Si, 3.34 kg de obleas, se traducen en 208 piezas.

IV.6 Identificación de las etapas y los participantes de la cadena de fabricación en la construcción del MFV

En el ensamblado del MFV es necesario considerar a los fabricantes y distribuidores de aluminio, vidrio templado bajo en hierro, Polímero de EVA, PVF, tabbing bus wire, celdas de Si cristalino, diodos rectificadores, cajas de conexión, cable solar, conectores, y demás componentes que integran al MFV, así como su disposición en territorio nacional.

IV.6.1 Cuantificación del material requerido para fabricar MFV integrados por 60, 72 y 96 celdas en serie

La oferta comercial de los MFV con 60, 72 y 96 celdas, se presentan en una compactación en donde se minimizan las dimensiones físicas de dichos productos. La Tabla 13 presenta las dimensiones típicas de dichos MFV y sus pesos aproximados, las cuales han sido tomadas de las hojas de especificaciones correspondientes.

Tabla 13.- Se muestran las dimensiones y pesos típicos de MFV integrados por 60, 72 y 96 celdas, ofertados por fabricantes mexicanos.

Dimensiones del MFV de Silicio Monocristalino				
Tipo de módulo por número de celdas	Peso (kg)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Superficie promedio (m ²)
60	18-20.5	1639-1650	982-992	1.62
72	22-28	1960-1980	985-1002	1.96
96	20-26	1956	1310	2.56

Con base a la cuantificación de material necesario para procesar una celda FV de 156 mm x 156 mm (ver Tabla 12), se ha realizado y determinado cuanto material se requiere para integrar un MFV de Si cristalino de 60, 72 y 96 celdas con las características especificadas por fabricantes mexicanos (ver Tabla 14).

Un cálculo rápido para cuantificar las cantidades de materiales requeridas se puede establecer si consideramos una producción anual de 20 MW. Si se eligen MFV de 60 celdas con una potencia pico de 250 W, fabricados mediante celdas con una eficiencia de 15.43 % (156 mm x 156 mm), se requerirá de 80 mil MFV, lo que implicaría contar con un suministro de 4,800,000 celdas, 129,600 m² de vidrio, tedlar, 259,200 m² de EVA, 416,000 m lineales de aluminio, etc.

Tabla 14.- Insumos requeridos en el ensamble de los MFV de 60, 72 y 96 celdas con las características de fabricantes mexicanos.

Ensamble del MFV			
Requerimiento de material en función de la cantidad de celdas que integran el MFV			
Insumo	60 celdas	72 celdas	96 celdas
Vidrio	1.62 m ²	1.9 m ²	2.56 m ²
Aluminio (perfil convencional)	5.2 m	5.8 m	6.53 m
Tedlar	1.62 m ²	1.9 m ²	2.56 m ²
Etanol	16.43 g	19.72 g	26.29 g
EVA	3.24 m ²	3.8 m ²	5.12 m ²
Sello	5.2 m	5.8 m	6.53 m
Isopropanol	5.10 g	6.12 g	8.16 g
Agua	34.05 kg	40.86 kg	54.48 kg
Vapor	4.86 kg	5.61 kg	7.49 kg
Electricidad	20.76 MJ	24.91 MJ	33.22 MJ
Cinta colectora delgada	54.54 m	65.37 m	87.16 m
Cinta colectora gruesa	2.13 m	2.17 m	3.01 m
Diodos de paso	3	3	4
Cajas para terminales de salida	1	1	1
Juego de terminales tipo MC4 (M-H)	1	1	1
Cable solar calibre 10 AWG	2	2	2

Aunado a esto, para su comercialización, el MFV debe tener integrada su caja de conexiones en cuyo interior está la terminal negativa y positiva de la conexión en serie de las 60 celdas, 3 diodos de paso conectados uno por cada 20 celdas, y los conductores de salida del circuito FV, que son cables de cobre flexibles con recubrimiento UV (cable solar), conectados respectivamente a las terminales de salida del MFV, cuya longitud es normalmente 1.0 m y en cuyos extremos se instalan conectores del tipo multicontacto.

Como ejemplo de cuantificación, para 20 MW se requerirá de 240,000 diodos, 80,000 cajas, 160,000 terminales de salida, 160,000 metros lineales de cable solar (calibre #14 AWG o 6.0 mm² de sección transversal) y 160,000 conectores del tipo MC4.

Todo este producto, exceptuando por la celda solar, podría ser proveído por industriales mexicanos.

IV.7 Identificación de los participantes en la cadena de fabricación en la integración de un SFV de 1.0 kW de potencia pico

Un SFV interconectado a la red está integrado por el GFV o AFV, una estructura metálica que garantice confiabilidad mecánica y larga duración, un sistema de anclaje, un acondicionador de potencia, conductores eléctricos o cables y dispositivos eléctricos requeridos por la norma eléctrica oficial para que se permita su conexión a las RGD del SEN.

En cada una de las etapas se deben considerar el transporte y almacenamiento de material, la mano de obra calificada requerida para el proyecto, fabricantes y distribuidores de: bases y ángulos

de aluminio, canalizaciones, tornillería, acondicionadores de potencia, cables, protecciones eléctricas, gabinetes y demás partes y componentes requeridos en la instalación del SFV.

IV.7.1 Cuantificación del material requerido para instalar un SFV de 1.0 kW de potencia pico

A continuación, con base en una cuantificación minuciosa realizada a SFV instalados en el Instituto de Energías Renovables (IER) en Temixco, Morelos, se enlistan las partes y componentes que requiere un sistema FV hipotético de interconexión con una capacidad de 1.0 kW de potencia pico. Cabe aclarar que, se descartan los requerimientos arquitectónicos pues, varían de acuerdo con el lugar de instalación y es complicado generalizarlos. El número de MFV e inversiones depende de la potencia elegida para cada proyecto, para este caso de estudio se considerarán MFV de 250 W pico integrados por 60 celdas de Si-mono en serie, y para el caso de los inversores, se tomará en cuenta un solo inversor con una potencia nominal de 1,000 W.

Tabla 15.- Se enlistan los componentes eléctrico-electrónicos requeridos para un SFV hipotético de 1.0 kWp, integrado por 4 MFV y un solo inversor.

Equipo FV			
Materiales	Unidad	Cantidad	Tipo de material
Módulos FV	pza	4 (250 W c/u)	Eléctrico-Electrónico
Inversor o Microinversor	pza	1	Eléctrico-Electrónico
Acumulador (opcional)	nza	0	Eléctrico-Electrónico

Tabla 16.- Se muestran los componentes requeridos para la parte estructural de un SFV hipotético de 1.0 kWp, integrado por 4 MFV y un solo inversor.

Parte estructural y canalizaciones			
Materiales	Unidad	Cantidad	Tipo de material
Juego de tornillo (5/16), rondana plana, rondana de presión y tuerca; para MFVs	juegos	16 juegos	acero inoxidable
Juego de tornillo (1/2), rondana plana, rondana de presión y tuerca; para MFVs	juegos	4	acero inoxidable
Durmiente (PLP P8)	m	8.26	aluminio
Trabes de aluminio (PLP P8)	m	3	aluminio
Torres (PLP P8)	m	1.3	aluminio
Bases para empotrar	pza	4	acero inoxidable
Juego de ancla y tuercas	pza	4	acero inoxidable
Sujetador central	pza	6	aluminio
Sujetador extremo	pza	4	aluminio
Tubo Conduit	m	5	tubería
Codos Conduit 90°	pza	2	tubería
Monitores	pza	4	material galvanizado
Abrazaderas	pza	4	material galvanizado

Tabla 17.- Se muestran los componentes requeridos para integrar la parte eléctrica de un SFV hipotético de 1.0 kWp, integrado por 4 MFV y un solo inversor.

Parte eléctrica			
Materiales	Unidad	Cantidad	Tipo de material
Cable solar (calibre 10 AWG)	m	4	eléctrico
Juego de conectores tipo MC4 macho-hembra	pza	2	especializado
Cable desnudo (calibre 10 AWG)	m	6	eléctrico
Zapata dentada de puesta a tierra	pza	4	eléctrico
Block de paralelismo CD	pza	1	especializado
Caja de combinación	pza	1	gabinete hermético
Riel DIN	m	1	acero inoxidable
Prensa cables	pza	4	eléctrico
Porta fusible desconector CD	pza	1	especializado
Fusible CD	pza	1	especializado
Varistor	pza	1	especializado
Desconector general CD	pza	1	especializado
Interruptor termomagnético CD	pza	1	especializado
Electrodo de puesta a tierra	pza	1	eléctrico

IV.8 Conclusión de capítulo

Como se puede ver en las tablas anteriores hay una serie de partes asociadas a la instalación mecánica y eléctrica que su cantidad se determina para cada sitio específico. Lo que se ha presentado en las tablas anteriores es una simplificación para el caso en que el sitio de instalación, que puede ser el piso o una azotea, sea plano.

Generalmente en una aplicación de interconexión a la red para generación distribuida doméstica se puede tener requerimientos mayores a 1 kW, sin embargo, la cuantificación del material puede ser escalable, por lo que la propuesta del análisis puede ser replicado tantas veces como sea necesario para evaluar SFV más grades.

Las etapas de la cadena de fabricación de los SFV quedan definidas en este capítulo, así como los insumos y productos involucrados en cada etapa de ésta, considerando desde la extracción de la sílice hasta la instalación del SFV terminado. Con base en la información recabada, ya es posible analizar si la industria mexicana es capaz de solventar la demanda de partes y componentes para proveer el requerimiento de la materia prima que requerirá la ISFV nacional para abastecer el mercado FV mexicano que se tiene proyectado para la próxima década.

Es importante aclarar que la información recabada en este capítulo para la cuantificación de material en cada etapa de la cadena de fabricación es mayormente de origen extranjero, puesto que, no existen productores de estos componentes FV en nuestro país que sean sujeto de estudio.

V Identificación de industrias mexicanas productoras de partes y componentes que integran al MFV y al SFV

V.1 Introducción de capítulo

En la actualidad, las partes y componentes que integran el MFV están ampliamente identificadas, muchos países a lo largo del mundo aprovechan la demanda de estos materiales para participar en el mercado FV mundial. En el caso de México, no se tiene un gran número de empresas dedicadas exclusivamente a la producción de materiales para la ISFV, inclusive, para algunos componentes como el polisilicio o las obleas, no se tienen productores nacionales en absoluto. Por otro lado, en el caso de algunos otros materiales como el vidrio o el aluminio, los cuales si son producidos de forma local, las productoras están enfocadas en atacar otras áreas del mercado y dejan de lado las posibles aplicaciones FV.

La ISFV mexicana está perdiendo un gran nicho de oportunidad para entrar al mercado FV mundial produciendo partes y componentes requeridos en la elaboración del MFV, y así, cubrir su propia demanda de material para llevar a cabo proyectos FV de generación distribuida y centrales de generación. En este capítulo se realiza una búsqueda exhaustiva en línea para identificar y dar a conocer los fabricantes que dominan el mercado nacional en la elaboración de los insumos requeridos para el ensamble del MFV: vidrio, aluminio, cable, EVA y Tedlar.

V.2 Requerimientos de partes y componentes en el ensamble del MFV

En México existen alrededor de diez empresas dedicadas al ensamble de MFV mediante el uso de componentes de origen extranjero.

Las empresas más reconocidas son las enlistadas en la Tabla 18:

Tabla 18.- Se muestran las principales empresas mexicanas dedicadas a ensamblar MFV dentro de territorio nacional.

Fabricantes	Ubicación	Inicio de operaciones
ERDM SOLAR	Tuxtla, Veracruz	2007
IUSASOL	Jocotitlán, Estado de México	2013
SAECSA	Cuatlancingo, Puebla	1995
SAYA ENERGY	Aguascalientes, Aguascalientes	2006
SOLAREVER	Hidalgo	2012
SOLARSOL	Mérida, Yucatán	2014
SOLARVATIO	Oaxaca, Oaxaca	2013
SYDEMEX SOLAR	Colima, Colima	2010
XTENDER SOLAR	Tijuana, Baja California	2019

V.3 Empresas productoras de partes y componentes del MFV

Con base en las fichas de fabricantes mexicanos recabadas, se seleccionaron las siguientes partes y componentes del MFV como las más significativas para llevar a cabo la cuantificación del material: aluminio, vidrio, EVA, Tedlar, cinta colectora delgada y gruesa, y polisilicio.

V.3.1 Aluminio

El Aluminio que se usa para aplicaciones FV es del tipo 6063. Este tipo de aluminio es de resistencia media, manufacturada con magnesio y Si como elementos de aleación, comúnmente conocida como aleación arquitectónica. El perfil elaborado con este Aluminio presenta buenas propiedades mecánicas, un buen acabado superficial y alta resistencia a la corrosión, ideal para aplicaciones FV.

Las empresas que fabrican este tipo de material son las listadas en la Tabla 19. Desafortunadamente, solo se logró identificar cual es la capacidad de producción de muy pocas de estas empresas mediante sus portales virtuales.

A pesar de que algunas de las empresas en la Tabla 19 no se dedican al tipo de aluminio requerido para la ISFV, hay que considerar que, la migración de un nicho de mercado a otro no parece representar mayores dificultades técnicas.

Tabla 19.- Se muestran las empresas más significativas dedicadas a la producción de aluminio en México.

Empresa mexicana	Ubicación	Inicio de actividades	Nicho de mercado
CONALUM	Guadalajara	1986	Perfiles de aluminio
EXTRAL	CDMX	1996	Perfiles de aluminio
CANFRANC Aluminio	CDMX	-	Perfiles de aluminio
ARZYZ	CDMX	1980	Aleaciones no ferrosas
ALUMCAST	Coahuila, México	-	Inyección de Aluminio
ALUMINICASTE	Guanajuato	-	Extrusión y Hoja de Al
ALYEX	Querétaro	-	Extrusión de Aluminio
INDALUM	México-Monterrey	1978	Perfiles y tubos de AL
CUPRUM	CDMX	2011	Placa de Aluminio
ALMEXA	Estado de México	-	Placa de Aluminio

V.3.2 Vidrio

Usualmente se usa vidrio plano templado de por lo menos 3 mm de espesor, bajo en hierro (10 veces menos hierro que el vidrio plano normal) para aumentar su transparencia y favorecer el aprovechamiento del recurso solar.

Durante 2019 se estimaba que en México existían alrededor de 2,800 empresas registradas dedicadas a la elaboración de vidrio, de las cuales, 1.03 % aproximadamente, son fabricantes de vidrio plano, equivalente a 28-29 empresas, sin embargo, la empresa que actualmente encabeza el mercado mexicano es VITROMEX. Esta empresa fue fundada en 1909 bajo el nombre de Vidriera Monterrey, en 1929 Vitro inauguró su primera fábrica de vidrio plano en Nuevo León, en la década de los 90 se consolidó como el mayor productor de vidrio de México. Actualmente, se estima que vitro provee alrededor del 50 % del vidrio plano empleado en todo México.

En la actualidad, VITRO se especializa en vidrio plano para aplicaciones arquitectónicas y vidrio automotriz, con una producción de 22 millones de metros cuadrados mensuales (promedio extrapolado) (VITRO, 2019); suficiente capacidad de producción para cubrir el requerimiento de material de la ISFV en México, según la evolución esperada de la CIFV durante la próxima década.

V.3.3 Tedlar

Tedlar es una marca de la compañía química estadounidense DuPont. Esta empresa química transnacional de origen estadounidense es una de las más grandes del mundo y es la desarrolladora del PVF mejor conocido como Tedlar. Este material termoplástico de fluoropolímero que presenta alta resistencia a las condiciones climatológicas, tiene baja permeabilidad a la humedad, vapor, aceite y puede usarse en un amplio rango de temperatura de entre -70 °C a + 110 °C, ideal para aplicaciones FV.

El Tedlar es un material comparativamente costoso y, por lo tanto, uno de los gastos que los fabricantes buscan reducir mediante el uso de materiales alternativos o incluso manufacturando nuevos tipos de paneles que no requieren Tedlar en absoluto. Las alternativas comunes son: Tereftalato de polietileno (PET), capa de EVA y películas de capa mixta (VOLTAICS, 2019).

En la actualidad la producción de PVF está centrado en USA por parte de la empresa DuPont y no se cuenta con fabricantes de origen mexicano. Sin embargo, en México se tienen numerosas empresas que fabrican su equivalente, PET; algunas de ellas son: REGIOPET, COMERLIM, ENVASA, DIRIN, MAXIPET, ESCOWILL, CINTEX, entre muchas otras. La producción de este material en México es abundante, sin embargo, la mayoría de estas empresas están enfocadas a otros nichos de mercado, principalmente el de tuberías, botellas y envases varios. No obstante, se podría considerar, a futuro, la posibilidad de que estos fabricantes deseen migrar parte de su capacidad de producción hacia el tipo de PET que puede ser implementado en la ISFV mexicana.

V.3.4 EVA

En la industria solar fotovoltaica, las celdas fotovoltaicas se encapsulan entre dos láminas de EVA. Este termoplástico es conocido por su excelente durabilidad en circunstancias climáticas difíciles como alta temperatura y humedad abundante. El polímero EVA tiene la propiedad de tener una alta transparencia, lo que favorece la transmisión óptica y facilita el aprovechamiento del recurso solar; brinda una unión resistente, ya sea con el vidrio solar o con el backsheet, que evita que las celdas entren en contacto con el medio ambiente (VOLTAICS, 2019).

En América, es USA quien domina la fabricación de este producto, ofertado por diversas empresas como: DuPont, Emco Industrial Palastic, GAR Plastics, Advanced Cellular Technologies, entre otros. En la actualidad, no se cuenta con fabricantes de origen mexicano que manufacturen el tipo de EVA empleado para aplicaciones FV. Sin embargo, en México existen empresas que fabrican productos de Etil-Vinil-Acetato similares. Algunas de estas empresas son: EVACOLORS, EVA de LEÓN, FOAMTEX, entre otras. Las cuales, atacan nichos de mercado ajenos al sector FV como: espuma sólida, tapetes, calzado, blocks, protecciones automotrices y material para manualidades, entre otros. Estos productores, al manejar productos de Etil-Vinil-Acetato, podrían ser considerados para producir, en un futuro, el tipo de EVA que puede ser implementado en la ISFV mexicana.

V.3.5 Polisilicio, Obleas y Celdas solares para aplicaciones fotovoltaicas.

El Si requerido para la fabricación de obleas y celdas de Si cristalino, típicamente, cuenta con una pureza de entre 99.9999% (6N) y 99.999999 (8N), aunque, también es posible usar polisilicio grado electrónico con valores de pureza de entre 9N y 11N para fabricar celdas FV de alta calidad o “Premium” (Independent Commodity Intelligence Services, 2013).

Actualmente no hay industria mexicana que: purifique Si, fabrique obleas o celdas FV. En la Figura 36 se puede observar un mapa donde se ubican los mayores productores de polisilicio, obleas, celdas y MFV de todo el mundo.

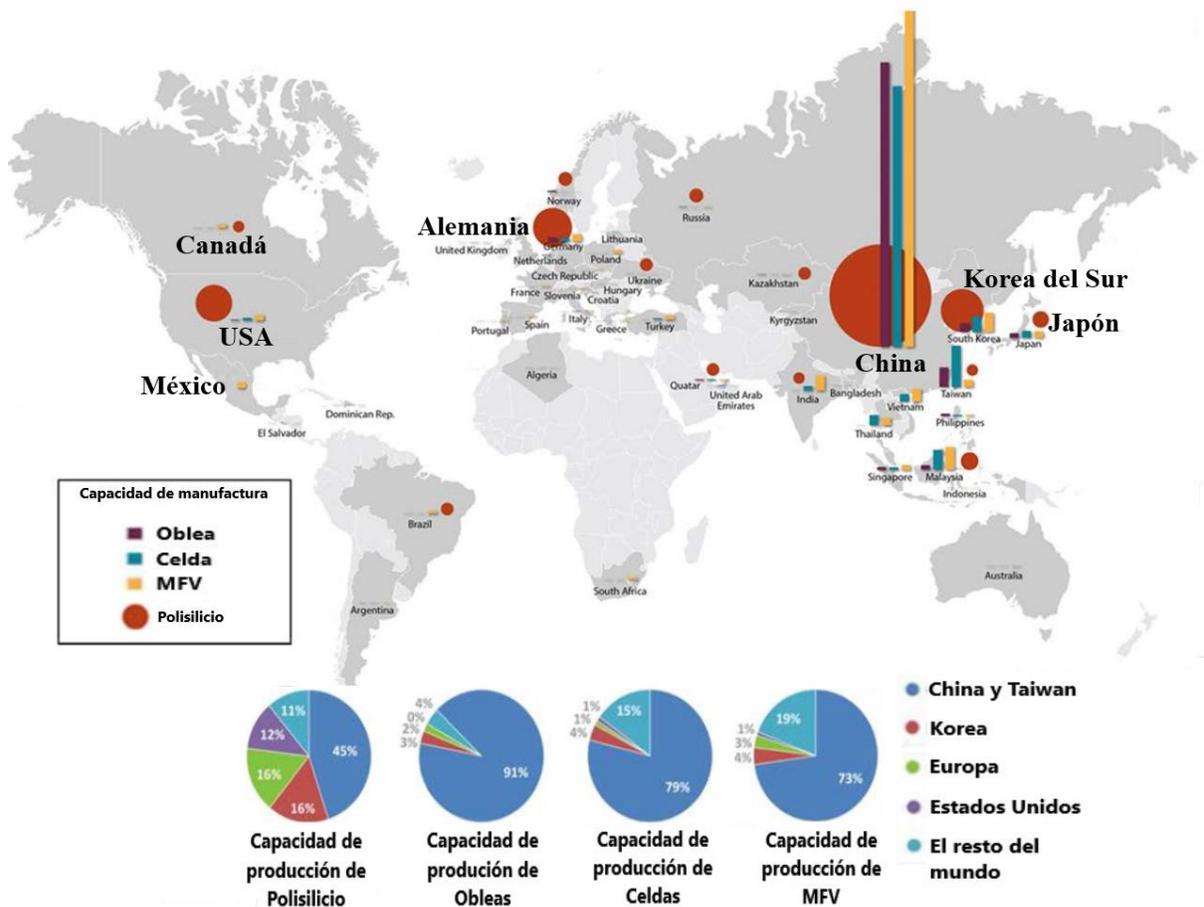


Figura 36.- Se muestran las regiones del mundo donde se concentran los productores de polisilicio, obleas, celdas y MFV (NREL, 2018, revisión 2020).

V.3.6 Cintas metálicas colectoras delgada y gruesa para aplicaciones FV

Las cintas metálicas colectoras delgada (Tabbing Tab Wire) y gruesa (Bus Wire Ribbon) están compuestas por un alma de cobre recubierta por estaño, las medidas estándar para el ensamble de MFV constituidos por celdas de Si de 15.6 x 15.6 cm son las siguientes: para la cinta delgada, el ancho habitual es de 2.0 mm y para la cinta gruesa es de 5.0 mm, ambas conformadas por una tira de Cobre de 0.15 mm de espesor y dos capas de aleación de Estaño (aleación típica: 62.0 % Sn, 36.0 % Pb, 2.0 % Ag) con un grosor de 0.025 mm en cada cara . Estos materiales son fabricados en el extranjero en rollos de hasta varios cientos de metros y actualmente no se cuenta con productores

nacionales especializados. Hoy en día al mercado de las cintas colectoras de cobre para aplicaciones FV lo domina el continente europeo; dos de los más grandes productores a nivel mundial de este producto son: ENLOG EUROPE SA (Luxemburgo) y Ulbrich Stainless Steels & Special Metals, Inc. (Alemania).

Como se puede apreciar en la figura anterior, la mayor producción de polisilicio, obleas y celdas FV está concentrada en china, México solo ensambla MFV haciendo uso de partes y componentes provenientes del extranjero. Para el caso del continente americano, los únicos productores de polisilicio se encuentran en Canadá y USA, lo que le brinda a México la oportunidad de entrar al mercado FV mundial a través de la producción y venta de polisilicio, obleas y celdas FV.

V.4 Empresas productoras de partes y componentes que integran el SFV

Las partes del SFV que se consideran en esta sección, y están descritas a continuación, son las siguientes: 1) Perfiles extruidos de Aluminio y sujetadores, 2) Tornillería de acero inoxidable, 3) Gabinetes, cables, zapatas, terminales y conductores eléctricos, 4) Tubería Metálica Conduit, sujetadores y accesorios

V.4.1 Tornillería de acero inoxidable

Toda la tornillería empleada en las instalaciones FV debe tener los tratamientos necesarios para resistir la sujeción al aire libre sin sufrir deterioro. La mejor opción para este fin, son los tornillos, arandelas y tuercas de acero inoxidable. A continuación, en la Tabla 20, se enlistan las principales empresas registradas en México que producen dichos productos.

Tabla 20.- Se enlistan las empresas mexicanas que manufacturan tornillería de acero inoxidable apta para aplicaciones FV.

Empresa	Inicio de actividades	Locación	Nicho de mercado
APM Tornillería, S.A. de C.V.	1988	Nuevo León	Tornillos, tuercas, pernos, soportería, birlos, arandelas y pijas
Barrod, S.A. de C.V.	1987	Durango	Tornillo tipo molino, herrajes, tornillo cabeza de martillo, tornillo de ojo, hexagonales, anclas, tuercas, abrazaderas, arandelas planas y de presión
Grupo CTAISA Tornillería, S.A. de C.V.	1970's	Monterrey	Espárragos, Birlos, Perno elevador, Anclas para cimentación, Abrazaderas, Escalones, Tensores, tornillos, tuercas y arandelas
Reyca Industrial, S.A. de C.V.	1970's	CDMX	Tornillos, graseras, opresores. Varillas roscadas, remaches, tuercas y arandelas
Rinsa - Roscados Industriales del Norte	-	Monterrey	Anclas de cimentación, Birlos, Espárragos, Abrazaderas y piezas especiales para la industria
Tormex, S.A. de C.V.	1949	CDMX	Tornillos aleación exótica, herrajes, prolongadores, espárragos, abrazaderas, tuercas y arandelas
Tornillos Mexicanos, S.A. de C.V.	1975	CDMX	Tornillos, tornillos automotrices, bridas, espárragos, abrazaderas, anclas y fabricaciones especiales

V.4.2 Perfiles extruidos de Aluminio y sujetadores

El perfil de Aluminio extruido brinda a las aplicaciones fotovoltaicas la facilidad de fijar los MFV a la estructura sin tener que barrenarla, lo cual reduce el tiempo y la mano de obra requeridos para concretar un proyecto. En la Tabla 21 se enlistan las principales empresas mexicanas dedicadas a la extrusión de Aluminio.

Tabla 21.- Se enlistan las principales empresas productoras de aluminio extruido en México.

Empresa mexicana	Ubicación	Inicio de actividades	Nicho de mercado
ALUMINIO EXTRUIDO EXTRAL, S.A. DE C.V.	CDMX y Querétaro	1996	Extrusión y anodizado
ALUMINIO INDUSTRIAL Y PERFILES ESPECIALES AIPESA	Jalisco	-	Extrusión y anodizado
ALYEX	Querétaro	-	Extrusión de Aluminio
CONSORCIO INDUSTRIAL VALSA, S.A. DE C.V.	Estado de México	1970's	Extrusión, lacado y anodizado
INDALUM, S.A. DE C.V.	México-Monterrey	1978	Aluminio Extruido, perfiles y tubería

V.4.3 Gabinetes, cables, zapatas, terminales y conductores eléctricos

Los cables, conductores y accesorios eléctricos para las instalaciones FV son las venas por las que circula la energía producida por los MFV, la mala calidad de estos puede favorecer el deterioro entre las uniones metálicas energizadas y comprometer el funcionamiento del SFV en general.

Tabla 22- Se muestran los principales fabricantes de conductores eléctricos y sus accesorios en México.

Empresa mexicana	Ubicación	Inicio de actividades	Nicho de mercado
KORBEX conductores eléctricos	Nuevo León	2000's	Cables y alambres para conducción eléctrica de cobre y aluminio
VIKON	Monterrey	1956	Cable de alta, media y baja tensión
ARGOS	Estado de México	1970's	Conductores y material eléctrico e iluminación
Cables y Plásticos CYPESA	CDMX	1947	Fabricación de cables para baja y media tensión
IUSA	CDMX y Querétaro	1939	Cable de alta, media y baja tensión de cobre y aluminio
CONDUMEX	CDMX (Corporativo)	1960	Alambre y cable de alta, media y baja tensión de cobre y aluminio
CONDULAC	CDMX	-	Alambre y cable de cobre
Conductores del Norte	Nuevo León	1976	Alambre y cable de cobre y aluminio para media y baja tensión
APCIE	Yucatán	-	Zapatas, bus de paralelismo, empalmes, conectores, puesta a tierra
Elastotecnia	CDMX	-	Conectores, zapatas, puestas a tierra
Furuno Eléctricos S.A. de C.V.	CDMX	1986	Gabinetes, fusibles, accesorios para tableros eléctricos
PROEESA	Hidalgo	1980's	Terminales eléctricas, conectores termomagnéticos, grapas y zapatas
Zion & Ebenezer Technologies	Estado de México	1990's	Conectores de cobre y aluminio, bus bar de cobre, acero inoxidable

De entre estos componentes, el cable es el elemento más importante y debe cubrir con varias características para poder ser usado en aplicaciones FV, entre ellas: contar con un recubrimiento aislante hasta de 2,000 V, con un espesor relativamente superior al convencional THW o con doble aislamiento, protección para rayos Ultravioleta (UV) y temperaturas de operación de 90 °C. Cabe mencionar que, aunque el cable conductor tipo RHW-2/RHHW para intemperie ofertado por algunas de las empresas productoras mexicanas (sun resistance) cumple con algunas de las características anteriores, su oferta comercial no incluye los calibres #14, #12 o #10 AWG que es el que se requiere para el circuito de salida de los MFV.

En la Tabla 22 se enlistan algunas de las principales empresas mexicanas en el ramo de los conductores eléctricos y los accesorios propios de las instalaciones solares FV. De entre estas empresas, solo se han identificado dos que producen cable con las características apropiadas para aplicaciones FV: CONDUMEX y VIAKON.

V.4.4 Inversores

Dentro del país, existen empresas como IUSA e instituciones como la UNAM que, dedican parte de sus recursos al desarrollo de inversores para aplicaciones FV, sin embargo, sus productos no se fabrican en masa por lo que su aporte al sector fotovoltaico es prácticamente nulo. Hasta donde se ha podido investigar, actualmente, en México no se cuenta con fabricantes nacionales de inversores para aplicaciones FV que puedan aportar producto de manera significativa a la ISFV mexicana. Un estudio realizado por: Asociación Mexicana de Energía Solar A.C (ASOLMEX), Asociación Mexicana de la Industria Fotovoltaica A.C (AMIF), Asociación Nacional de Energía Solar A.C. (ANES), y la Agencia Internacional Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ); determinó que las marcas más utilizadas de inversores en México son de origen extranjero (ver Tabla 23).

Como se puede apreciar en la Tabla 23, los inversores más usados en México para aplicaciones FV provienen de dos empresas extranjeras: FRONIUS ubicada en Austria y SMA SOLAR proveniente de Alemania, cuyos inversores representan aproximadamente el 48 % de los equipos utilizados en proyectos nacionales.

Tabla 23.- Se muestran las principales marcas de inversores usados por las empresas instaladoras mexicanas (ASOLMEX, AMIF, ANES, GIZ, & GmbH, 2020).

Marca	Participación %
FRONIUS	25
SMA SOLAR	23
SOLIS	15
ABB	11
KACO	5
SOLAR EDGE	5
GROWATT	4
RENESOLAR	4
GOODWE	3
CPS	1
JNTECH	1
REFUSOL	1
SUNGROW	1
VICTRON	1

V.4.5 Tubería Metálica Conduit, sujetadores y accesorios

La canalización de los conductores eléctricos dentro de tuberías minimiza el daño recibido en los cables debido a las condiciones climatológicas de irradiancia, humedad y temperatura. Estas canalizaciones deben garantizar la inmovilidad de todas sus partes para evitar daños estructurales y eléctricos al SFV; por lo que, se mantienen bajo sujeción mediante abrazaderas, anclajes, zapatas y otras fijaciones mecánicas como tornillería. En la Tabla 24 se pueden apreciar las empresas mexicanas que fabrican tuberías tipo CONDUIT y los accesorios requeridos para su montaje.

Tabla 24.- Se muestran las empresas registradas en México que son fabricantes de tubería tipo CONDUIT y sus accesorios correspondientes.

Empresa mexicana	Ubicación	Inicio de actividades	Nicho de mercado
ANCLO Material para instalaciones	Toluca, Monterrey y CDMX	1970's	Tornillería, tubería galvanizada y accesorios de sujeción
CATUSA	Morelos	1929	Tubo CONDUIT, canastillas y Soportería para cables
CONDUIT RYMCO	Morelos	1981	Tubería tipo CONDUIT
CROSS LINE	Estado de México, Querétaro y Monterrey	1966	Soportería para cables, tornillería y tuberías galvanizadas
Electro Tubos, S.A. de C.V.	Nuevo León, Monterrey y CDMX	1991	Tubería eléctrica Conduit galvanizada y sus accesorios
EMMSA Sistemas de Tubería	Nuevo León, Sinaloa y Yucatán	1975	Tuberías de materiales variados y accesorios
Grupo ATN	Nuevo León	2000's	Soportería para cable, laminas de acero y tuberías galvanizadas
KOBREX Conductores eléctricos	Nuevo León	2000's	Tubería CONDUIT de acero galvanizado
LA METALICA S.A. de C.V.	CDMX		Tubería y accesorios

V.5 Conclusión

En el caso de las partes que integran al SFV, las empresas mexicanas tienen la capacidad técnica y de producción suficiente para cubrir la demanda de materiales requeridos en las adiciones anuales a la CIFV proyectadas para la próxima década. Por otra parte, en el caso del MFV, el país aún no cuenta con fabricantes de la mayoría de los insumos necesarios para llevar a cabo su ensamble, sin embargo, hay que tener en cuenta que, los procesos industrializados de manufactura de dichos componentes pueden ser comprados a productores extranjeros en la forma de paquetes tecnológicos y franquicias, lo que asegura que, en la actualidad, no se tendrían mayores dificultades técnicas para que México produzca, dentro de territorio nacional, los insumos requeridos por el MFV. En conclusión, la fabricación a nivel industrial de las partes y componentes que integran al MFV y al SFV, podría llevarse a cabo de forma satisfactoria mediante manufactura nacional sin complicaciones técnicas insuperables.

VI Análisis de la cadena de fabricación del MFV en el mercado mexicano

VI.1 Introducción de capítulo

Es un hecho que, la ISFV mexicana ha crecido de forma relativamente lenta en comparación con otros países, a pesar de tener los recursos naturales necesarios para la fabricación de MFV. La extracción y procesamiento de sus principales materias primas como son: Si para celdas, arena para vidrio, bauxita para aluminio, cobre para conductores eléctricos, así como la producción de químicos y plásticos, están disponibles de manufactura nacional. Sin embargo, los respectivos productores de cada material están enfocados en atacar nichos de mercado que representan un potencial económico atractivo y no han considerado un mercado nuevo, actualmente en demanda, relacionado con la ISFV.

En este capítulo se estudian las fortalezas y debilidades que tiene México para producir los insumos requeridos por la ISFV nacional. Se hace mención del sector de la industria mexicana a quien le correspondería cada etapa en la cadena de fabricación. Se analiza si, en la medida en que la demanda de los SFV para generación distribuida sigue creciendo en nuestro país, la industria mexicana estaría en condiciones de satisfacer la demanda anual de partes y componentes de la ISFV sin depender de materia prima y componentes de origen extranjero. Por último, se muestran los costos asociados a cada proceso en la ruta crítica del Si, desde su extracción hasta la puesta en marcha de un SFV.

VI.2 Demanda de material fotovoltaico proyectada para la próxima década

En esta sección se considerará que dicha demanda será cubierta mediante la implementación de MFV de 60 celdas con una potencia nominal de 250 W, por lo tanto, la cuantificación del material incluye todas las partes y componentes que conforman el tipo de MFV en cuestión: vidrio templado, EVA, Tedlar, celdas FV, cintas metálicas colectoras, marco de aluminio, etc.; y todos los materiales que se requieren para instalarlos de forma interconectada al SEN, incluyendo: tornillería, Tubería, soportería de aluminio y todos los elementos del BOS.

Como se puede apreciar en la Sección III.5.1, la adición anual a la CIFV que se tiene contemplada durante la década comprendida entre el 2022 y el 2032, es de 370 MW anuales. En la Tabla 25 se enlistan las partes necesarias para la instalación del SFV.

Por otra parte, en la Tabla 26, se enlistan únicamente los materiales requeridos para ensamblar los MFV suficientes para cubrir el requerimiento promedio anual de 370 MW.

Tabla 25.- Se muestra una cuantificación de material para cubrir la demanda de 370 MW proyectada anuales de MFV de 60 celdas con una potencia de 250 W cada uno, para la década 2022 al 2032.

Requerimientos para la instalación de 370 MW			
Producidos en México			
Materiales	Unidad	Cantidad	Tipo de material
Módulos FV	pza	1,480,000	Eléctrico-Electrónico
Juego de tornillo (5/16), rondana plana, rondana de presión y tuerca; para MFVs	juegos	5,920,000	acero inoxidable
Juego de tornillo (1/2), rondana plana, rondana de presión y tuerca; para MFVs	juegos	1,480,000	acero inoxidable
Durmiente (PLP P8)	m	3,056,200	aluminio
Escuadra unión para PLP	pza	1,480,000	aluminio
Juego de tornillo "coche" (5/16) y tuerca, para escuadra	pza	2,960,000	acero inoxidable
Trabes de aluminio (PLP P8)	m	1,110,000	aluminio
Columnas (PLP P8)	m	481,000	aluminio
Bases para empotrar	pza	1,480,000	acero inoxidable
Juego de ancla y tuercas	pza	1,480,000	acero inoxidable
Juego de sujetador central (Mid Cplamp), tornillo (5/16) y tuerca	pza	2,220,000	aluminio
Juego de sujetador de extremo (End Cplamp), tornillo (5/16) y tuerca	pza	1,480,000	aluminio
Tubo Conduit	m	1,850,000	tubería
Codos Conduit 90°	pza	740,000	tubería
Monitores para tubo Conduit	pza	1,480,000	material galvanizado
Abrazaderas	pza	1,480,000	material galvanizado
Cable solar (calibre 10 AWG)	m	1,480,000	eléctrico
Juego de conectores tipo MC4 macho-hembra	juegos	740,000	especializado
Cable desnudo (calibre 10 AWG)	m	2,220,000	eléctrico
Zapata dentada de puesta a tierra	pza	1,480,000	eléctrico
Caja de combinación	pza	370,000	gabinete hermético
Prensa cables	pza	1,480,000	eléctrico
No producidos en México			
Materiales	Unidad	Cantidad	Tipo de material
Inversor de 1 kW	pza	370,000	Eléctrico-Electrónico
Block de paralelismo CD	pza	370,000	especializado
Riel DIN	m	370,000	acero inoxidable
Porta fusible desconector CD	pza	370,000	especializado
Fusible CD	pza	370,000	especializado
Varistor	pza	370,000	especializado
Desconector general CD	pza	370,000	especializado
Interruptor termomagnético CD	pza	370,000	especializado

Tabla 26.-Se muestra una cuantificación de material para cubrir la demanda de insumos en el ensamble de MFV para satisfacer el requerimiento proyectado de 370 MW anuales durante la década comprendida entre el 2022 y el 2032, mediante el uso de MFV de 60 celdas con una potencia de 250 Wp cada uno.

Requerimientos de material para el ensamble de MFV				
Insumo	Por MFV	Por MW	Para 370 MW	Unidades
Producidos en México				
Vidrio	1.62	6,480	2,397,600	m ²
Aluminio (perfil convencional)	5.2	20,800	7,696,000	m
Etanol	16.43	65,720	24,316,400	g
Isopropanol	5.1	20,400	7,548,000	g
Agua	34.05	136,200	50,394,000	kg
Vapor	4.86	19,440	7,192,800	kg
Sello	5.2	20,800	7,696,000	m
Electricidad	20.76	83,040	30,724,800	MJ
Cajas plásticas para terminales	1	4,000	1,480,000	pzas
Cable solar calibre 10 AWG	2	8,000	2,960,000	m
Juego de terminales tipo MC4 (M-H)	1	4,000	1,480,000	pzas
No producidos en México				
EVA	3.24	12,960	4,795,200	m ²
Tedlar	1.62	6,480	2,397,600	m ²
Polisilicio	960	3,840,000	1,420,800,000	g
Cinta colectora delgada	54.54	218,160	80,719,200	m
Cinta colectora gruesa	2.137	8,548	3,162,760	m
Diodos de paso	3	12,000	4,440,000	pzas

VI.3 Capacidad de producción de empresa mexicanas para cubrir la adición anual de 370 MW proyectada para la próxima década

De todos los materiales requeridos para el ensamble del MFV, no se cuenta con fabricantes mexicanos para la purificación de la sílice y obtención del polisilicio, obleas y celdas. Tampoco se tiene fábricas que elaboren cintas metálicas colectoras, EVA ni TEDLAR, diodos de paso ni cajas de conexión.

A pesar de que el EVA y el Tedlar no son fabricados en territorio nacional, hay empresas mexicanas que manufacturan diversos tipos de polímeros y ofertan productos similares a los requeridos en la ISFV (ver secciones V.3.3 y V.3.4). Dichas empresas, contando con los paquetes tecnológicos apropiados (provenientes de productores extranjeros), podrían migrar hacia la fabricación de los polímeros EVA y Tedlar.

Por otra parte, hay algunos componentes que sí son fabricados de forma nacional, entre ellos se encuentran los dos materiales más abundantes en el ensamble del MFV: el vidrio y el perfil de aluminio; para los cuales se tiene una capacidad técnica y de producción nacional suficiente para cubrir el requerimiento de 370 MW de MFV anuales.

En el caso del vidrio plano frontal, el productor más grande actualmente es la compañía Vitro, la cual, produce más de 266 millones de metros cuadrados de este tipo de vidrio anualmente (VITRO, 2019); el requerimiento para fabricar 370 MW de MFV es de apenas 2.4 millones de m², lo cual, representa el 0.9 % de la producción anual de Vitro.

Para el caso del marco del aluminio, se tomará como ejemplo la empresa ALUMINICASTE, la cual, se especializa en la fabricación de ángulos y extrusión de aluminio, con una capacidad de producción anual de 120,000 toneladas. Considerando el dato publicado por CONALUM en su catálogo de perfiles de aluminio (CONALUM, 2019), un marco de aluminio anodizado de aleación T6063, apropiado para MFV, tiene un peso de 301 gramos por metro lineal, por lo tanto la empresa podría llegar a fabricar cerca de 400 millones de metros de ángulo de aluminio. El requerimiento para cubrir 370 MW de MFV es de solo 7.7 millones de metros lineales, lo que representa el 1.9 % de la capacidad de producción del fabricante en cuestión.

Para el caso de los conductores eléctricos, aunque en México hay múltiples empresas que fabrican cables para instalaciones eléctricas, solo algunas de ellas ofertan cables apropiados para aplicaciones fotovoltaicas. Dos de las empresas mexicanas que ofertan este tipo de cable son: CONDUMEX y VIAKON, ambas, reconocidas como dos de las más grandes productoras nacionales de cable de cobre y aluminio. Las demás empresas identificadas tienen la capacidad de procesamiento de cobre suficiente como para migrar hacia la elaboración de cable solar siempre y cuando adecuen las características del aislante para que el producto pueda ser expuesto a rayos UV y a temperaturas de hasta 90 °C.

Realizando un simple cálculo, para 370 MW de módulos de 300 Watts, se requerirían aproximadamente 2,400 km de cable, que podría ser manufacturado por dichas empresas sin ningún problema. En este caso la labor sería convencer a dichos productores de que es importante abastecer el mercado fotovoltaico para no depender de producto extranjero. Sin embargo, cabe remarcar que, a pesar de que las empresas antes mencionadas tienen la capacidad técnica y de producción suficiente para participar en el abastecimiento de la ISFV, existe un interés casi nulo de su parte para atacar este nicho de mercado.

Otro producto importante de cobre durante el ensamble del MFV son las cintas colectoras necesaria para unir las celdas que integran el MFV, las cuales no se producen en México. Sin embargo, dentro del país se cuenta con grandes fabricantes de cables y conectores de cobre (ver Sección V.4.3) que ofertan entre sus productos algunos materiales similares, e incluso más elaborados, como: trenza rígida plana de cobre, trenza flexible, soguillas de filamento trenzado, filamentos de cobre, etc.; por lo que, migrar parte de su capacidad de procesamiento de cobre hacia la fabricación de cintas colectoras para aplicaciones FV, podría no representar mayores dificultades técnicas.

En el caso de la caja de conexión en el circuito de salida del MFV y los conectores MC4, se requiere de empresas mexicanas asociadas a la Fabricación de polímeros con la característica que deben ser eléctricamente aislante con tensiones a 2,000 V y resistentes a una temperatura de 90 °C y a los rayos solares. Se detectaron empresas que podrían fabricar estos productos y lo que se debe hacer es plantearles el nicho de negocio junto con los demandantes de estos productos para que se pueda impulsar la implementación y puesta en marcha de dichas empresas en el sector de negocio considerado.

Por último, en México no se producen diodos de paso. No obstante la elaboración de estos productos electrónicos iría de la mano con la puesta en marcha de una planta de refinamiento de sílice para la obtención del polisilicio, pues, dicho producto, dependiendo de su grado de pureza, no solo sirve para la manufactura de lingotes y obleas de Si, sino también para la manufactura de componentes electrónicos como los diodos de paso.

Ahora bien, dentro de las componentes que integran al SFV, la más abundante en la instalación es el riel de Aluminio extruido especial tipo PLP (Preformed Line Products) como el del fabricante Preformados de México, dicho riel tiene un peso aproximado de 1.48 kg/m (para extruido tipo PLP P8). La misma compañía del ejemplo anterior (ALUMINICASTE) tiene una capacidad técnica para procesar 120,000 toneladas de Aluminio al año, lo cual significa que puede fabricar 81 millones de metros del perfil en cuestión. El requerimiento de material para instalar 370 MW de MFV, es de aproximadamente 6 millones de metros, lo cual representa únicamente el 7.4 % de la capacidad de producción de ALUMINICASTE.

El resto de los componentes del MFV y el SFV que son fabricados en México (tornillería, tubería, soportería, etc.), no se requieren en volúmenes tan grandes como los de los ejemplos anteriores, por lo que, las empresas mexicanas productoras respectivas de cada producto alcanzarían a cubrir el requerimiento anual proyectado de forma satisfactoria.

VI.4 Costos involucrados en la ruta crítica del Si y los sectores de la industria a los que les corresponde cada etapa de su cadena de fabricación

VI.4.1 Extracción de la sílice

En esta etapa el nicho de oportunidad es de la industria minera mexicana para que participe en el suministro de la sílice. Como se menciona en la Tabla 27, la producción de sílice en territorio nacional ascendió a 4.61 Mton anuales durante 2018 (último dato reportado, con un valor de producción de 901.3 millones de pesos (2018) (Subsecretaría de Minería, Edición 2019), lo que significa un valor de producción por tonelada de sílice de \$5,125 pesos (2018).

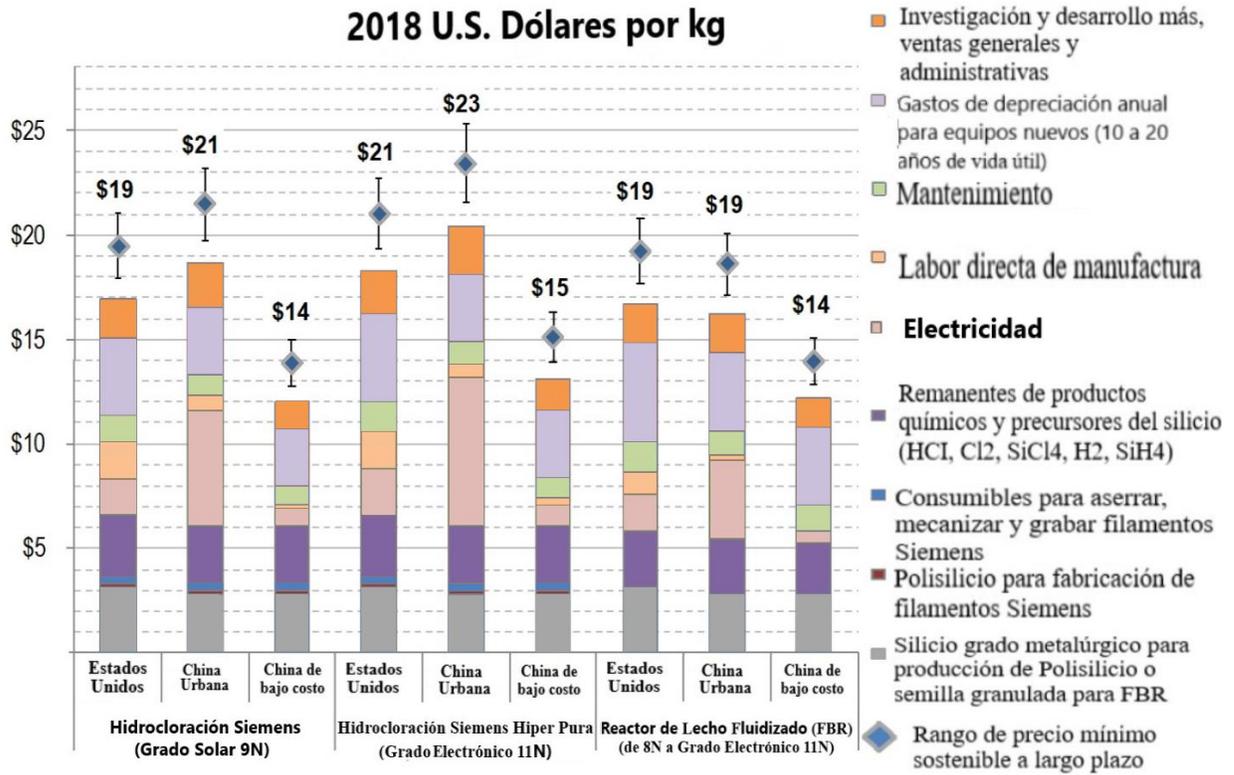
Tabla 27.- Se muestra la producción de sílice en territorio nacional durante los últimos años y el valor monetario que representa (Subsecretaría de Minería, Edición 2019).

Producción de silicio en territorio nacional					
Año	2014	2015	2016	2017	2018
Millones de Toneladas	2.54	1.74	3.17	2.69	4.61
Valor de la producción (millones de pesos, 2018)	1,243.30	851.2	1,548.40	518.3	901.3

Desafortunadamente se desconocen los costos de extracción de esta materia prima, dichos datos no se encuentran de manera pública en los portales de la secretaría de minería nacional ni en reportes gubernamentales.

VI.4.2 Purificación de la sílice

En la siguiente gráfica se pueden apreciar los costos involucrados en la obtención del polisilicio grado solar y grado electrónico, de igual manera, se muestra el precio mínimo de venta con el que la producción sería sostenible a largo plazo.



Gráfica 8.- Se muestran los costos involucrados en la producción del polisilicio, ya sea mediante el uso de Reactor Siemens o Reactor de Lecho Fluidizado (FBR) (NREL, 2018, revisión 2020).

En la Sección IV.3 se analiza el proceso de purificación en donde el nicho de oportunidad es para la industria químico-metalúrgica, y con relación a los costos para obtener polisilicio grado solar, la Gráfica 8 presenta la magnitud de éstos en términos de la purificación de 1 kg de arena de sílice, considerando el estado del arte del 2018 y una planta con una capacidad de producción de 15,000 Mton por año.

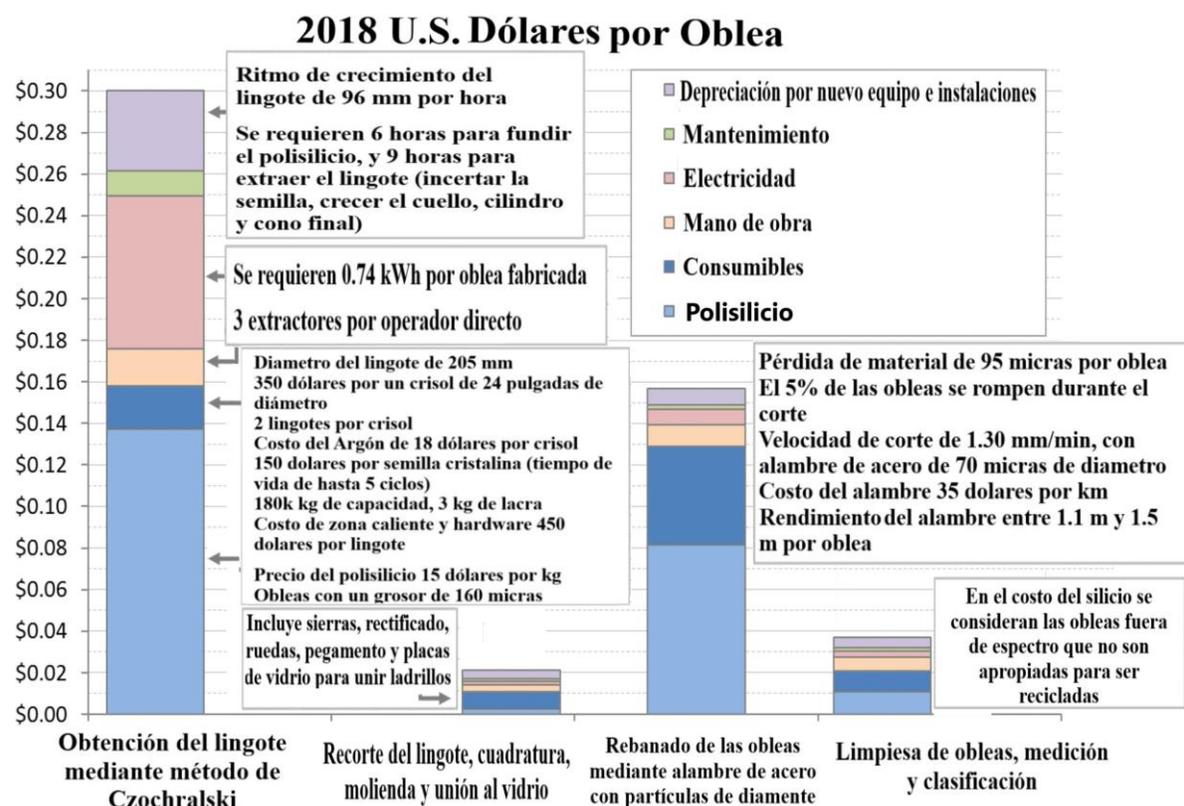
Un estudio realizado durante el 2016 por la Universidad de Salamanca, España, estimó que, para una planta de producción de polisilicio grado solar, con una capacidad de producción máxima de 2,500 toneladas anuales, se necesitaría una inversión inicial de 63 millones de euros, moneda del 2016, equivalentes a 72.1 millones de dólares del 2020, con un periodo de recuperación de la inversión de 3.2 años (Martin, 2016). Considerando que, una celda FV de 15.6 cm x 15.6 cm de Simono requiere del orden de 16 g de polisilicio (ya contando pérdidas durante todos los procesos de rebanado del lingote y de la oblea), con una tonelada de este material se pueden fabricar 1,041 MFV de 60 celdas cada uno, si se considera una potencia nominal de 250 W/MFV, la planta refinadora podría producir el Si suficiente para fabricar 260.42 kW de MFV por tonelada para un total de 651.042 MW por año. Haciendo una comparación con los datos publicados por la SENER, esto

representa una producción superior a lo requerido para cubrir la demanda anual de 370 MW proyectada para la ISFV, por lo que, el excedente podría ser exportado permitiéndole a México participar en el mercado FV mundial actual.

Las cifras anteriores representan un punto inicial de partida para motivar a industriales mexicanos en este sector para que participen en este nicho de mercado satisfaciendo la demanda nacional de Si purificado para celdas solares y los excedentes podrían considerarse para el mercado FV internacional.

VI.4.3 Crecimiento de lingotes de Si y obtención de obleas

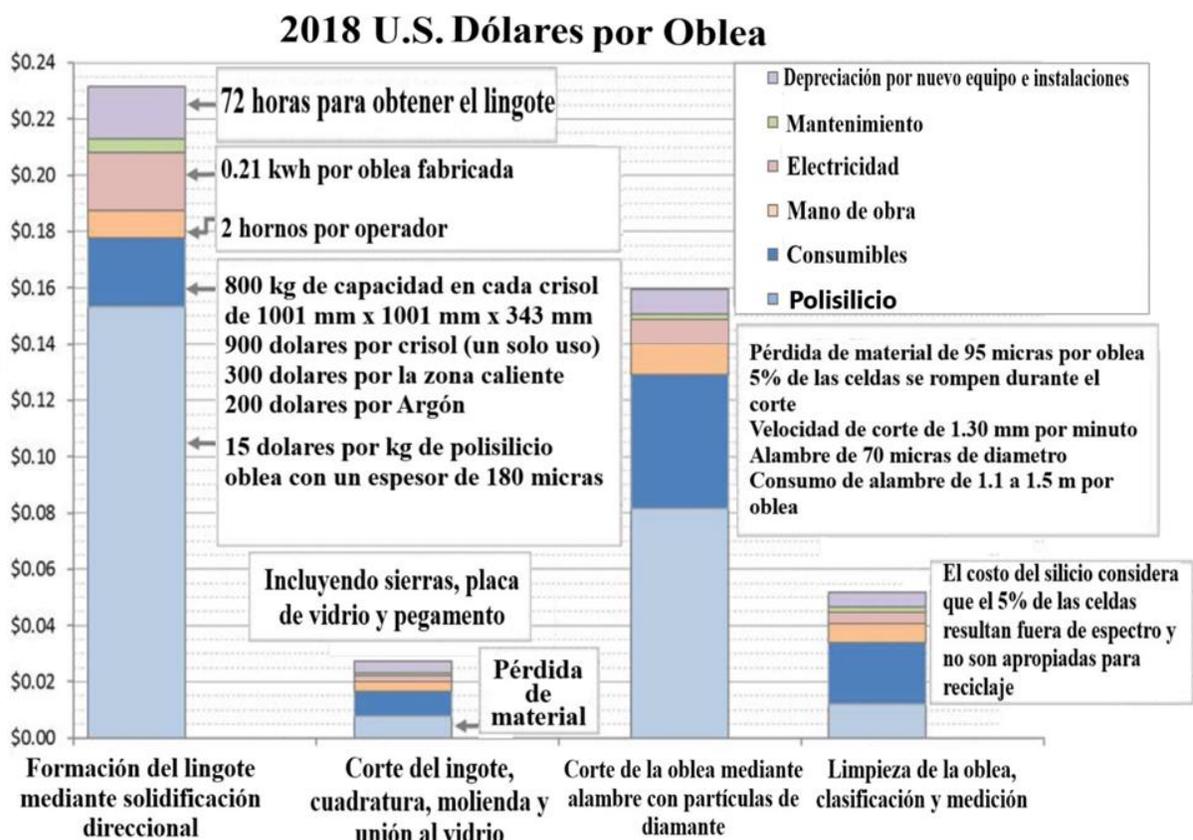
El polisilicio grado solar tiene que convertirse en lingotes a los que se le adiciona boro para que el producto resultante sea un Si tipo P (si se le adiciona fosforo el producto resultante es un Si tipo N). Para esto, el polisilicio grado solar se debe fundir para llevar a cabo la solidificación y obtención de lingotes mediante dos procesos: el método Czochralski que conlleva a la elaboración de lingotes de Si-mono de forma cilíndrica; y el proceso de solidificación rápida (casting) que se realiza en crisoles de grafito de forma de paralelepípedo rectángulo, conllevando a la elaboración de lingotes de Si-poli de sección transversal cuadrada. En este proceso, la industria que puede estar interesada es la metalúrgica.



Gráfica 9.- Se muestran los costos en la manufactura del lingote de Si-mono y el rebanado de las celdas de 156 mm x 156 mm (NREL, 2018, revisión 2020).

Los lingotes tienen que ser rebanados para obtener obleas con espesores no mayores a 200 micras, y para esto, se requiere de tecnología de corte para dicho proceso. Nuevamente este es un nicho de oportunidad para la industria metalúrgica. Las Gráficas 9 y 10 muestran los costos

asociados a las etapas de crecimiento del lingote y rebano de obleas para procesamiento de celdas de 5.2 W, suponiendo una planta con una capacidad de manufactura de 1.0 GW, para obleas de 244 cm² (formato M2) con un espesor de 160 μm para Si-mono y de 246 cm² de 180 μm de espesor para Si-poli. Se calcula que dichas obleas tengan un consumo de 16 g de polisilicio neto por oblea Si-mono y de 17.2 g por oblea Si-poli (considerando las pérdidas de material durante el proceso de rebano en ambos casos), y un consumo eléctrico de 0.86 kWh de electricidad total por oblea Si-mono y de 0.35 kWh por oblea Si-poli.



Gráfica 10.- Se muestran los costos en la manufactura del lingote de Si-poli y el rebano de las celdas de 156 mm x 156 mm (NREL, 2018, revisión 2020).

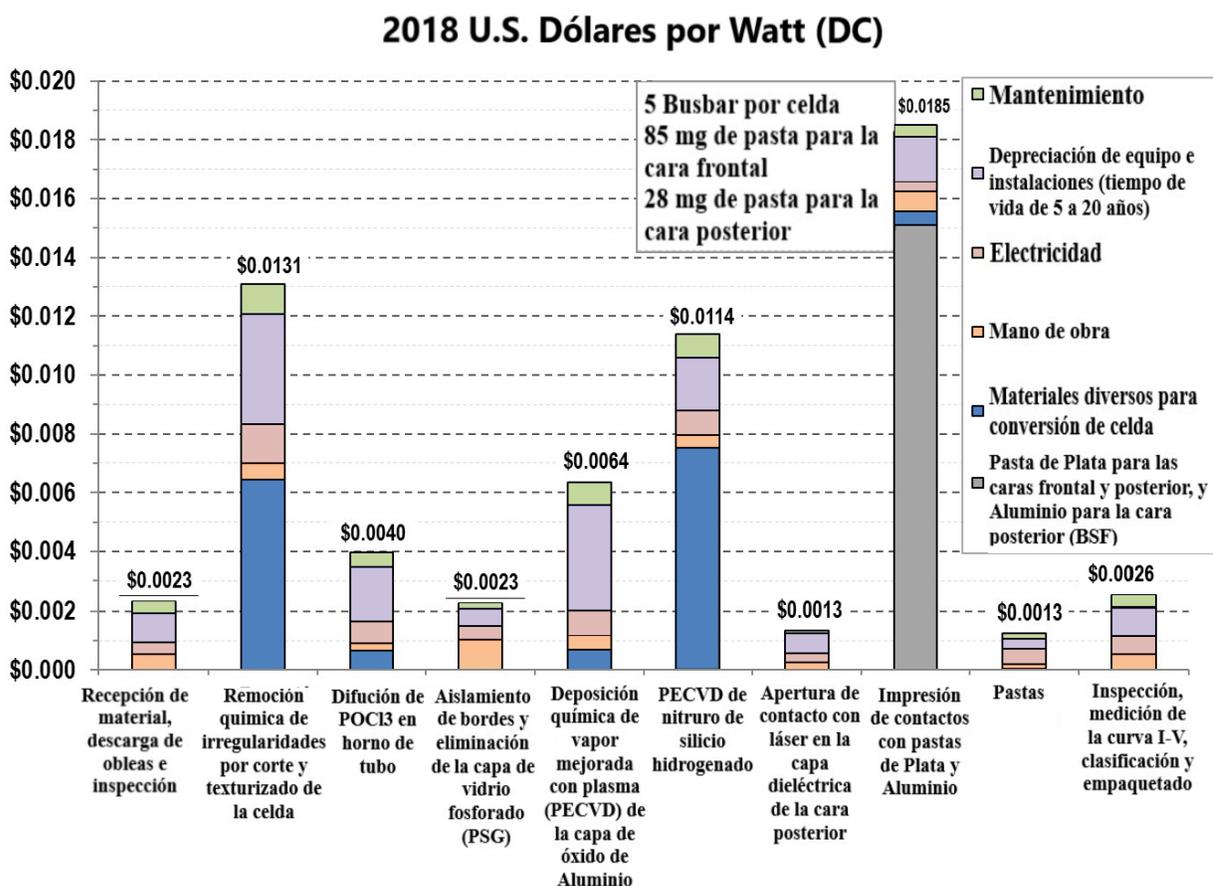
Como se puede observar en las Gráficas 9 y 10, el costo de fabricación resultante por oblea asciende a usd\$0.53 para tecnología Si-mono (obleas de 244 cm²) y usd\$0.49 para tecnología Si-poli (obleas de 266 cm²) (NREL, 2018, revisión 2020).

La compañía China LONGi Solar, mayor productor de lingotes y obleas de Si-mono a nivel mundial, tiene proyectada, para finales del 2020, la culminación de una nueva planta para la fabricación de lingotes y obleas de Si-mono con una capacidad de producción anual de 10 GW, la cual, representará una inversión de aproximadamente 322 millones de euros, moneda del 2019 (Roca, 2019), equivalentes a 364.57 millones de dólares del 2020, lo que significa una inversión inicial de usd\$0.0364/W aproximadamente. En el caso del requerimiento anual proyectado por la SENER, se pretende que la demanda de material FV valla desde los 300 hasta los 500 MW a lo largo de la próxima década (370 MW anuales en promedio), por lo tanto, bastaría con implementar una

planta 20 veces menor a la de este ejemplo, con capacidad para procesar, anualmente, 1,538.5 toneladas de polisilicio aproximadamente y producir 500 MW anuales de obleas de 5.2 W. Considerando el mismo costo de inversión de $\text{usd}\$0.0364/\text{W}$, la inversión inicial para esta planta de crecimiento de lingotes y rebanado de obleas de Si cristalino sería de aproximadamente $\$18.2$ millones de dólares (2020), con un tiempo de retorno de la inversión de 1 año aproximadamente (considerando los precios promedio de venta de las obleas en el mercado actual y la venta total del producto manufacturado).

VI.4.4 Procesamiento de las celdas solares

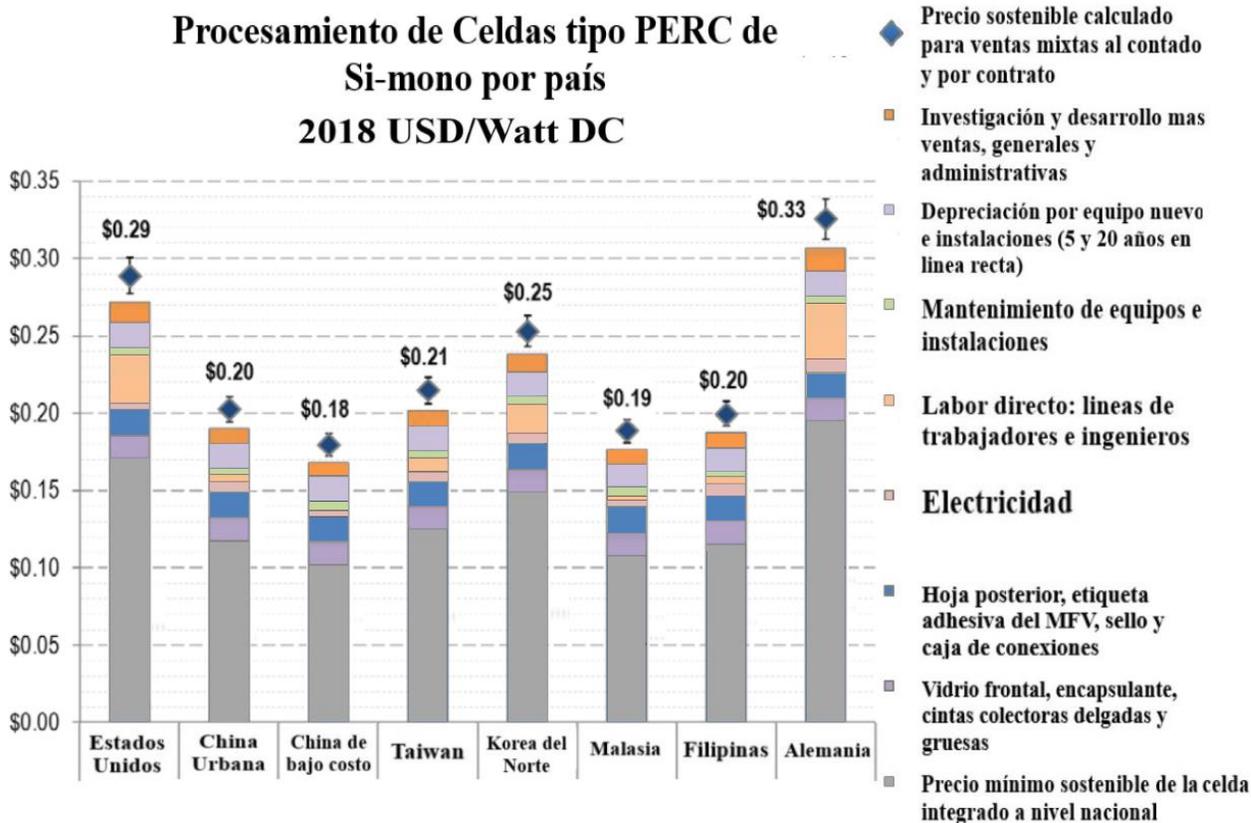
Ya teniendo las obleas con conductividad tipo P, se debe realizar limpieza y texturización de superficies, para posteriormente difundir fósforo en hornos de alta temperatura y obtener la unión PN. Seguidamente, en la parte posterior se realiza un proceso de serigrafía de Aluminio y su posterior difusión térmica, y sobre el Aluminio una capa de Plata para tener el contacto eléctrico posterior que será la terminal positiva de la celda. Por la parte frontal se depositan por evaporación térmica o serigrafía las rejillas de colección y las barras de conducción para el contacto eléctrico frontal que será la terminal negativa de la celda. Aquí la oportunidad puede ser para la industria metalúrgica y la de semiconductores ya que, aunque el proceso parece ser simple, se requiere de una industria de alta especialidad en el manejo de semiconductores y de los procesos antes dichos. Los costos involucrados en las etapas de este proceso se muestran en la Gráfica 11.



Gráfica 11.- Se muestran los costos involucrados en las etapas del procesamiento de celdas PERC de Si-mono (NREL, 2018, revisión 2020).

Los datos mostrados en la Gráfica 11 representan los resultados de un análisis que supone una planta en campo abierto con una capacidad de 1.0 GW para procesar obleas Si-mono tipo P de 156 mm x 156 mm en celdas FV con una eficiencia del 21.5 %. El costo por procesamiento de celdas Si-mono PERC en el estudio citado es de usd\$0.0632/Watt, sin embargo, solo se consideran los costos asociados al procesamiento. La Gráfica 12 muestra los costos del procesamiento de celdas en diversos países considerando los mismos aspectos que la Gráfica 11 más el costo nacional de cada región para la elaboración de obleas, resultando en usd\$0.19/Watt (en CD) para la China Urbana.

Un estudio presentado por la Sociedad Internacional de Energía Solar (ISES, por sus siglas en inglés) en el 2017, presenta las siguientes cifras: para montar una planta con una capacidad de producción de 1.0 GW para el procesamiento de celdas solares con tecnología PERC, en la cual, las obleas de Si cristalino (156 mm x 156 mm) se compran ya rebanadas, la inversión inicial requerida en este estudio sería de 130 millones de dólares (2017) para procesar celdas Si-poli (equivalente a usd\$138.37 millones de dólares del 2020) y de 125 millones de dólares (2017) para celdas Si-mono (equivalente a usd\$133.05 millones de dólares del 2020) (Kumar, Bieri, Riendl, & Aberle, 2017).



Gráfica 12.- Se muestran los precios del procesamiento de celdas FV para diferentes países, considerando el costo nacional de cada región para la elaboración de obleas de Si cristalino (NREL, 2018, revisión 2020).

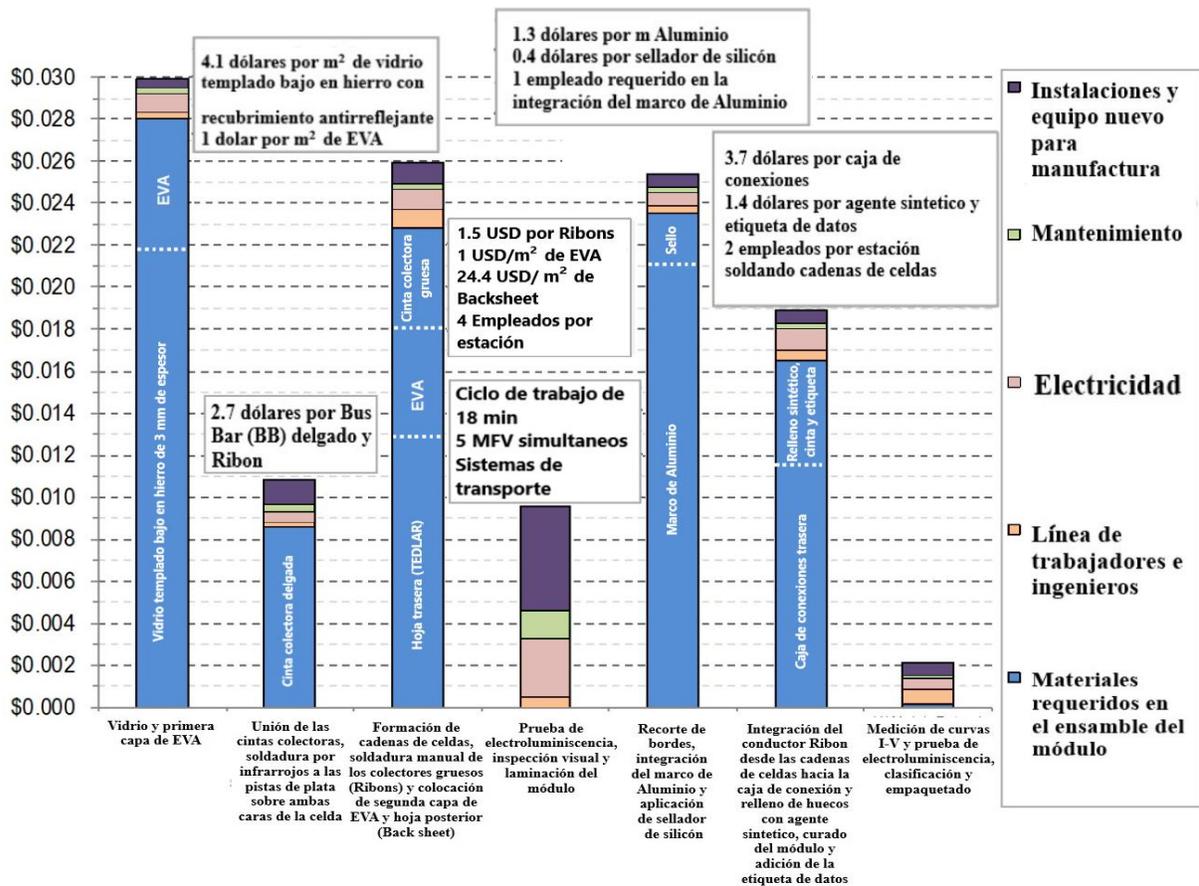
Para cubrir el requerimiento de material proyectado por la SENER para la ISFV mexicana de la próxima década, bastaría con implementar una planta de procesamiento de celdas de Si-mono con una capacidad de producción de 500 MW anuales (la mitad de la capacidad de producción de la planta de este estudio). Bajo este supuesto la planta tendría un costo de usd\$66.525 millones (2020) con un tiempo de retorno de la inversión de 4.5 años aproximadamente (considerando los precios

promedio de venta de las celdas FV en el mercado actual y la venta total de las celdas procesadas, en parte para satisfacer el requerimiento anual de la ISFV mexicana y el resto en el mercado FV mundial). Esta planta podría producir 96 millones de celdas anualmente, suficiente para ensamblar 1.6 millones de MFV de 60 celdas. Como se puede apreciar en la Sección VI.2, el requerimiento para cubrir la demanda anual proyectada por la SENER es de 1.48 millones de MFV de 60 celdas con una potencia nominal de 250 W, por lo que, con la implementación de esta planta se cubriría perfectamente el requerimiento proyectado.

VI.4.5 Ensamble del MFV de Si cristalino

El MFV es un producto integrado por un vidrio templado, capas de dos polímeros diferentes (PVF y EVA), terminales y diodos de paso para el circuito de salida, una caja de conexiones y un marco metálico de aluminio. De igual manera, su elaboración requiere de insumos de otras industrias como la del vidrio, metalúrgica para el marco de aluminio, plásticos o polímeros (etil-vinil-acetato, tedlar), la de semiconductores (suministro de diodos), la de los cables (suministro de conductores eléctricos).

2018 U.S. Dólares por Watt (CD)

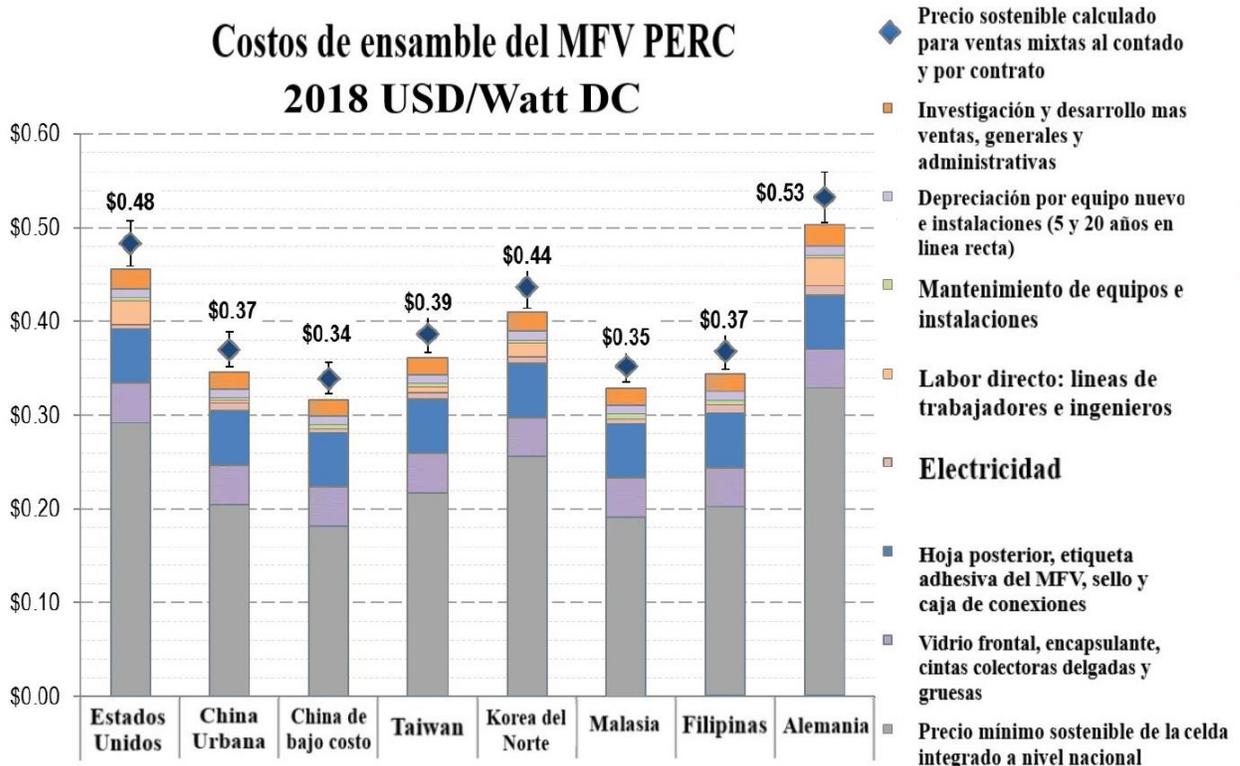


Gráfica 13.- Se muestran los costos de material en el ensamble del MFV de tecnología Si-mono PERC (NREL, 2018, revisión 2020).

Los datos en la Gráfica 13 suponen una planta con una capacidad de producción para 1.0 GW anual de módulos con una potencia de 310 W integrados por 60 celdas de Si-mono PERC de 156 mm x 156 mm (sin considerar el valor monetario de la celda FV).

El costo en el ensamble del MFV en la gráfica anterior es de $\text{USD}\$0.205/\text{Watt}$ sin considerar el costo de la celda. El mayor valor asociado a este proceso es para el vidrio templado seguido por el marco de aluminio, ambos materiales producidos en México con el volumen suficiente para cubrir la demanda anual de 370 MW proyectada por la SENER para la próxima década. En la Gráfica 14 se muestra una relación entre los costos de producción de MFV con las mismas características físicas y eléctricas, en diversos países, incluyendo el costo por las celdas FV.

La industria mexicana para el ensamble del MFV tiene una capacidad de producción aproximada de 900 MW anuales (considerando únicamente las 9 empresas ensambladoras más significativas), suficiente para cubrir el requerimiento de material para satisfacer las adiciones anuales a la CIFV nacional, proyectadas para la próxima década.



Gráfica 14.- Se muestran los costos para el ensamble del MFV para diferentes países, considerando equipos con una eficiencia promedio de 19 %, constituidos por 60 celdas de 19.5 % de eficiencia (NREL, 2018, revisión 2020).

VI.4.6 Integración del SFV

Como se ha dicho anteriormente, el SFV se compone de un AFV, dispositivos que permiten acoplar los MFV a las cargas, comúnmente integrados en un concepto llamado BOS (inversores, seguidores de máxima potencia, controladores de carga, almacenamiento de energía), y las cargas eléctricas. Aquí pueden participar prestadores de servicio como pueden ser arquitectos, ingenieros eléctricos, ingenieros en energías renovables, ingenieros civiles; además de la industria de cables,

metal mecánica para las estructuras y elaboración de gabinetes; industria de plásticos para la elaboración de cajas; industria de la electrónica (para la elaboración de inversores, controladores de carga, seguidores de máxima potencia); la industria de las baterías (para la elaboración de acumuladores eléctricos). En las Tablas 28 y 29 se pueden apreciar los costos aproximados para los SFV en función de su potencia instalada para nuestro país.

Como se puede observar en la Tabla 29, la mayor inversión está relacionada con los MFV y los inversores. Se debe aclarar que, en una instalación FV, no se debe tratar de reducir costos mediante la implementación de MFV e inversores más baratos podría resultar contraproducente, ya que, este tipo de equipo generalmente se degrada más rápido y tiene más pérdidas de potencia asociadas a las condiciones de temperatura ambiente, lo cual, puede representar gastos incluso más grandes a largo plazo, que los reflejados por los equipos más costosos.

Tabla 28.- Se muestran los precios para los SFV de interconexión, dentro de territorio nacional, en función de su potencia instalada (ASOLMEX, AMIF, ANES, GIZ, & GmbH, 2020).

Precio por instalación	
Rango kWp	USD/Wp
0-2.5	1.4
2.5-5	1.3
5-15	1.3
15-30	1.2
30-50	1.2
50-100	1.2
100-250	1.1
250-500	1.0

Tabla 29.- Se muestran los precios para los SFV de interconexión, dentro de territorio nacional, por componente y en función de su potencia instalada (ASOLMEX, AMIF, ANES, GIZ, & GmbH, 2020).

Desglose de precios para instalaciones fotovoltaicas USD/Wp								
Componente	Rangos de potencia kWp							
	0-2.5	2.5-5	5-15	15-30	30-50	50-100	100-250	250-500
Paneles	0.45	0.35	0.40	0.43	0.43	0.55	0.49	0.31
Inversores	0.28	0.24	0.22	0.19	0.19	0.23	0.21	0.10
Estructuras	0.13	0.21	0.19	0.17	0.13	0.41	0.23	0.24
Material eléctrico	0.11	0.19	0.17	0.10	0.10	0.11	0.11	0.10
Mano de obra	0.13	0.20	0.18	0.13	0.10	0.10	0.11	0.08
Accesorios	0.07	0.13	0.12	0.08	0.06	0.03	0.06	0.02
Margen adicional (costos indirectos y contingencias)	0.09	0.27	0.30	0.62	0.24	0.15	0.34	0.16
Unidad verificadora de instalaciones eléctricas (UVIE)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.04	0.23	0.03
Unidad de inspección eléctrica (UIE)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.04	0.23	0.03

VI.5 Conclusión

El incremento sostenido de la demanda de TSFV en todo el orbe durante la última década ha causado un incremento a nivel mundial en la demanda de polisilicio y celdas de Si cristalino para aplicaciones fotovoltaicas, creando una oportunidad de mercado para nuevos fabricantes de Si grado metalúrgico, polisilicio grado solar, obleas y celdas FV de Si cristalino. Las secuencias tecnológicas para la obtención de polisilicio grado solar y celdas de Si cristalino están muy estudiadas a nivel mundial: el proceso metalúrgico, los insumos necesarios, la energía eléctrica consumida, los agentes reductores para las reacciones químicas, el consumo de agua y demás requerimientos, están minuciosamente definidos y cuantificados. Por lo que, es posible comprar paquetes tecnológicos extranjeros especializados para llevar a cabo dicho proceso en territorio nacional puesto que se tienen yacimientos ricos de sílice.

Lo anterior es factible ya que aún no existe opción tecnológica mexicana que haya sido desarrollada a partir de conocimientos científicos de origen nacional.

Desde un punto de vista estrictamente técnico, la implementación de plantas para: refinamiento de polisilicio, crecimiento y rebanado de obleas, y procesamiento de celdas, parece ser viable dentro de territorio nacional. México tiene una extracción minera constante de sílice y los equipos e insumos de las planta no son particularmente de difícil acceso; lo que deja como único obstáculo el aspecto financiero donde, las grandes sumas de dinero que corresponden a la inversión inicial serían la única limitante.

La información proporcionada en este capítulo que es tomada mayormente de fuentes extranjeras, indican que los montos de inversión aunque sean considerablemente grandes, tienen tiempos de recuperación relativamente cortos siempre y cuando la demanda del producto esté garantizada, es decir, que las perspectivas de demanda realizadas por la SENER, realmente se conviertan en una realidad, y claro, para que se logre esto se deben de incluir acciones que conlleven al fomento y financiamiento de los diferentes sectores sociales que demanden el uso de la TSFV.

Conclusión General

En el presente trabajo se ha desarrollado un estudio tanto del mercado potencial como la cadena de fabricación asociada a los SFV para generación distribuida. Se analizó desde lo que es el fenómeno FV, las TSFV y el estado del arte actual de estas, su integración en placas FV comúnmente llamados MFV y el proceso de fabricación de estos. Se identificaron aspectos tan importantes como lo son la tecnología de mayor venta y la manera en que se obtiene el material base que constituyen las celdas solares que la integran.

Posteriormente se detalla a fondo el proceso de obtención del polisilicio, el lingote, la oblea y la celda FV. Se habla del estado del arte de las celdas a base de Si cristalino y la evolución de su eficiencia con respecto del tiempo.

En base a toda esta información recabada, se concluye que el proceso de obtención para el polisilicio y sus derivados está minuciosamente definido y no hay impedimento tecnológico que le

impida a México producir su propio polisilicio, lingotes, obleas y celdas fotovoltaicas, siendo el único obstáculo el aspecto económico que representan las inversiones iniciales para la puesta en marcha de plantas productoras o la compra de derechos de patente y paquetes tecnológicos a productores extranjeros.

Se analizó y cuantificó el mercado potencial del uso de la TSFV en el ámbito de los SFV para generación distribuida y la proyección gubernamental que se tiene para este tipo de aplicación. Con los datos vertidos se ha estimado un mercado potencial para el uso de la TSFV para dichas aplicaciones en 370 MW anuales, y con esta demanda proyectada se ha desarrollado el estudio relacionado a la cuantificación de insumos, partes y componentes que integran a un MFV y a un SFV, así como la viabilidad para que los MFV sean fabricadas dentro del territorio nacional mediante el uso exclusivo de insumos manufacturados nacionalmente.

Se cuantificó el material que será requerido por la ISFV durante cada etapa de la cadena de fabricación del MFV (extracción de la sílice, obtención del polisilicio, crecimiento del lingote, rebanado de la oblea, procesamiento de la celda y el ensamble del MFV) y el montaje y puesta en marcha de un SFV de 1.0 kW. Dado que esta información es escalable, es posible usar esta cuantificación para evaluar el requerimiento de material en SFV más grandes, incluyendo el requerimiento de 370 MW anuales proyectado por la SENER para la próxima década.

Se identificaron las empresas mexicanas que tienen la capacidad técnica y de producción suficiente para fabricar dichos componentes sin depender de insumos o mano de obra extranjera pues, todos estos productos, siguen siendo importadas de países como China, Corea, Alemania y USA. En esta sección se concluye que, sí hay empresas que fabrican gran parte de los insumos requeridos para el ensamble del MFV, sin embargo, dichas empresas, en general, están enfocadas a atacar otros nichos de mercado ajenos al sector solar FV.

Se analizó el potencial que tienen las empresas mexicanas para fabricar las partes y componentes que requerirá la ISFV para cubrir el requerimiento de 370 MW anuales durante la próxima década. Con base en la información recabada, se concluye que las empresas mexicanas que producen componentes equivalentes a las requeridas durante el ensamble del MFV, sí tienen la capacidad técnica y de producción suficiente para cubrir el requerimiento anual de 370 MW que la ISFV tiene proyectado. Por otra parte, en el caso de aquellos componentes requeridos durante el ensamble del MFV que no son fabricados dentro de México, como el EVA, el TEDLAR y las cintas colectoras, se ha determinado que las empresas mexicanas que fabrican productos similares podrían migrar hacia la manufactura de estos productos si contaran con los paquetes tecnológicos correspondientes (obtenidos de fuentes extranjeras).

Hoy en día el conocimiento y la tecnología están a un clic de distancia, los procesos para fabricar EVA, TEDLAR, polisilicio, obleas y celdas están perfectamente estudiados y cuantificados por productores extranjeros, de manera que el conocimiento puede ser obtenido al comprar los derechos de patente o adquiriendo paquetes tecnológicos como líneas de producción en las que el proceso de elaboración de un componente en particular está totalmente automatizado. La realidad es que dentro del país no hay limitante técnica que impida la fabricación de los componentes del MFV, incluyendo los polímeros, el Si y sus derivados (polisilicio, obleas y celdas), dejando como único obstáculo el aspecto económico.

Por último, para el caso de los SFV, los componentes que se requieren en mayor volumen durante su integración, como son: aluminio extruido, tubería, tornillería, conductores eléctricos y soportería, sí son producidas en México de manera suficiente para cubrir el requerimiento de material de forma satisfactoria. No obstante, los inversores, desconectores y protecciones eléctricas para corriente continua siguen siendo fabricados únicamente fuera del país.

El principal motivo de esta tesis ha sido para usarla como punto de apoyo para despertar el interés de inversionistas y productores nacionales para que inviertan en la manufactura de los componentes que integran el MFV y el SFV, y de esta manera, asegurar la autosuficiencia de la ISFV mexicana.

Con base a la información obtenida de fuentes extranjeras, se estima que la implementación de plantas de manufactura para refinación de Si, crecimiento de lingotes y rebanado de obleas, procesamiento de celdas solares y ensamblamiento de MFV, tengan los siguientes costos (moneda del 2020): en el caso de una planta de purificación de polisilicio con una capacidad de producción de 2,500 toneladas anuales se estima un costo de usd\$72.1 millones, con un tiempo de retorno de la inversión de 3.2 años; para el caso de una planta de crecimiento de lingotes y rebanado de obleas de Si-mono con una capacidad de producción de 500 MW anuales se estima un costo de usd\$18.2 millones con un tiempo de retorno de inversión de 1 año aproximadamente; por último, para la implementación de una planta de procesamiento de celdas FV con una capacidad de producción anual de 500 MW anuales, se estima una inversión de usd\$66.52 millones con un tiempo de retorno de la inversión estimado de 4.5 años. Considerando la implementación de las 3 plantas, el monto total para la inversión inicial es de usd\$156.82 millones.

Uno de los mayores inconvenientes, desde mi punto de vista, es que, a pesar de que México cuenta con yacimientos abundantes de sílice, no se produce el polisilicio de forma nacional, debido, principalmente, a que la inversión inicial para montar plantas que fabriquen este producto es relativamente alta. Es posible que los industriales mexicanos no consideren atractivo invertir en esta manufactura pues se tendría que competir directamente con el mercado Chino, el cual, le lleva a México varios años de ventaja. Este podría ser el eslabón de la cadena de fabricación más difícil de resolver en nuestro país, sin embargo, si se lograra que en México se manufacturase este producto, se reforzaría toda la ruta crítica del Si para aplicaciones fotovoltaicas pues, podría ser más atractivo, para las empresas mexicanas, apostar por la fabricación de lingotes y obleas, lo cual impulsaría el procesamiento de celdas y a su vez fortalecería la manufactura de MFV.

Si se logra convencer a las empresas mexicanas para que aprovechen su potencial al máximo y migren hacia la manufactura nacional de todas las partes y componentes que integran el MFV, se le brindaría a México la oportunidad de participar en el mercado FV mundial de forma más significativa y, de igual manera, se podría eliminar de forma paulatina la gran dependencia hacia productos de origen extranjero relacionados con la ISFV.

En conclusión, el crecimiento de la TSFV es inminente tanto en nuestro país como en el resto del mundo, la oportunidad de negocio existe y México tiene los recursos y la capacidad técnica y de producción para aprovechar este gran nicho de oportunidad y asegurar la autosuficiencia de la ISFV mexicana.

Referencias

- A. Green, M., D. Dunlop, E., Hohl Ebinger, J., & Yoshita, M. (2019). Solar cell efficiency tables (Version 55). *Progress in Photovoltaics*, 27.
- ASOLMEX, AMIF, ANES, GIZ, & GmbH. (2020). *Monitor de Información Comercial e Índice de Precios de Generación Solar Distribuida en México*. CDMX: Lishey Lavariega, Joscha Rosenbusch.
- Commission, I. E. (2016). *INTERNATIONAL ESTANDARD IEC 61730-1*. Geneva, Switzerland.
- CONALUM. (2019). *CONALUM, Fabricamos soluciones al mejor precio*. Obtenido de <http://conalum.com.mx/catalogo/67b9d9dd0aa879782a0dff7ddc847770/061eb07b0e8647e02d99c55d615b91d0b8.pdf>
- Congreso de la Unión, d. I. (24 de Diciembre de 2015). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf.
- CRE, C. R. (2019). *Evolución de Contratos de Pequeña y Mediana Escala*. CDMX.
- EUROPE, S. (2018). *Sunfields*. Obtenido de <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/paneles-solares-de-alto-rendimiento-tecnologia-celulas-perc/>
- Gifford, J. (2017). Momentum Builds for HJT. *pv magazine*. Recuperado el Enero de 2020, de <https://www.pv-magazine.com/magazine-archive/momentum-builds-for-hjt/>
- GOE. (23 de 08 de 2013). *Gestión de Operaciones*. Recuperado el 20 de 08 de 2020, de <https://www.gestiondeoperaciones.net/proyectos/como-obtener-la-ruta-critica-de-un-proyecto-critical-path-method/>
- Gostein, M., Littmann, B., Caron, R., & Dunn, L. (2013). Comparing PV Power Plant Soiling Measurements Extracted from PV.
- Gou, X., Lin, K., & Li, Y. (2019). *Carbon footprint of the photovoltaic power supply chain in China*. ELSEVIER.
- Hutchins, M. (25 de Junio de 2020). Manufacturing industry seeks unity on wafer size. *pv magazine*. Recuperado el 08 de Octubre de 2020, de <https://www.pv-magazine.com/2020/06/25/manufacturing-industry-seeks-unity-on-wafer-size/>
- IEA. (2019). *Snapshot of Global PV Markets*. España: International Energy Agency.
- Independent Commodity Intelligence Services. (2013). *SOLAR-GRADE POLYSILICON*. Recuperado el 07 de 10 de 2020, de <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/cjp-rbi-icis-compliance/wp-content/uploads/2013/08/Solar-Grade-Polysilicon-Methodology.pdf>
- INEEL, I. N. (2019). *Cadena de valor de la generación distribuida fotovoltaica en México*. CDMX.
- Kumar, A., Bieri, M., Riendl, T., & Aberle, A. G. (2017). Economic Viability Analysis of Silicon Solar Cell Manufacturing: Al-BSF versus PERC. *Energy Procedia*.
- Laboratory, N. R. (Febrero de 2020). *NREL*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

- Le Comber, P., & Spear, W. (2018). Electronic properties of doped Si and Ge. *AIP Publishing*. Recuperado el 06 de 2020, de <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.30769>
- Mártil, I. (18 de Noviembre de 2016). *Público*. Recuperado el 09 de 10 de 2020, de <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2016/11/18/silicio-la-materia-prima-de-dos-revoluciones-la-electronica-y-la-energetica/>
- Martin, H. E. (2016). *ResearchGate*. Obtenido de Planta de producción de silicio de grado solar: www.research.net/publication/303336283_Planta_de_produccion_de_silicio_de_grado_solar
- NASA, L. R. (Enero de 2020). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources*. Obtenido de <https://power.larc.nasa.gov/>
- NREL, N. R. (2018, revisión 2020). *Crystalline Silicon Photovoltaic Module Manufacturing Costs and Sustainable Pricing: 1H 2018 Benchmark and Cost Reduction Road Map*.
- Philips, D. S., & Warmuth, W. (May, 2020). *Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report*.
- Pvinsights. (19 de 08 de 2020). *Pvinsights Grid the World*. Obtenido de PV Poly Silicon Weekly Spot Price: <http://pvinsights.com/indexUS.php>
- REN 21. (2020). *Global Estatus Report*. París.
- Roca, J. A. (18 de 10 de 2019). LONGi aumentará su capacidad de fabricación de módulos en 10 GW y la de celdas solares en 5 GW. *elperiodicodelaenergia.com*. Recuperado el 08 de 2020, de <https://elperiodicodelaenergia.com/longi-aumentara-su-capacidad-de-fabricacion-de-modulos-en-10-gw-y-la-de-celdas-solares-en-5-gw/>
- Roca, J. A. (28 de 11 de 2019). LONGi planea una nueva planta de producción de lingotes de silicio de 10 GW. *Elperiódicodelaenergía.com*, pág. China. Recuperado el 08 de 2020, de <https://elperiodicodelaenergia.com/longi-planea-una-nueva-planta-de-produccion-de-lingotes-de-silicio-de-10-gw/>
- Rodríguez Suárez, J. S., Espinoza Navarrete, E., Rosenbuch, J., Ortega Navarro, H. O., Martínez Fernández, D., Cedano Villavicencio, D. G., & Armenta, M. (2017). *La Industria Solar Fotovoltaica y Fototérmica en México*. CDMX.
- Sánchez Juárez, A., Martínez, D., de la Luz Magdaleno, R., Ortega Cruz, J., & Sánchez Pérez, P. A. (2017). *Aplicaciones Fotovoltaicas de la Energía Solar*. (J. T. Mazón, Ed.) CDMX.
- SENER. (2018). *Prospectiva del Sector Eléctrico Nacional*. CDMX.
- SENER. (2018). *Reporte de Avance de Energías Limpias Primer semestre de 2018*. CDMX.
- SENER. (2019). *Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional*. CDMX.
- Shubert, M. (Agosto de 2018). Las células del futuro. *PV MAGAZINE*.
- Subsecretaría de Minería, S. d. (Edición 2019). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana*. CDMX.
- SUNPOWER. (Marzo de 2019). *SUNPOWER MX*. Obtenido de <https://www.sunpowercorp.mx/es/productos-de-paneles-solares/paneles-solares-sunpower-performance>

- TRINA SOLAR. (2019). *Trina solar como funciona la energia solar*. Obtenido de <https://www.trinasolar.com/lac/about-solar/how-it-works>
- VITRO. (2019). *Reporte de Resultados del Tercer Trimestre de 2019*. CDMX.
- VOLTAICS, S. (2019). *SINO VOLTAICS*. Recuperado el Enero de 2020, de <https://sinovoltaics.com/learning-center/materials/ethylene-vinyl-acetate-eva-film-composition-and-application/>
- Yinyin, F., Xin, L., & Zengwei, Y. (2014). Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in. *Journal of Cleaner Production*.

Anexo 1

Fichas de MFV ofertados por productores nacionales

Empresa	Modelo	Celdas	Tipo de material	Eficiencia (%)	Potencia pico (w)	Largo del MFV (m)	Ancho del MFV (m)
ASSIC	-	60	Si-Poly	-	245	-	-
ASSIC	-	60	Si-Poly	-	250	-	-
ASSIC	-	60	Si-Poly	-	255	-	-
ASSIC	-	60	Si-Poly	-	260	-	-
ERDM SOLAR	ERDM 370M6 HE	72	Si-mono	18.69	370	1.98	1
ERDM SOLAR	ERDM 360M6 HE	72	Si-mono	18.18	360	1.98	1
ERDM SOLAR	ERDM 300M6 HE	60	Si-mono	18.29	300	1.64	1
ERDM SOLAR	ERDM 270M6 HE	54	Si-mono	18.4	270	1.481	0.992
ERDM SOLAR	ERDM 180M6 HE	36	Si-mono	17.48	180	1.029	1.001
IUSA SOL	IUSASOL-PV-03 130	60	Si-poly	7.9	130	1.659	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-03 150	60	Si-poly	9.1	150	1.659	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-03 170	60	Si-poly	10.3	170	1.659	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-03 260	60	Si-poly	15.7	260	1.658	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-03 265	60	Si-poly	16	265	1.658	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-03 270	60	Si-poly	16.3	270	1.658	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-04 300	60	Si-poly	18.2	300	1.658	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-01/3BB 240	60	Si-poly	14.5	240	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-01/3BB 245	60	Si-poly	14.8	245	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-01/3BB 250	60	Si-poly	15.1	250	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-01/3BB 255	60	Si-poly	15.4	255	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-01/5BB 260	60	Si-poly	15.7	260	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-01/5BB 265	60	Si-poly	16	265	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-01/5BB 270	60	Si-poly	16.3	270	1.665	0.992
IUSA SOL	275IUSASOL-PV-02	60	Si-poly	16.6	275	1.665	0.992

Empresa	Modelo	Celdas	Tipo de material	Eficiencia (%)	Potencia pico (w)	Largo del MFV (m)	Ancho del MFV (m)
IUSA SOL	IUSASOL-PV-02 285	60	Si-poly	17	280	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-02 285	60	Si-poly	17.3	285	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-05 290	60	Si-mono	17.6	290	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-05 295	60	Si-mono	17.9	295	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-05 300	60	Si-mono	18.2	300	1.665	0.992
IUSA SOL	IUSASOL-PV-05 305	60	Si-mono	18.5	305	1.665	0.992
SAECSA	-	-	Si-poly	-	100	-	-
SAECSA	-	-	Si-poly	-	150	-	-
SAECSA	-	-	Si-poly	-	260	-	-
SAECSA	-	-	Si-poly	-	320	-	-
SAECSA	-	-	Si-poly	-	150	-	-
SAECSA	-	-	Si-poly	-	130	-	-
SAECSA	-	-	Si-poly	-	200	-	-
SAYA	SAYA-P140-28	28	Si-poly	-	140	1.16	0.676
SAYA	SAYA-P180-36	36	Si-poly	-	180	1.476	0.676
SAYA	SAYA-P275-54	54	Si-poly	-	275	1.476	0.992
SAYA	SAYA-P305-60	60	Si-poly	-	305	1.64	0.992
SAYA	SAYA-P365-72	72	Si-poly	-	365	1.95	0.992
SAYA	SAYA-M165-28	28	Si-mono	-	165	1.16	0.676
SAYA	SAYA-M210-36	36	Si-mono	-	210	1.476	0.676
SAYA	SAYA-M315-54	54	Si-mono	-	315	1.476	0.992
SAYA	SAYA-M350-60	60	Si-mono	-	350	1.65	0.992
SAYA	SAYA-M420-72	72	Si-mono	-	420	1.956	0.992
SAYA	SAYA-B535-72	72	Si-mono	-	535	1.944	0.986
SOLAREVER	-	72	Si-mono	19.16	380	1.979	1.002
SOLAREVER	-	72	Si-mono	20.16	400	1.979	1.002
SOLAREVER	-	144	Si-mono	19.16	380	2	0.992
SOLAREVER	-	72	Si-poly	14.63	100	1.02	0.67
SOLAREVER	-	36	Si-poly	15.13	150	1.48	0.67

Empresa	Modelo	Celdas	Tipo de material	Eficiencia (%)	Potencia pico (w)	Largo del MFV (m)	Ancho del MFV (m)
SOLAREVER	-	36	Si-mono	16.67	165	1.48	0.67
SOLAREVER	-	60	Si-mono	16.5	270	1.64	0.99
SOLAREVER	-	60	Si-mono	16.82	280	1.64	0.99
SOLAREVER	-	72	Si-poly	16.73	325	1.956	0.991
SOLAREVER	-	72	Si-mono	17.5	340	1.956	0.991
SOLAREVER	-	72	Si-mono	17.7	345	1.956	0.991
SOLAREVER	-	72	Si-mono	18.1	350	1.956	0.991
SOLAREVER	-	72	Si-mono	18.3	355	1.956	0.991
SOLAREVER	-	72	Si-mono	18.5	360	1.956	0.991
SOLAREVER	-	72	Si-mono	18.66	370	1.979	1.002
SOLAREVER	-	72	Si-mono	18.91	375	1.979	1.002
SOLAREVER	-	72	Si-mono	19.16	380	1.979	1.002
SOLAREVER	-	72	Si-mono	18.42	385	1.979	1.002
SOLAREVER	-	72	Si-mono	19.67	390	1.979	1.002
SOLAREVER	-	36	Si-poly	14.63	100	1.02	0.67
SOLARSOL	245 SSP25	60	Si-poly	16.8	245	1.64	0.992
SOLARSOL	250 SSP25	60	Si-poly	17.2	250	1.64	0.992
SOLARSOL	255 SSP25	60	Si-poly	17.5	255	1.64	0.992
SOLARSOL	260 SSP26	60	Si-poly	17.8	260	1.64	0.992
SOLARSOL	265 SSP26	60	Si-poly	18.15	265	1.64	0.992
SOLARSOL	260 SSP27	60	Si-poly	17.8	260	1.64	0.992
SOLARSOL	263 SSP27	60	Si-poly	18	263	1.64	0.992
SOLARSOL	270 SSP27	60	Si-poly	18.5	270	1.64	0.992
SOLARSOL	320 SSP32	72	Si-poly	18.2	320	1.956	0.992
SOLARSOL	325 SSP32	72	Si-poly	18.5	325	1.956	0.992
SOLARSOL	160 SSP16	36	Si-poly	18.2	160	1.482	0.67
SOLARSOL	325 SSP33	72	Si-poly	18.5	325	1.956	0.992
SOLARSOL	330 SSP33	72	Si-poly	18.2	330	1.956	0.992
SOLARSOL	275 SSP28	60	Si-poly	18.6	275	1.64	0.992
SOLARSOL	280 SSP28	60	Si-poly	19	280	1.64	0.992
SOLARSOL	300 SSM30	60	Si-mono	19	300	1.64	0.992
SOLARSOL	305 SSM30	60	Si-mono	19.3	305	1.64	0.992
SOLARSOL	300 SSM31	60	Si-mono	19	300	1.64	0.992
SOLARSOL	308 SSM31	60	Si-mono	21.1	308	1.64	0.992
SOLARSOL	310 SSM31	60	Si-mono	21.3	310	1.64	0.992
SOLARSOL	370 SSM37	72	Si-mono	21.12	370	1.956	0.992
SOLARSOL	185 SSM18	36	Si-mono	21.12	185	1.482	0.676
SOLARTEC	S60MC-200	60	Si-mono	14.7	200	1.64	0.992
SOLARTEC	S60MC-205	60	Si-mono	14.7	205	1.64	0.992

Empresa	Modelo	Celdas	Tipo de material	Eficiencia (%)	Potencia pico (w)	Largo del MFV (m)	Ancho del MFV (m)
SOLARTEC	S60MC-210	60	Si-mono	14.7	210	1.64	0.992
SOLARTEC	S60MC-215	60	Si-mono	14.7	215	1.64	0.992
SOLARTEC	S60MC-220	60	Si-mono	14.7	220	1.64	0.992
SOLARTEC	S60MC-225	60	Si-mono	14.7	225	1.64	0.992
SOLARTEC	S60MC-230	60	Si-mono	14.7	230	1.64	0.992
SOLARTEC	S60MC-235	60	Si-mono	14.7	235	1.64	0.992
SOLARTEC	S60MC-240	60	Si-mono	14.7	240	1.64	0.992
SOLARTEC	S72MC-160	72	Si-mono	14.9	160	1.58	0.808
SOLARTEC	S72MC-165	72	Si-mono	14.9	165	1.58	0.808
SOLARTEC	S72MC-170	72	Si-mono	14.9	170	1.58	0.808
SOLARTEC	S72MC-175	72	Si-mono	14.9	175	1.58	0.808
SOLARTEC	S72MC-180	72	Si-mono	14.9	180	1.58	0.808
SOLARTEC	S72MC-185	72	Si-mono	14.9	185	1.58	0.808
SOLARTEC	S72MC-190	72	Si-mono	14.9	190	1.58	0.808
SOLARTEC	S96MC5-235	96	Si-mono	14	235	1.068	1.581
SOLARTEC	S36PC-115	36	Si-poly	14	115	1.48	0.67
SOLARTEC	S36PC-120	36	Si-poly	14	120	1.48	0.67
SOLARTEC	S36PC-125	36	Si-poly	14	125	1.48	0.67
SOLARTEC	S36PC-130	36	Si-poly	14	130	1.48	0.67
SOLARTEC	S36PC-135	36	Si-poly	14	135	1.48	0.67
SOLARTEC	S36PC-140	36	Si-poly	14	140	1.48	0.67
SOLARTEC	S72PC-240	72	Si-poly	14.5	240	1.956	0.992
SOLARTEC	S72PC-245	72	Si-poly	14.5	245	1.956	0.992
SOLARTEC	S72PC-250	72	Si-poly	14.5	250	1.956	0.992
SOLARTEC	S72PC-255	72	Si-poly	14.5	255	1.956	0.992
SOLARTEC	S72PC-260	72	Si-poly	14.5	260	1.956	0.992
SOLARTEC	S72PC-265	72	Si-poly	14.5	265	1.956	0.992
SOLARTEC	S72PC-270	72	Si-poly	14.5	270	1.956	0.992
SOLARTEC	S72PC-275	72	Si-poly	14.5	275	1.956	0.992
SOLARTEC	S72PC-280	72	Si-poly	14.5	280	1.956	0.992
SOLARVATIO	SV-100 MONO	48	Si-mono	16.6	100	1.069	0.669
SOLARVATIO	SV-110 MONO	48	Si-mono	16.6	110	1.069	0.669
SOLARVATIO	SV-285-MONO-5-60UL	60	Si-mono	19.95	285	1.638	0.982
SOLARVATIO	SV-290-MONO-5-60UL	60	Si-mono	20.35	290	1.638	0.982

Empresa	Modelo	Celdas	Tipo de material	Eficiencia (%)	Potencia pico (w)	Largo del MFV (m)	Ancho del MFV (m)
SOLARVATIO	SV-295-MONO-5-60UL	60	Si-mono	20.55	295	1.638	0.982
SOLARVATIO	SV-300-MONO-5-60UL	60	Si-mono	20.75	300	1.638	0.982
SOLARVATIO	SV-330-MONO-5-72UL	72	Si-mono	20.95	330	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-340-MONO-5-72UL	72	Si-mono	21.25	340	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-350-MONO-5-72UL	72	Si-mono	21.46	350	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-360-MONO-5-72UL	72	Si-mono	21.76	360	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-380-MONO-5-72UL	72	Si-mono	21.97	380	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-390-MONO-5-72UL	72	Si-mono	22.14	390	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV170MONO-UL	36	Si-mono	16.6	170	1.506	0.681
SOLARVATIO	SV250MONO-UL	60	Si-mono	17.2	250	1.638	0.982
SOLARVATIO	SV255MONO-UL	60	Si-mono	16.85	255	1.639	0.982
SOLARVATIO	SV 260M Mono	60	Si-mono	17.5	260	1.639	0.982
SOLARVATIO	SV265MONO-UL	60	Si-mono	18.2	265	1.639	0.982
SOLARVATIO	SV270MONO-UL	60	Si-mono	18.2	270	1.639	0.982
SOLARVATIO	SV280MONO	60	Si-mono	19.2	280	1.639	0.982
SOLARVATIO	SV-100-POLY-5-48UL	48	Si-poly	18.93	100	1.069	0.669
SOLARVATIO	SV-155-POLY-5-36UL	36	Si-poly	18.7	155	1.506	0.681
SOLARVATIO	SV-160-POLY-5-36UL	36	Si-poly	18.9	160	1.506	0.681
SOLARVATIO	SV-170-POLY-5-36UL	36	Si-poly	18.2	170	1.506	0.681
SOLARVATIO	SV-260-POLY-5-60UL	60	Si-poly	19.5	260	1.6385	0.982
SOLARVATIO	SV-265-POLY-5-60UL	60	Si-poly	19.2	265	1.6385	0.982

Empresa	Modelo	Celdas	Tipo de material	Eficiencia (%)	Potencia pico (w)	Largo del MFV (m)	Ancho del MFV (m)
SOLARVATIO	SV-270-POLY-5-60UL	60	Si-poly	18.3	270	1.6385	0.982
SOLARVATIO	SV-275-POLY-5-60UL	60	Si-poly	18.5	275	1.6385	0.982
SOLARVATIO	SV-280-POLY-5-60UL	60	Si-poly	18.7	280	1.6385	0.982
SOLARVATIO	SV-310-POLY-5-72UL	72	Si-poly	19.5	310	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-320-POLY-5-72UL	72	Si-poly	19.8	320	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-330-POLY-5-72UL	72	Si-poly	20.7	330	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-340-POLY-5-72UL	72	Si-poly	21.2	340	1.962	0.985
SOLARVATIO	SV-80-POLY-5-36UL	36	Si-poly	17.6	80	1.506	0.681
SOLARVATIO	SV-85-POLY-5-36UL	36	Si-poly	18.1	85	1.506	0.681
SOLARVATIO	SV-90-POLY-5-36UL	36	Si-poly	18.52	90	1.506	0.681
SOLARVATIO	SV245POLY-UL	60	Si-poly	16.8	245	1.639	0.982
SOLARVATIO	SV250POLY-UL	60	Si-poly	17.5	250	1.639	0.982
SOLARVATIO	SV255POLY-UL	60	Si-poly	17.5	255	1.639	0.982
SOLARVATIO	SV260POLY-UL	60	Si-poly	17.5	260	1.639	0.982
XTENDER SOLAR	XT1-290-M60	60	MONO	17.75	290	1.65	0.992
XTENDER SOLAR	XT1-295-M60	60	MONO	18.06	295	1.65	0.992
XTENDER SOLAR	XT1-300-M60	60	MONO	18.36	300	1.65	0.992
XTENDER SOLAR	XT1-265-P60	60	MONO	16.2	265	1.65	0.992
XTENDER SOLAR	XT1-270-P60	60	MONO	16.5	270	1.65	0.992
XTENDER SOLAR	XT1-275-P60	60	MONO	16.8	275	1.65	0.992
SYDEMEX SOLAR	-	36	Si-poly	16.49	65	-	-
SYDEMEX SOLAR	PSPC 255	60	Si-poly	15.51	255	-	-
SYDEMEX SOLAR	PSPC 260	60	Si-poly	15.82	260	-	-
SYDEMEX SOLAR	PSPC 265	60	Si-poly	16.12	265	-	-

Empresa	Modelo	Celdas	Tipo de material	Eficiencia (%)	Potencia pico (w)	Largo del MFV (m)	Ancho del MFV (m)
SYDEMEX SOLAR	PSPC 270	60	Si-poly	16.42	270	-	-
SYDEMEX SOLAR	PSPC460 260	60	Si-poly	16.01	260	-	-
SYDEMEX SOLAR	PSPC460 265	60	Si-poly	16.32	265	-	-
SYDEMEX SOLAR	PSPC460 270	60	Si-poly	16.63	270	-	-
SYDEMEX SOLAR	PSPC460 275	60	Si-poly	16.94	275	-	-