



SUBSECRETARIA DE ENERGÍAS RENOVABLES
Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

ENERGÍA
SOLAR FOTOVOLTAICA

Estado del Arte de la Tecnología de generación de
energía eléctrica utilizando la luz solar.

Octubre 2019

VALIDACIÓN

	Nombre	Cargo	Dirección
Preparado	Mariano GONZALEZ	Analista de Tecnología	DERyT#MHA
Revisado	Gastón SIROIT	Director de Evaluación de Recursos y Tecnología	DERyT#MHA
Aprobado	Maximiliano MORRONE	Director Nacional de Promoción de Energías Renovables y Eficiencia Energética	DNPERyEE#MHA

EX-2019-100784249- -APN-DGDOMEN#MHA

Contenido

ÍNDICE DE TABLAS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	3
INTRODUCCIÓN	5
PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA SOLAR FOTOVOLTAICA	6
EL RECURSO SOLAR	7
CELDA FOTOVOLTAICAS	8
SEMICONDUCTORES	8
DOPAJE	10
CELDA DE SILICIO	11
CELDA DE CAPA DELGADA (THIN FILM)	12
INVERSORES	13
CONFIGURACIONES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	13
SEGUIDORES	14
COSTOS	15
SFV A NIVEL MUNDIAL	19
SFV EN ARGENTINA	24
MARCO JURÍDICO	24
MAPA DE RADIACION SOLAR ARGENTINO	25
LEY 26.190, GENREN y RESOLUCIÓN SE 108/2011	26
LEY 27.191 Y PROGRAMA RENOVAR	29
RENOVAR – RONDA 1	30
RENOVAR – RONDA 1.5	31
RENOVAR – RONDA 2	32
RENOVAR – RONDA 3 (MINIREN)	32
EMPLEO RENOVABLE EN ARGENTINA	33
ESTADÍSTICAS RENOVAR	34
Referencias	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de costos nivelados de la electricidad.....	16
Tabla 2. Eficiencias record alcanzadas en laboratorio de diferentes tecnologías SFV.....	22
Tabla 3. Proyectos SFV adjudicados en GENREN.....	26
Tabla 4. Proyectos SFV presentados a través de la Resolución SE 108/2011	27
Tabla 5. Generación de las cinco plantas fotovoltaicas construidas bajo el Programa GENREN o Resolución SE 108/2011.	27
Tabla 6. Proyectos Adjudicados en el Programa RenovAr – Ronda 1.	30
Tabla 7. Proyectos Adjudicados en el marco de la Resolución MEyM 202/2016	31
Tabla 8. Proyectos Adjudicados en el Programa RenovAr – Ronda 1.5	31
Tabla 9. Proyectos Adjudicadas en el Programa RenovAr – Ronda 2	32
Tabla 10. Proyectos Adjudicadas en el Programa RenovAr – Ronda 2 - Fase 2	32
Tabla 11. Proyectos Adjudicadas en el Programa RenovAr – Ronda 3	33
Tabla 12. Programa RenovAr. Relación DC/AC promedio por Ronda por Región	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta SFV San Juan I, San Juan, Argentina	5
Figura 2. Modelo de celda SFV simplificado	6
Figura 3. Relación entre longitud de onda, intensidad de la radiación y temperatura del emisor	7
Figura 4. Mapa de Irradiación Global Horizontal.....	8
Figura 5. Generación de un par electrón-hueco.....	9
Figura 6. Coeficiente de absorción de algunos semiconductores a 300 K en función de la longitud de onda.....	10
Figura 7. (a) y (b) Representan el modelo de una estructura de silicio cristalino. (c) y (b) Representación de una estructura de silicio cristalino dopada con P o con B.....	11
Figura 8. Esquema de una celda de silicio cristalino.	12
Figura 9. Tecnologías desarrolladas para mejorar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas de silicio cristalino.....	12
Figura 10. Diferentes tecnologías de celdas de capa delgada.....	12
Figura 11. Diferentes configuraciones de inversores en una instalación solar fotovoltaica. .	13
Figura 12. (a) Seguidor de un eje. Fuente: Foto propia. (b) Seguidor de dos ejes. Fuente: IMEDEXA	14
Figura 13. Desgloce detallado de la composición de costos de instalación total de una planta de gran escala SFV en los países del G20 en 2018.....	15
Figura 14. Costos de generación de electricidad solar fotovoltaico en comparación con otras fuentes de generación 2009-2018.....	16
Figura 15. LCOE global de tecnologías de generación de energía renovables a gran escala 2010-2018.	17
Figura 16. LCOE de generación SFV en función de la irradiancia y los costos mayoristas en los mercados clave	18

Figura 17. Comparación del CAPEX, Factor de Capacidad y LCOE de la tecnología SFV 2010-2018	19
Figura 18. Capacidad instalada de SFV en el mundo 2000-2018	20
Figura 19. Nuevas inversiones globales en energía limpia, por sector 2005-2018 en miles de millones de dólares	20
Figura 20. a) Nueva capacidad incorporada a la red en 2018 por tecnología. b) Participación de las renovables en capacidad instalada y generación de energía en el mundo 2008-2018.	21
Figura 21. Generación de energía SFV teórica en 2018	21
Figura 22. Participación fotovoltaica per cápita en 2017	22
Figura 23. Top 10 de mayores mercados de capacidad instalada de solar fotovoltaico en 2018	22
Figura 24. Participación de cada tecnología SFV en el mercado entre los años 2000-2017 ...	23
Figura 25. Top 10 países con mayor empleo en solar fotovoltaica.....	23
Figura 26. Mapas de radiación solar en Argentina en enero (izquierda) y julio (derecha) en kWh/m ²	25
Figura 27. Generación mensual de las cinco plantas fotovoltaicas construidas bajo el Programa GENREN o Resolución SE 108/2011	28
Figura 28. Horas Equivalentes mensual de las cinco plantas fotovoltaicas construidas bajo el Programa GENREN o Resolución SE 108/2011.	28
Figura 29. Figura 30. Horas Equivalentes anual de las cinco plantas fotovoltaicas construidas bajo el Programa GENREN o Resolución SE 108/2011.	29
Figura 31. Estructura Contractual y de Garantías del Programa RenovAr	30
Figura 32. Programa RenovAr. Potencia Adjudicada por Región	34
Figura 33. Programa RenovAr. Proyectos Adjudicados por Región	34
Figura 34. Programa RenovAr. Potencia Adjudicada por Provincia	35
Figura 35. Programa RenovAr. Proyectos Adjudicados por Provincia.....	35
Figura 36. Programa RenovAr. Irradiación promedio informada por los proyectos	36
Figura 37. Programa RenovAr. Factor de Capacidad estimado por los proyectos.....	36
Figura 38. Programa RenovAr. Potencia Pico de los módulos fotovoltaicos utilizados por los Proyectos	37
Figura 39. Programa RenovAr. Cantidad de módulos fotovoltaicos por potencia unitaria que se instalarán en Argentina	37
Figura 40. Programa RenovAr. Tecnología de módulos fotovoltaicos utilizada	38
Figura 41. Programa RenovAr. Tipo de inversor utilizado en los proyectos	38
Figura 42. Programa RenovAr. Tipo de seguidor utilizado en los proyectos	39

INTRODUCCIÓN

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto y luego estudiado por primera vez en 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel. Pasados cuarenta y cuatro años, en 1883, el inventor estadounidense Charles Fritts pudo fabricar el primer dispositivo fotovoltaico basado en una juntura de oro-selenio. El resultado fue muy pobre, alcanzando solamente una eficiencia de conversión del 1%. No fue hasta la segunda mitad del siglo XX que la industria SFV (SFV) comenzó su desarrollo y expansión con el objetivo de energizar satélites puestos en la órbita terrestre. Llegada la década de 1970, se comenzaron a desarrollar módulos fotovoltaicos para aplicaciones terrestres. Hoy en día es uno de los pilares de la transición energética en la segunda década del siglo XXI en búsqueda de reemplazar las fuentes de energía de origen fósil con el fin de combatir el cambio climático ya que una vez instalados el parque, no produce gases de efecto invernadero como, por ejemplo, dióxido de carbono (CO₂) (Smets, Jäger, Isabella, Van Swaaij, & Zeman, 2016) (Zhang, Li, Li, & Wang, 2012).

A modo de introducción, se repasarán brevemente los componentes de un sistema SFV y su principio básico de funcionamiento (transformación de la luz proveniente del sol en energía eléctrica).

Básicamente, un sistema SFV está compuesto por los siguientes componentes:

- Módulo fotovoltaico
- Inversor
- Sistema de soporte/seguimiento

Los parques de generación SFV cuentan además con los equipos asociados a cualquier sistema eléctrico, como son los sistemas de conexión, las protecciones, puesta a tierra, transformadores, entre otros (Gregorini, Kühn, & Zúccolo, 2018)

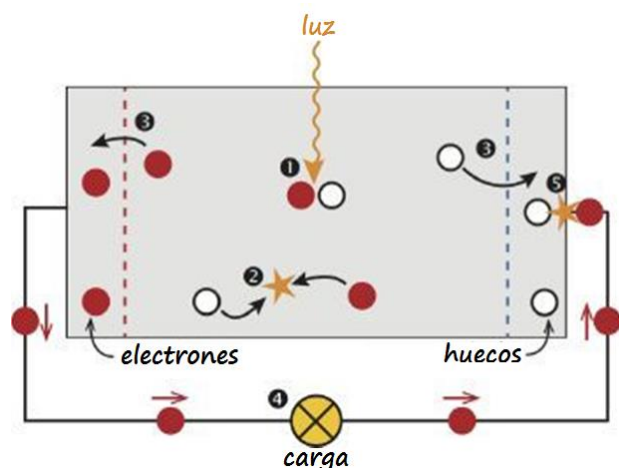


Figura 1. Planta SFV San Juan I, San Juan, Argentina. Fuente: EPSE

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA CELDA SOLAR FOTOVOLTAICA

Las celdas solares fotovoltaicas se denominan así dado que están compuestas por materiales semiconductores que son capaces de convertir la energía electromagnética contenida en la luz proveniente del sol y convertirla en energía eléctrica. Este fenómeno se denomina fotovoltaico dada la diferencia de potencial que da lugar a una corriente eléctrica (Taretto, 2018)

En la Figura 2 se puede observar una versión simplificada del principio básico de funcionamiento de una celda fotovoltaica, que se podría describir del siguiente modo: la luz proveniente del sol alcanza la superficie de los módulos fotovoltaicos. Es allí donde los fotones (partículas elementales responsables del fenómeno electromagnético) son absorbidos por el material semiconductor provocando la excitación de los electrones y permitiendo que se forme lo que se conoce como el par electrón-hueco. Dado que los electrones y los huecos tienden a recombinarse para volver a liberar la energía del fotón, si uno desea aprovechar la energía almacenada en un par electrón-hueco para realizar trabajo en un circuito externo se deben separar los electrones y los huecos mediante la inserción de otros materiales que permitan sólo el paso de electrones hacia un extremo y sólo el paso de huecos hacia el otro. Finalmente, las cargas eléctricas son extraídas de las celdas fotovoltaicas mediante contactos eléctricos para que puedan realizar trabajo en un circuito externo. La energía química de los pares electrón-hueco se convierte en energía eléctrica, para que luego de que los electrones hayan pasado por el circuito, se recombinen con los huecos (Smets, Jäger, Isabella, Van Swaaij, & Zeman, 2016).



1. Absorción del fotón que permite la generación del par electrón-hueco.
2. Normalmente el par electrón-hueco se recombina sin que se genere energía eléctrica.
3. Con membranas semipermeables, los electrones y los huecos son separados.
4. Los electrones recolectados son utilizados para que circulen en un circuito eléctrico.
5. Luego de que los electrones han atravesado el circuito, se recombinan con los huecos.

Figura 2. Modelo de celda SFV simplificado. [Fuente:](#) Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems

EL RECURSO SOLAR

La unidad de medición en el Sistema Internacional para la irradiancia (flujo de radiación) es el Watt por metro cuadrado (W/m^2) mientras que la Irradiación es la energía por unidad de área, es decir, que se mide en Watt-hora por metro cuadrado (Wh/m^2). Debido a que la distancia entre La Tierra y el Sol es de 150 millones de kilómetros, el flujo de radiación solar que alcanza la atmósfera terrestre es de $1.367 \text{ W}/\text{m}^2$. Este valor es conocido como la Constante Solar. Dada la distancia, la radiación que alcanza a la Tierra proveniente del Sol es casi paralela. El rango de radiación varía desde alta energía ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo cercano (IRC). Entre estos valores se encuentra el “espectro visible” con longitudes de onda que van desde los 400 nm a 700 nm como se muestra en la Figura 3 (Kipp & Zonen, 2019).

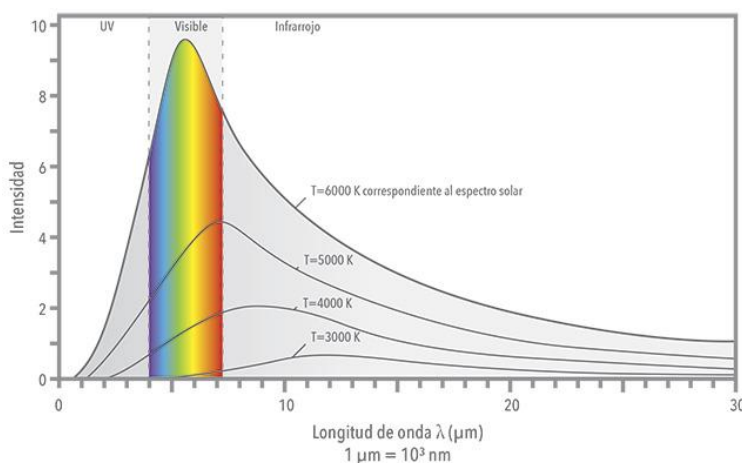


Figura 3. Relación entre longitud de onda, intensidad de la radiación y temperatura del emisor. Fuente: Kipp & Zonen

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera sólo una parte llega a la superficie terrestre directamente, mientras que el resto es esparcido o absorbido por moléculas del aire, aerosoles, gotas de agua o cristales de hielo en las nubes. En su casi totalidad, la absorción es realizada por las moléculas gaseosas y los aerosoles. El esparcimiento de la radiación solar por las gotas de agua y los cristales de hielo toman lugar por todo el rango espectral, donde las moléculas esparcen predominantemente la longitudes de onda corta y los aerosoles las longitudes de onda más largas. Es por ello, que un día de cielo despejado, la irradiancia que alcanza la superficie terrestre varía entre los 700 y $1.300 \text{ W}/\text{m}^2$ al mediodía, dependiendo fuertemente de la latitud, la longitud y el momento del año (Kipp & Zonen, 2019)

La radiación solar que atraviesa la atmósfera y llega directamente a la superficie terrestre se denomina Irradiancia Normal Directa (DNI, *Direct Normal Irradiance*). La radiación que es esparcida por fuera del rayo directo es la Irradiancia Horizontal Difusa (DHI, *Diffuse Horizontal Irradiance*). La suma geométrica de estos dos componentes de la luz solar que confluyen en un mismo punto de una superficie horizontal se denomina Irradiación Global Horizontal (GHI, *Global Horizontal Irradiance*) y su cálculo es el siguiente:

$$GHI = DHI + DNI \times \cos \theta$$

siendo θ el ángulo cenital.

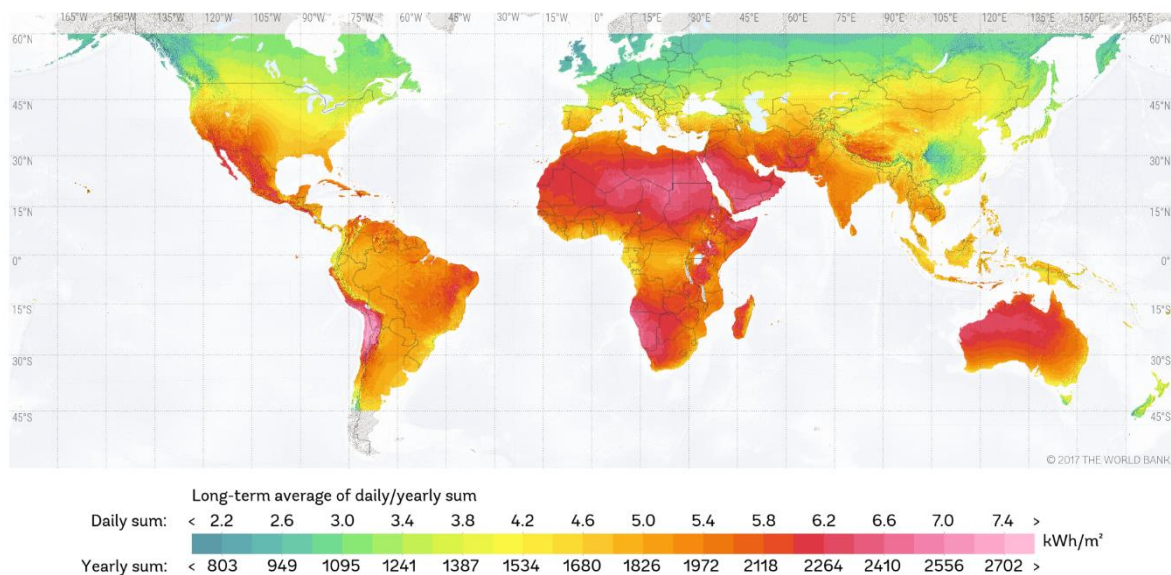


Figura 4. Mapa de Irradiación Global Horizontal. Fuente: SOLARGIS

CELDAS FOTOVOLTAICAS

La celda fotovoltaica es el elemento principal en la producción de energía eléctrica a partir de la luz proveniente del sol. Se la podría considerar la unidad básica. Una celda fotovoltaica posee su propia potencia, tensión y corriente, aunque por sus características modulares permite que combinando celdas entre ellas se puedan lograr unidades de generación más grandes, como los módulos fotovoltaicos. En este apartado se explica su principio de funcionamiento y las tecnologías más abundantes en el mercado.

SEMICONDUCTORES

En primer lugar, es necesario conocer los materiales que componen las celdas solares que le permiten generar el efecto fotovoltaico. Esos materiales se denominan semiconductores.

Según Taretto (Taretto, 2018), los semiconductores son materiales apropiados para realización de celdas solares debido a dos razones:

- Los fotones solares poseen la energía suficiente para liberar los electrones de sus átomos
- Los electrones liberados son capaces de moverse hacia los contactos

Además, los parámetros centrales de un semiconductor que más influyen en el desempeño de una celda solar son la concentración de átomos dopados (donantes y receptores de electrones libres), la movilidad y el coeficiente de difusión de los portadores de carga, el tiempo de vida y la longitud de difusión de los portadores de carga, la energía de la banda prohibida (*bandgap*) y el coeficiente de absorción de energía electromagnética (Smets, Jäger, Isabella, Van Swaaij, & Zeman, 2016). Los átomos en un semiconductor son materiales de los grupos IV de la tabla periódica, o de una combinación del grupo III y del grupo V (llamados semiconductores III-V), o de combinaciones del grupo II y del grupo VI (llamados semiconductores II-VI). De todos modos, el material más utilizado es el silicio (Si) (Honsberg & Bowden, 2019).

Taretto (Taretto, 2018) explica que existen diferentes procesos de absorción de fotones, dependiendo de la región del espectro a la que estos pertenezcan, es decir, de su longitud de onda (rayos X, visible, radio, infrarrojo, etc.). Con los fotones, las celdas solares utilizan la absorción interbanda, que es aquella que lleva a un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. En contraparte, la emisión se produce cuando un electrón ya en la banda de conducción se recombina con un hueco en la banda de valencia, liberando un fotón. Ambos procesos, la absorción y la emisión, se hayan recíprocamente vinculados, ya que en equilibrio termodinámico, las tasas correspondientes a uno y otro proceso deben igualarse.

El coeficiente de absorción es el parámetro que determina la intensidad con que un semiconductor es capaz de absorber fotones. La absorción de un fotón significa que su energía E_{ph} es utilizada para excitar a un electrón de un nivel de energía inicial (E_i) a un nivel de energía final superior (E_f), como se muestra en la Figura 5. Los fotones sólo podrían ser absorbidos si la energía que le transmiten al electrón es lo suficientemente grande para realizar el salto entre estos dos niveles de energía. Si E_i se encuentra dentro de la banda de valencia (E_v), y E_f dentro de la banda de conducción (E_c) el salto que deberá realizar el electrón será la diferencia entre estos dos niveles $E_c - E_v$ y se denomina como la banda prohibida (*bandgap*) E_g . Por otro lado, si el electrón es excitado y llega a la banda de conducción, en la banda de valencia se generará un vacío, denominado *hueco*, y dada la ausencia del electrón, dicho vacío se comportará como una carga positiva. (Smets, Jäger, Isabella, Van Swaaij, & Zeman, 2016).

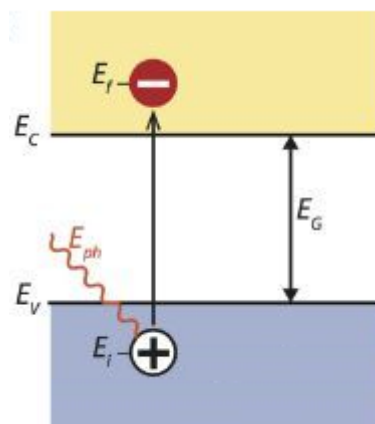


Figura 5. Generación de un par electrón-hueco. Fuente: Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems

Para los fotones cuya E_{ph} sea menor a la E_g los semiconductores resultan transparentes, siendo el coeficiente de absorción igual a cero. (Taretto, 2018). En la Figura 6 se muestran los coeficientes de absorción de algunos semiconductores.

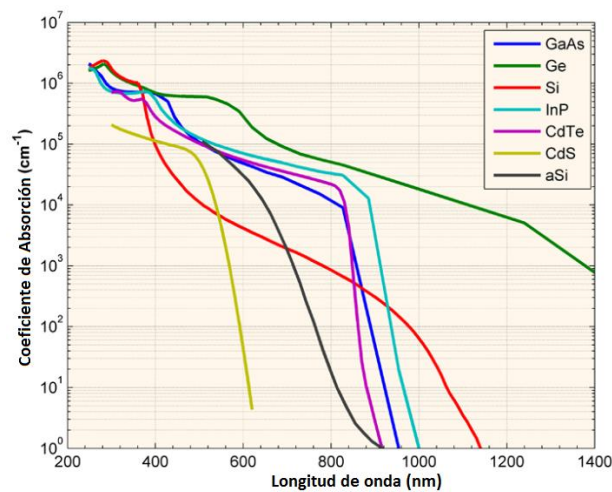
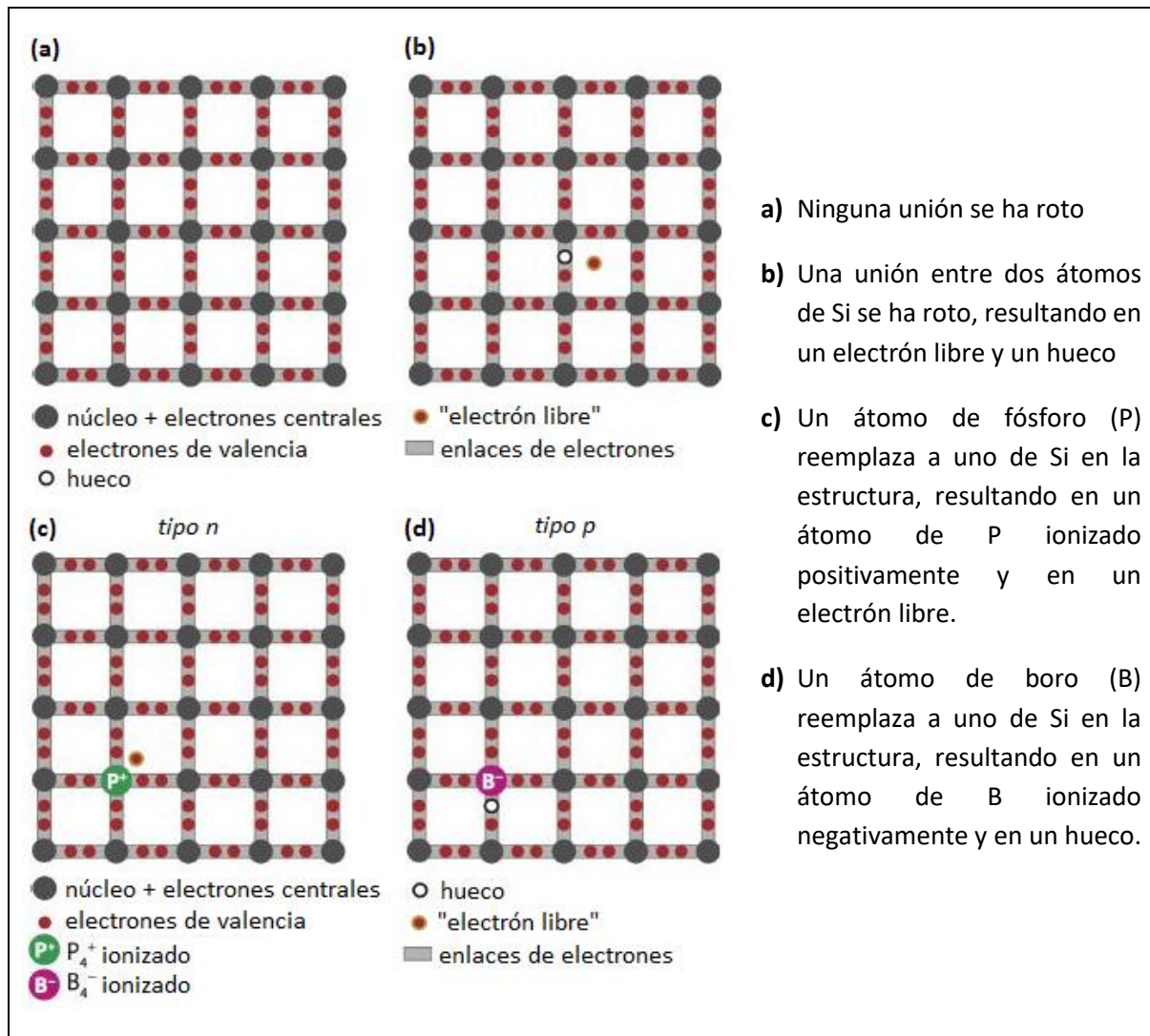


Figura 6. Coeficiente de absorción de algunos semiconductores a 300 K en función de la longitud de onda. Fuente: [PVEDucation](#)

DOPAJE

Es posible cambiar las concentraciones de electrones y huecos en una red cristalina de silicio por medio de la técnica que se denomina dopaje (Figura 7). El dopaje se basa en la introducción de otros elementos que reemplacen algunos átomos de silicio con el fin de generar un desbalance de la red y así aumentar la concentración de electrones o huecos según se requiera. Teniendo en cuenta que el silicio corresponde al grupo IV de la tabla periódica de los elementos, si se busca crear un material *tipo n*, es decir, con mayor concentración de cargas negativas, se utilizarán elementos del grupo V de los cuales el fósforo (P) es el más utilizado. Por el contrario, si se busca aumentar la concentración de cargas positivas (huecos) se dopará al silicio con elementos del grupo III, siendo el más común el boro (B), y crear de esta forma un material *tipo p* (Honsberg & Bowden, 2019)



- a) Ninguna unión se ha roto
- b) Una unión entre dos átomos de Si se ha roto, resultando en un electrón libre y un hueco
- c) Un átomo de fósforo (P) reemplaza a uno de Si en la estructura, resultando en un átomo de P ionizado positivamente y en un electrón libre.
- d) Un átomo de boro (B) reemplaza a uno de Si en la estructura, resultando en un átomo de B ionizado negativamente y en un hueco.

Figura 7. (a) y (b) Representan el modelo de una estructura de silicio cristalino. (c) y (d) Representación de una estructura de silicio cristalino dopada con P o con B. Fuente: Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems

CELDAS DE SILICIO

Las celdas de silicio cristalino representan más del 95% del mercado de las celdas fotovoltaicas (IAE-PVPS, 2018). Las celdas de silicio cristalino se dividen en monocristalinas y policristalinas. La principal diferencia es la estructura interna y la conformación de red cristalina del silicio que provocará mayor o menor tasa de recombinación de los pares electrón-hueco, siendo las celdas de silicio monocristalinas más eficientes pero más costosas (Smets, Jäger, Isabella, Van Swaaij, & Zeman, 2016).

Se han desarrollado diferentes tecnologías para mejorar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas de silicio cristalino. Un esquema básico de la misma se puede observar en la Figura 8. Por otro lado, con la idea de aumentar la eficiencia se desarrollaron algunos modelos superadores como son el Passivated Emitter Rear Locally diffuse (PERL), el Interdigitated Back Contact (IBC) o la Heterojunction with Intrinsic Thinlayer, todos ellos esquematizados en la Figura 9.

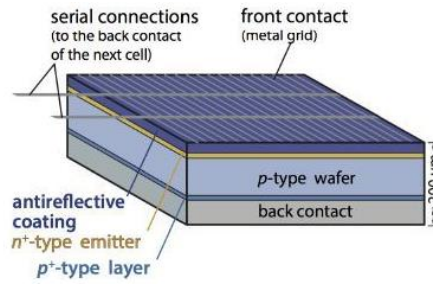


Figura 8. Esquema de una celda de silicio cristalino.

Fuente: Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems

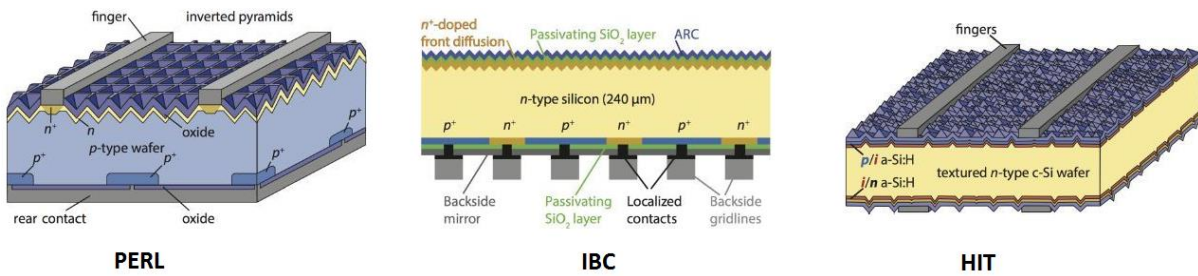


Figura 9. Tecnologías desarrolladas para mejorar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas de silicio cristalino.

Fuente: Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems

CELDAS DE CAPA DELGADA (THIN FILM)

Las celdas de capa delgada (*thin film*) cuentan con la ventaja de utilizar cantidades muy bajas de material absorbente, a lo cual también va asociada una menor cantidad de energía necesaria para su fabricación. Otra ventaja que presentan son espesores tan bajos permiten realizar celdas flexibles. (Taretto, 2018)

Las tecnologías más difundidas dentro de las celdas de capa delgada son los semiconductores III-V (el más divulgado es el Arseniuro de Galio o GaAs), el silicio amorfo (a-Si:H), Telururo de Cadmio (CdTe) y Cobre Indio Galio Selenio (CIGS) cuyas estructuras se muestran en la Figura 10.

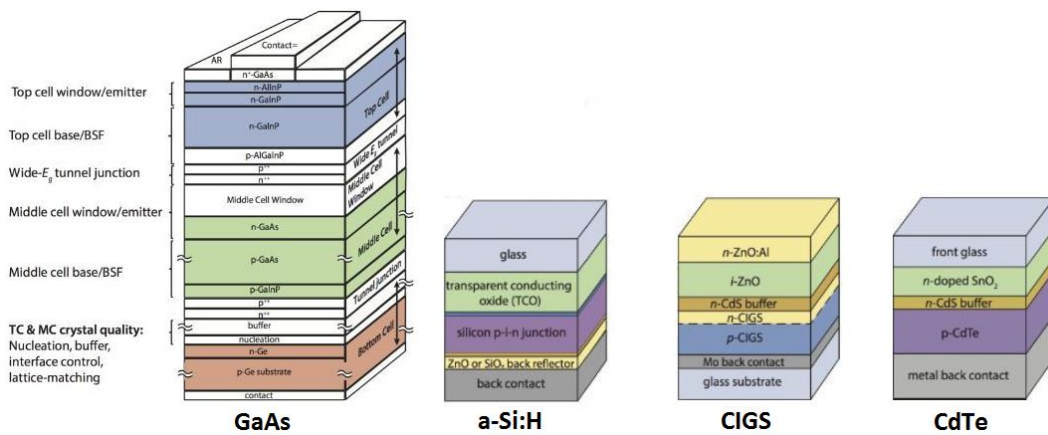


Figura 10. Diferentes tecnologías de celdas de capa delgada.

Fuente: Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems

INVERSORES

Un inversor es un convertidor estático de potencia con potencia de entrada en corriente continua (DC, *Direct Current*) y potencia de salida en corriente alterna (AC, *Alternative Current*) con una tensión y frecuencia determinada. La potencia DC de entrada puede ser extraída, por ejemplo, de un sistema fotovoltaico (Jagannathan, 2011).

CONFIGURACIONES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Existen diferentes configuraciones y tecnologías de inversores que cada diseñador deberá seleccionar dependiendo el proyecto. Los inversores solares que pueden encontrarse en el mercado son los centrales, microinversores, los tipo *string* o inversores centrales con optimizadores (Figura 11).

- **Centrales:** los módulos fotovoltaicos se encuentran conectados en cadenas (*strings*) y se conectan en un sistema de mayor tensión. Luego, muchas de estas strings se conectan en paralelo formando un arreglo fotovoltaico, el cual se conecta a un solo inversor central.
- **Microinversores:** Estos inversores operan directamente con uno o pocos módulos y su potencia unitaria es de algunos cientos de watts.
- **String:** Estos inversores se conectan a una cadena de módulos, los cuales no trabajan con potencias tan grandes como los inversores centrales pero no tan bajas como los microinversores.
- **Central con optimizador:** Esta opción es idéntica a los inversores centrales con la salvedad de que cada uno de los módulos cuenta con un optimizador que permite que trabajen a una potencia óptima para luego convertirla en el inversor central.

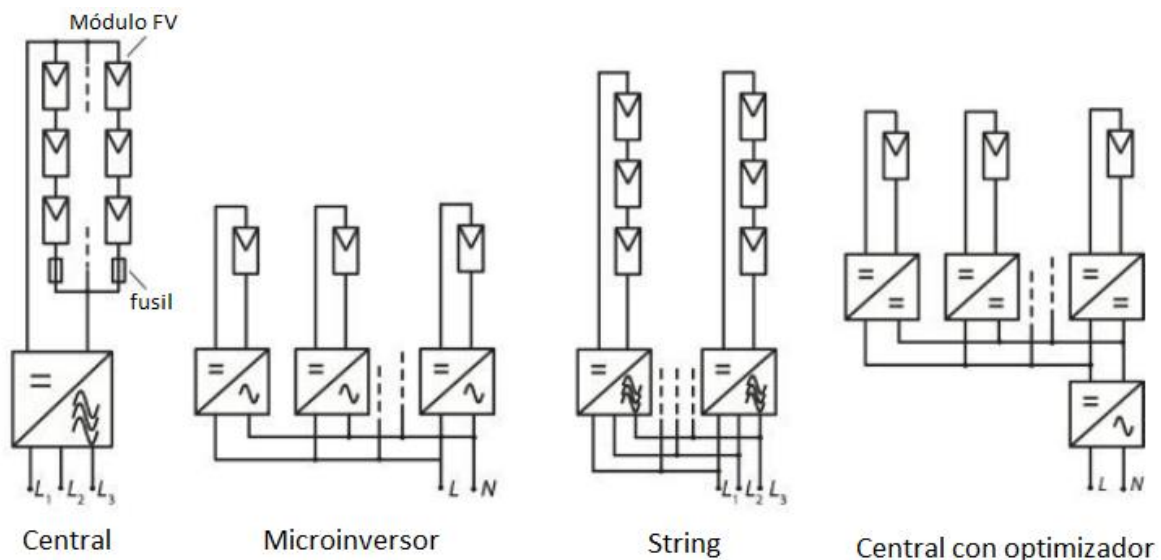


Figura 11. Diferentes configuraciones de inversores en una instalación solar fotovoltaica.

[Fuente:](#) Solar Energy. The physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems

SEGUIDORES

El seguidor solar es una estructura metálica, cuya función es aumentar la producción de energía utilizando paneles fotovoltaicos y otros dispositivos de concentración por medio de sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos que siguen la trayectoria del Sol como lo haría un girasol, capturando de esta manera la máxima radiación solar durante el mayor tiempo posible. Los sistemas fotovoltaicos con seguimiento se pueden dividir en sistemas de seguimiento de un eje, o sistemas de seguimiento de dos ejes. Los sistemas de un solo eje perpendicular al suelo pueden sólo seguir el azimut solar, pero no pueden seguir la altitud solar. Mientras que un sistema seguidor de dos ejes puede seguir tanto el azimut como la altitud del Sol y puede ser más eficiente que un sistema de un solo eje (Pelayo López, Luna Soto, Bernabe Ramos, & Guzmán Flores, 2017).

Una instalación de módulos solares con seguimiento en un eje puede lograr aumentos del rendimiento de entre el 25 y el 35%, dependiendo estrictamente del lugar en donde la instalación se encuentre. Por lo general estos sistemas se instalan con orientación Norte-Sur y el movimiento se realiza de Este a Oeste. Si el sistema es de seguimiento en dos ejes, el rendimiento aumentaría otro 5-10% adicional dado que se mueve en la dirección de todos los puntos cardinales (Soty Solar, 2019).

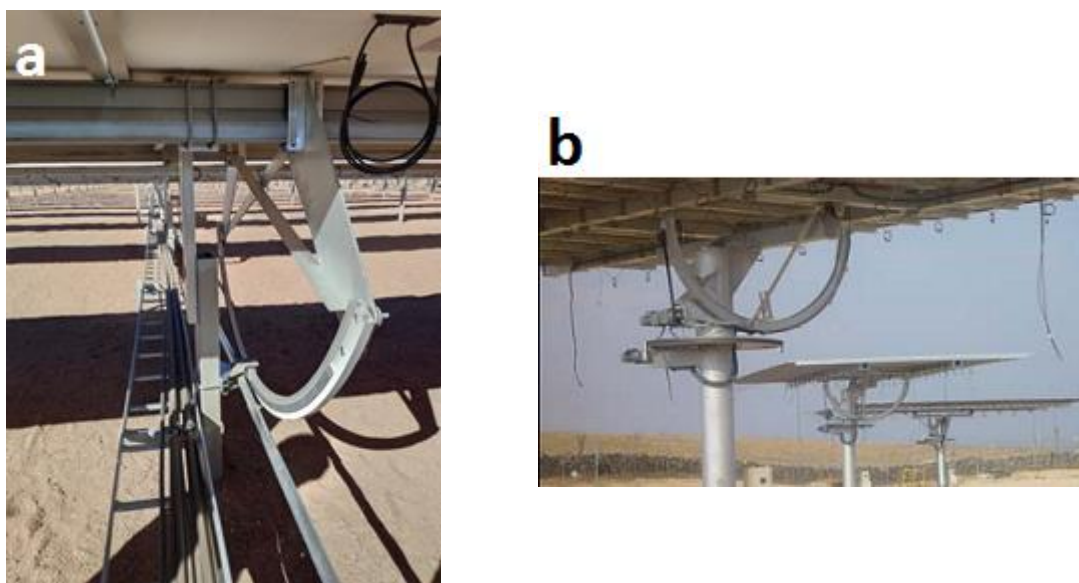


Figura 12. (a) *Seguidor de un eje.* Fuente: Foto propia. (b) *Seguidor de dos ejes.* Fuente: IMEDEXA

La principal desventaja de estos sistemas es el aumento del coste de instalación y mantenimiento. Un seguidor solar cuesta más que un sistema solar fijo, porque cuenta con partes mecánicas más complejas y móviles. Con sistemas más complejos, mayor mantenimiento, lo que añade un coste a la instalación durante su vida útil (Soty Solar, 2019).

Los seguidores solares de un solo eje, también pueden clasificarse en monofila o multifila, es decir, que un solo punto de seguimiento mueve una sola fila de módulos fotovoltaicos para el primer caso o que mueve varias filas de módulos en el segundo. Existe un paralelismo con los inversores tipo string y centrales, ya que dependiendo si se quiere aumentar el rendimiento o disminuir los costos se

utilizarán unos u otros. De todos modos, otras variables que pueden definir qué tipo de seguidor es más conveniente es el terreno, ya que terrenos con mucha pendiente o poco uniformes no permitirán que un seguidor multifila se pueda adaptar exitosamente.

COSTOS

Como en la mayoría de las tecnologías, los costos de inversión (CAPEX, *Capital Expenditures*) en un proyecto de generación de energía eléctrica variarán dependiendo de su capacidad instalada, su factor de capacidad y la tecnología que se utilice. Las plantas SFV no escapan a estos parámetros.

En el caso de la tecnología SFV, la caída de los costos de los módulos fotovoltaicos y el aumento de la eficiencia de los mismos es el principal causante de la reducción tan drástica del CAPEX en los proyectos SFV. Entre los años 2010-2018 se experimentó una reducción de los costos de inversión del 74%, lo cual en números de inversión equivale a USD 4.621/kW en 2010 a USD 1.210/kW en 2018 (IRENA, 2019). En la Figura 13 se aprecia la composición de esos costos en los países que conforman el G20.

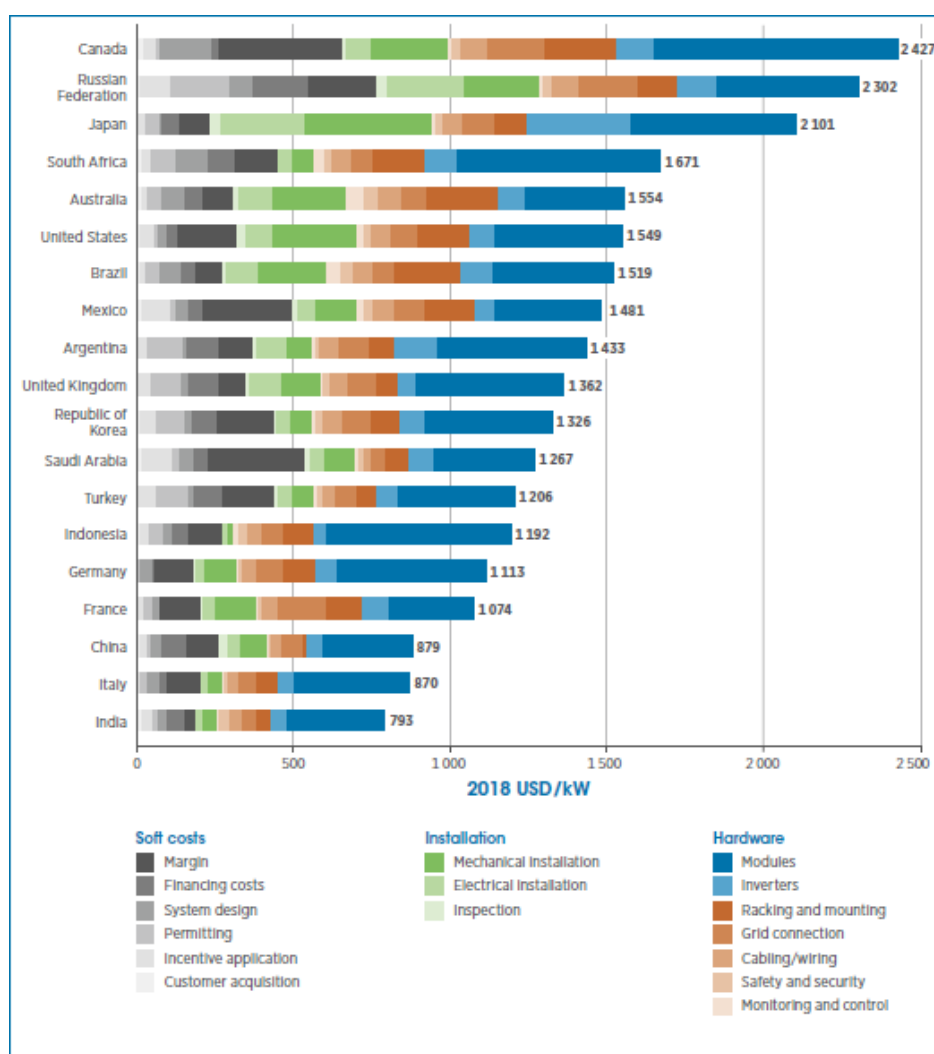


Figura 13. Desglose detallado de la composición de costos de instalación total de una planta de gran escala SFV en los países del G20 en 2018. Fuente: IRENA

La Tabla 1 muestra que en el período 2017-2018 la energía SFV junto con la energía eólica onshore fueron las tecnologías que más han disminuido el costo nivelado de la electricidad (LCOE, *Levelized Cost of Electricity*) por detrás de la energía solar concentrada (IRENA, 2019). La reducción del 13% es significativa y mantiene una tendencia a la baja donde los costos de generación cayeron alrededor de un 85% desde el 2009, como se aprecia en la Figura 14.

	LCOE global	Costos de Electricidad: percentiles 5to a 95to	Cambio en LCOE 2017-2018
	USD/kWh	USD/kWh	
Bioenergías	0,062	0,048 - 0,243	-14%
Geotermia	0,072	0,060 - 0,143	-1%
Hidro	0,047	0,030 - 0,136	-11%
Solar Fotovoltaica	0,085	0,058 - 0,219	-13%
Solar Concentrada	0,185	0,109 - 0,272	-26%
Eólica offshore	0,127	0,102 - 0,198	-1%
Eólica onshore	0,056	0,044 - 0,100	-13%

Tabla 1. Comparación de costos nivelados de la electricidad. Fuente: IRENA

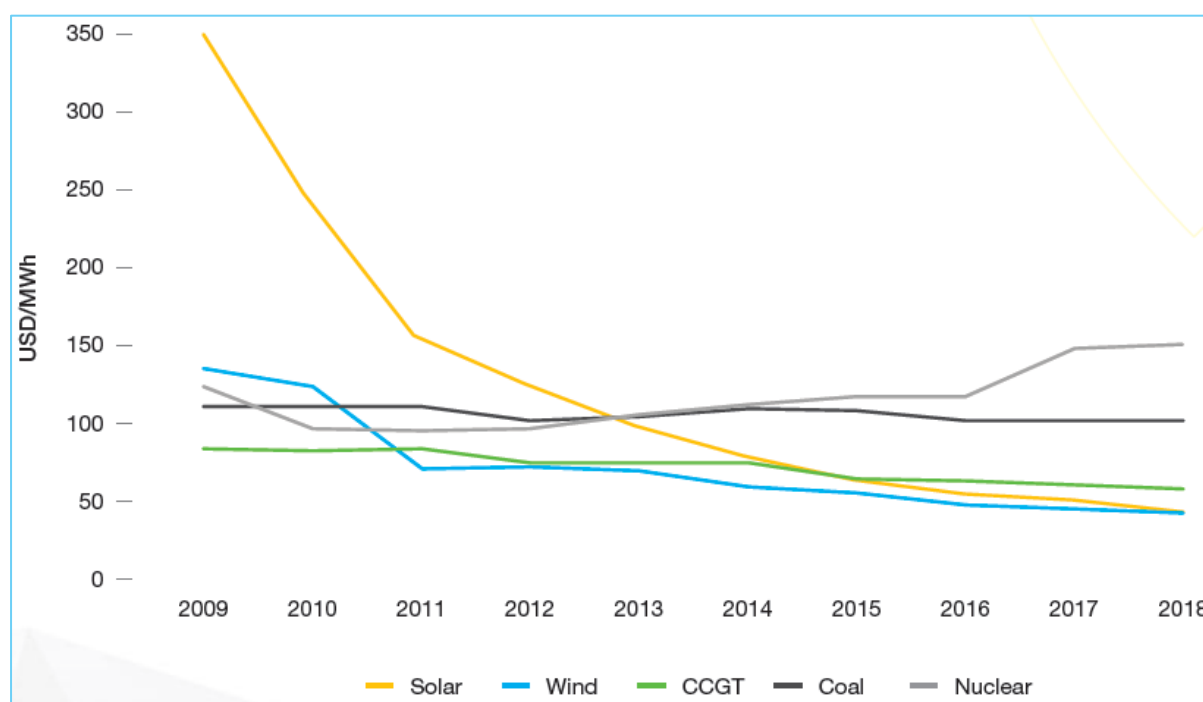


Figura 14. Costos de generación de electricidad solar fotovoltaico en comparación con otras fuentes de generación 2009-2018. Fuente: SolarPower Europe

Otro dato relevante se puede visualizar en la Figura 15; el LCOE de las plantas solar fotovoltaicas no sólo se mantiene competitivo respecto a las tecnologías que utilizan combustibles fósiles, sino que ocho años atrás era la tecnología más costosa del mercado (IRENA, 2019). Esto se debe principalmente a los mejores mecanismos de financiamiento internacionales, las subastas y los avances tecnológicos que se dieron en la última década (SolarPower Europe, 2019). Esta reducción significativa en el costo de las instalaciones SFV se debe también a la entrada de China al mercado mundial. Por otro lado, muchos países impulsaron la participación de la energía SFV en sus matrices energéticas como una

política de estado, lo que permitió que los fabricantes de módulos fotovoltaicos chinos ganaran una mayor parte del mercado mundial. Esto abrió a sus vez nuevos mercados y permitió que el costo del Watt Pico disminuyera año a año, como en 2018, que se redujo en un 29% (REN21, 2019).

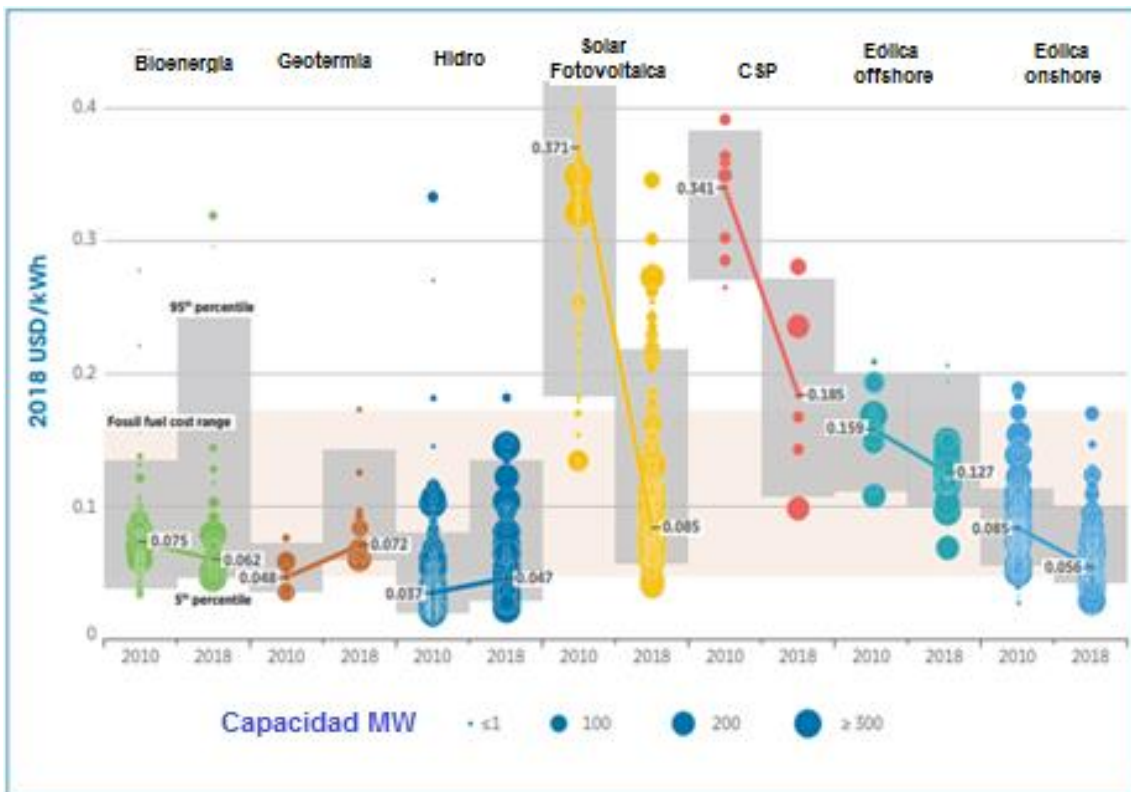


Figura 15. LCOE global de tecnologías de generación de energía renovables a gran escala 2010-2018. Fuente: IRENA.

En el informe *Trends 2018 in photovoltaic markets* realizado por el Programa de Sistemas Fotovoltaicos de la Agencia Internacional de Energía (IEA-PVPS, *International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme*)¹ se puede observar la dispersión del LCOE por país, según se muestra en la Figura 16 (IAE-PVPS, 2018)

¹ Los 32 miembros de PVPS son: Alemania, Australia, Austria, Bélgica, Canadá, Chile, China, Corea del Sur, Dinamarca, España, Estados Unidos, Unión Europea, Finlandia, Francia, Holanda, International Copper Association, Israel, Italia, Japón, Malaysia, Marruecos, México, Noruega, Portugal, the Solar Energy Industries Association (SEIA), the Smart Electric Power Alliance (SEPA), SolarPower Europe, Sudáfrica, Suecia, Suiza, Tailandia, Turquía.

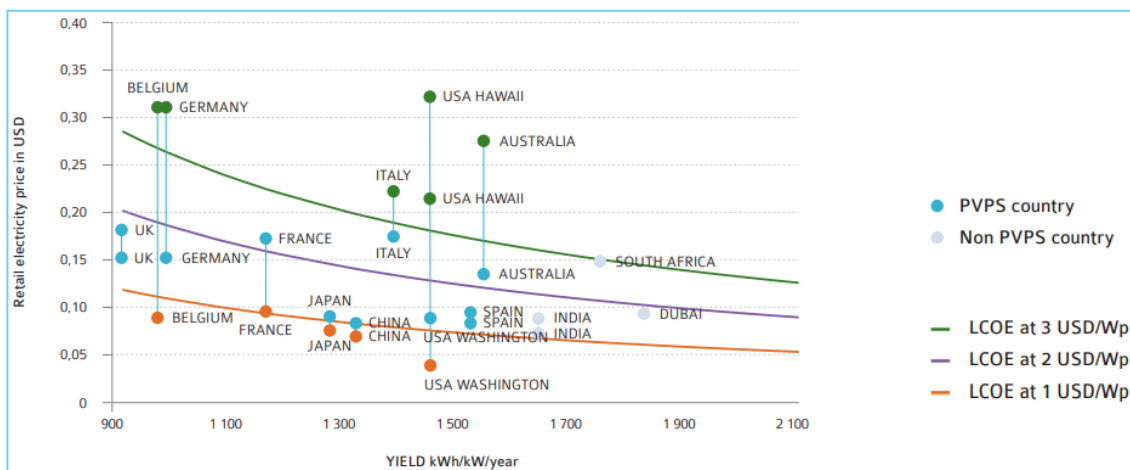


Figura 16. LCOE de generación SFV en función de la irradiancia y los costos mayoristas en los mercados clave. Fuente: IAE-PVPS

El Factor de Capacidad (FC) de la tecnología SFV está intrínsecamente asociado a la variabilidad del recurso solar en diferentes partes del mundo, sin embargo, se evidencia que el mismo está en constante aumento. Se pueden identificar tres causas principales de este comportamiento. En primer lugar, el aumento de incorporación de sistemas de seguimiento, los cuales ya se han convertido en un equipamiento estándar dentro de las plantas SFV de gran escala. En segundo lugar, las mejoras en los inversores han sido de relevancia, ya que la digitalización ha permitido un mejor rendimiento por parte de los mismos. Tercero y quizás lo más importante, es la mejora continua de la industria de los módulos SFV, que ha logrado aumentar la eficiencia de los mismos a través de mejoras en los procesos de fabricación y mejoras tecnológicas (como son los módulos bifaciales) (SolarPower Europe, 2019). En la Figura 17² se compara la evolución del CAPEX, el FC y el LCOE a nivel mundial de la tecnología solar fotovoltaica.

² Los costos se expresan en kilowatt de corriente continua (DC) mientras que los factores de capacidad son expresados como un valor de AC a DC.

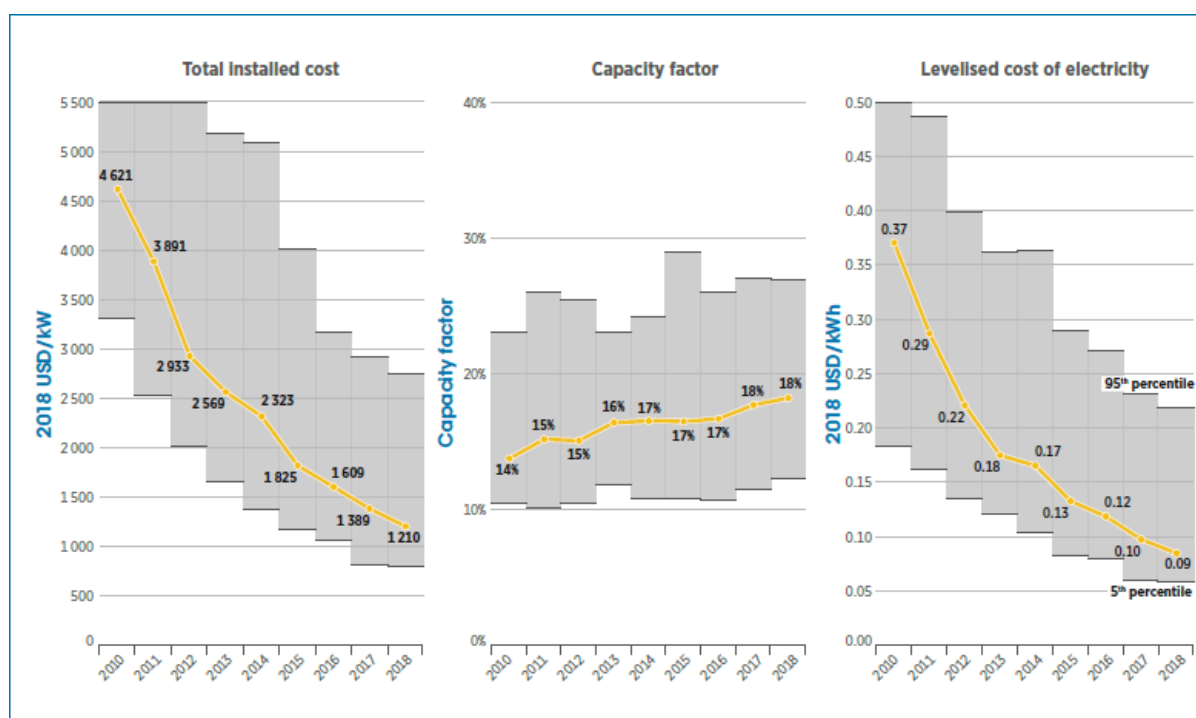


Figura 17. Comparación del CAPEX, Factor de Capacidad y LCOE de la tecnología SFV 2010-2018. Fuente: IRENA

SFV A NIVEL MUNDIAL

Dado que la demanda de la tecnología SFV se está desplegando y expandiendo alrededor de todo el mundo, se ha convertido en la opción de generación de energía más competitiva en una gran cantidad de mercados. De hecho, más de once países han agregado más de 1 GW de nueva capacidad instalada en sus matrices energéticas en 2018, logro que sólo nueve alcanzaron en 2017 y 7 en 2016. Hacia finales de 2018, al menos 32 países han instalado 1 GW o más, habiendo sido 29 el año anterior (REN21, 2019).

Como puede apreciarse en la Figura 18, la capacidad instalada mundial de SFV a finales de 2017 era de 407 GW y creció en un 25% alcanzando los 509,3 GW en 2018. También en la figura puede observarse la explosión que tuvo esta tecnología. A principios del siglo XXI, los parques solares de gran escala, que habían comenzado en Alemania con el esquema feed-in tariff, han aumentado más de 300 veces su capacidad instalada a nivel mundial. (REN21, 2019). De todos modos, es notorio resaltar, que el verdadero crecimiento exponencial se produce cuando ingresan en el mercado los países asiáticos del Pacífico (APAC – *Asia Pacific Countries*), China y los países de Medio Oriente Asiático (MEA – *Middle East Asia*), englobando al día de hoy más de la mitad de la capacidad instalada de esta tecnología (SolarPower Europe, 2019).

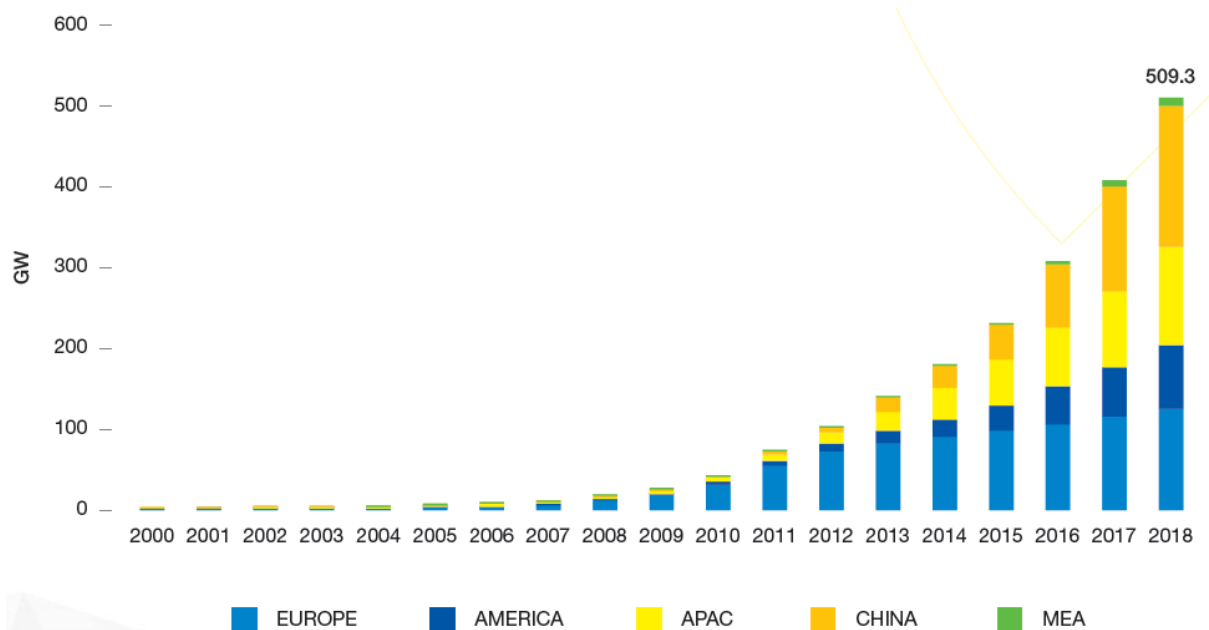


Figura 18. Capacidad instalada de SFV en el mundo 2000-2018. Fuente: SolarPower Europe

Si bien en 2018 por primera vez se superó la barrera de los 100 GW instalados en un año y se instalaron 3,9 GW más que en 2017 (102,4 GW en 2018 vs 98,5 GW en 2017) (SolarPower Europe, 2019), las inversiones medidas en unidades monetarias han disminuido como se muestra en la Figura 19. Esta caída se debe a importantes desarrollos regionales o específicos de varios países (el más notable fue el de China en 2018 por sus cambios en las políticas de estado en materia de energía), y principalmente a la tendencia global de disminución de los costos de capital para las tecnologías de energías renovables (BloombergNEF, 2019).

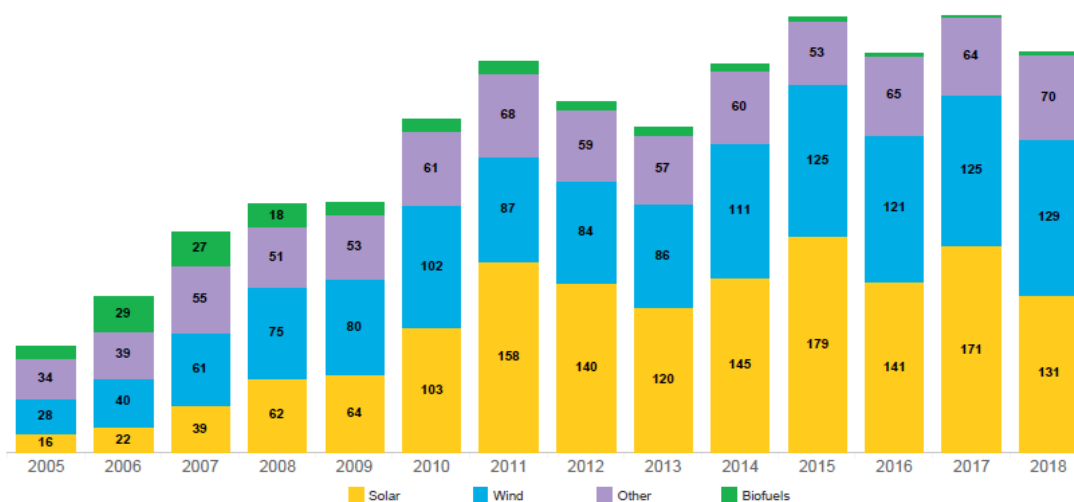


Figura 19. Nuevas inversiones globales en energía limpia, por sector 2005-2018 en miles de millones de dólares. Fuente: BloombergNEF

Como se ha mencionado con anterioridad, en el año 2018 se han incorporado 102 GW de nueva capacidad de SFV a nivel mundial, siendo la tecnología que más aportó a la matriz energética mundial según se observa en la Figura 20. A pesar de las grandes contribuciones en términos de nueva capacidad instalada, la generación de energía SFV mundial sólo aporta el 2,2% de la matriz de energía

eléctrica. De todos modos, comparando con la generación que la SFV aportaba en 2008, el crecimiento fue extraordinario, alcanzando alrededor de un 2.000% (SolarPower Europe, 2019).

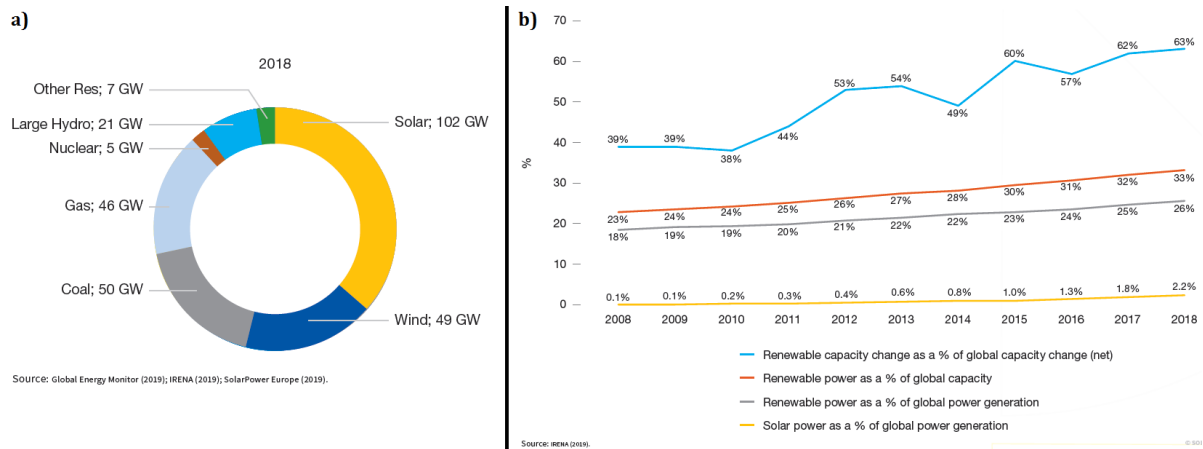


Figura 20. a) Nueva capacidad incorporada a la red en 2018 por tecnología. b) Participación de las renovables en capacidad instalada y generación de energía en el mundo 2008-2018. Fuente: SolarPower Europe

Lógicamente el aporte a la generación de energía posee distinta participación en cada uno de los países, como puede apreciarse en la Figura 21 desarrollada por el IAE-PVPS. Se puede apreciar la contribución teórica a la demanda de energía eléctrica en los países de IEA-PVPS, según la capacidad instalada de SFV a finales de 2018 (IAE-PVPS, 2019). La Figura 22 muestra la participación de SFV per cápita en 2017 (IAE-PVPS, 2018).

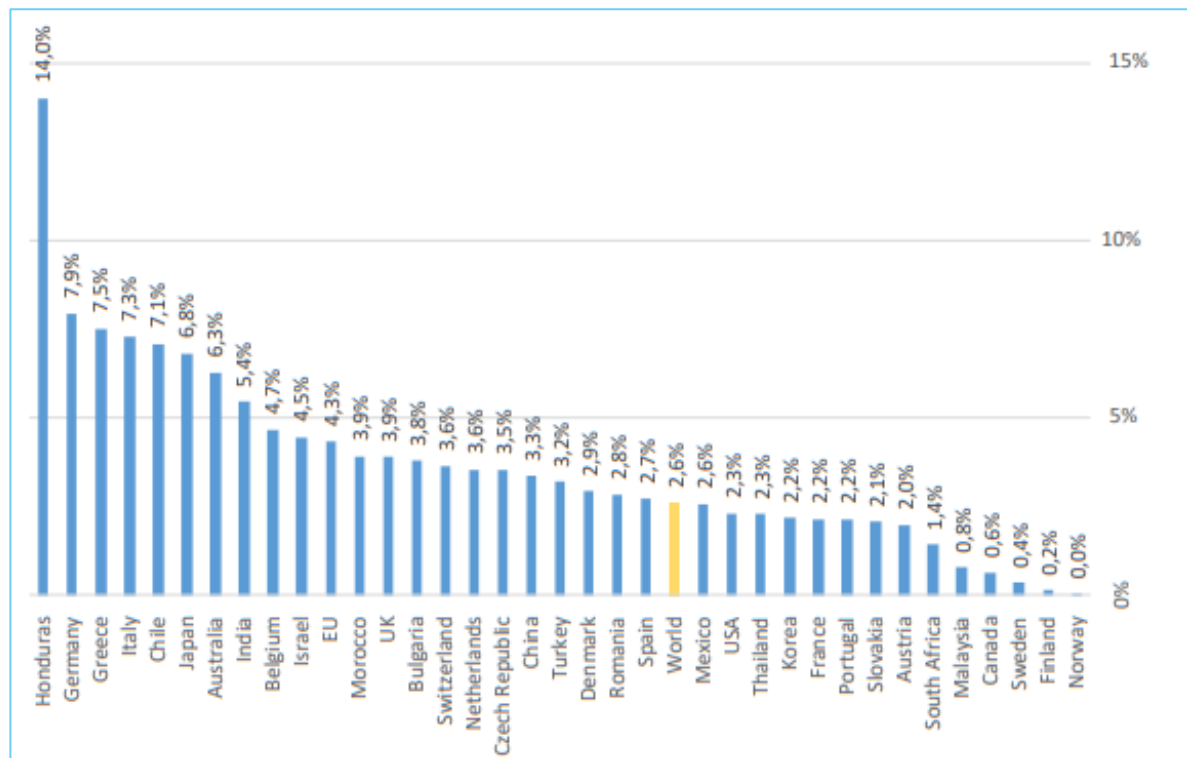


Figura 21. Generación de energía SFV teórica en 2018. Fuente: IEA-PVPS

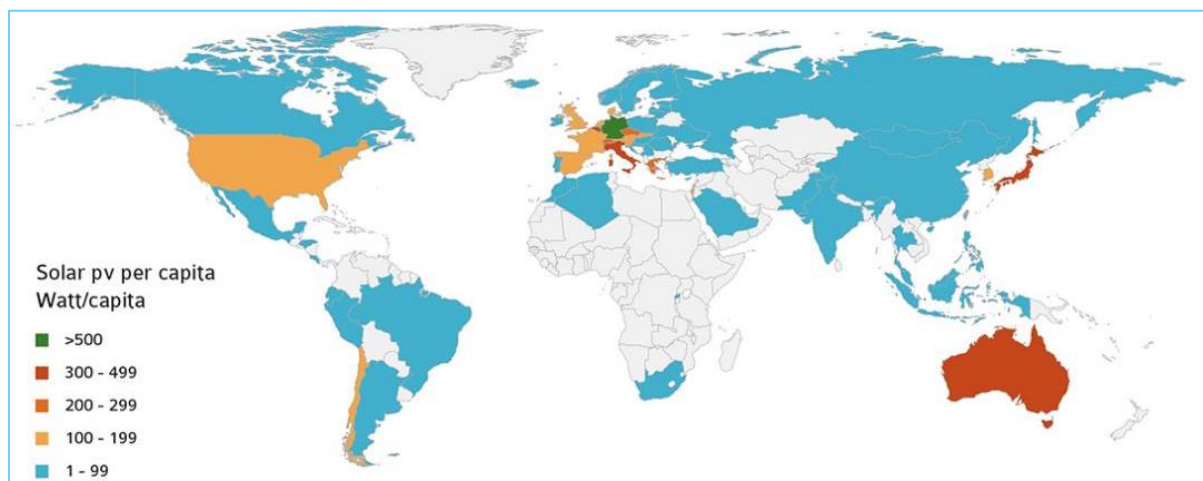


Figura 22. Participación fotovoltaica per cápita en 2017. Fuente: IEA-PVPS

Vale la pena remarcar lo siguiente, que un país cuente con una participación baja en la generación de energía eléctrica a partir de la tecnología SFV no significa que posean poca capacidad instalada. De hecho, China es el país con mayor capacidad instalada en SFV del mundo con 176,1 GW (seguido muy por detrás por Estados Unidos con 62,4 GW, Japón con 56 GW y Alemania con 45,3 GW) y genera solamente un 3,3% de su energía eléctrica con esta tecnología (REN21, 2019). En la Figura 23 se observa que entre los cuatro países nombrados se agrupa el 66% de la capacidad instalada mundial (SolarPower Europe, 2019).

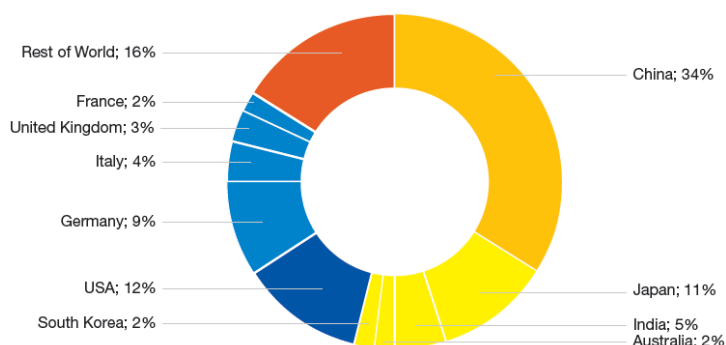


Figura 23. Top 10 de mayores mercados de capacidad instalada de solar fotovoltaico en 2018. Fuente: SolarPower Europe

En cuanto a la producción y eficiencia de celdas fotovoltaicas, según un reporte del Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE, 2019) publicado el 14 de febrero de 2019, las máximas eficiencias de laboratorio alcanzadas en una celda SFV fueron las incluidas en la Tabla 2, mientras que la Figura 24 representa la producción anual de 2017 junto con la participación de cada tecnología

Silicio Monocristalino	Si-mono	26,7%
Silicio Policristalino	Si-poly	22,3%
III-V multijuntura	III-V MJ	46,0%
Teluluro de Cadmio	CdTe	21,7%
Cobre Indio Galio Selenio	CIGS	21,0%

Tabla 2. Eficiencias record alcanzadas en laboratorio de diferentes tecnologías SFV. Fuente: Fraunhofer ISE

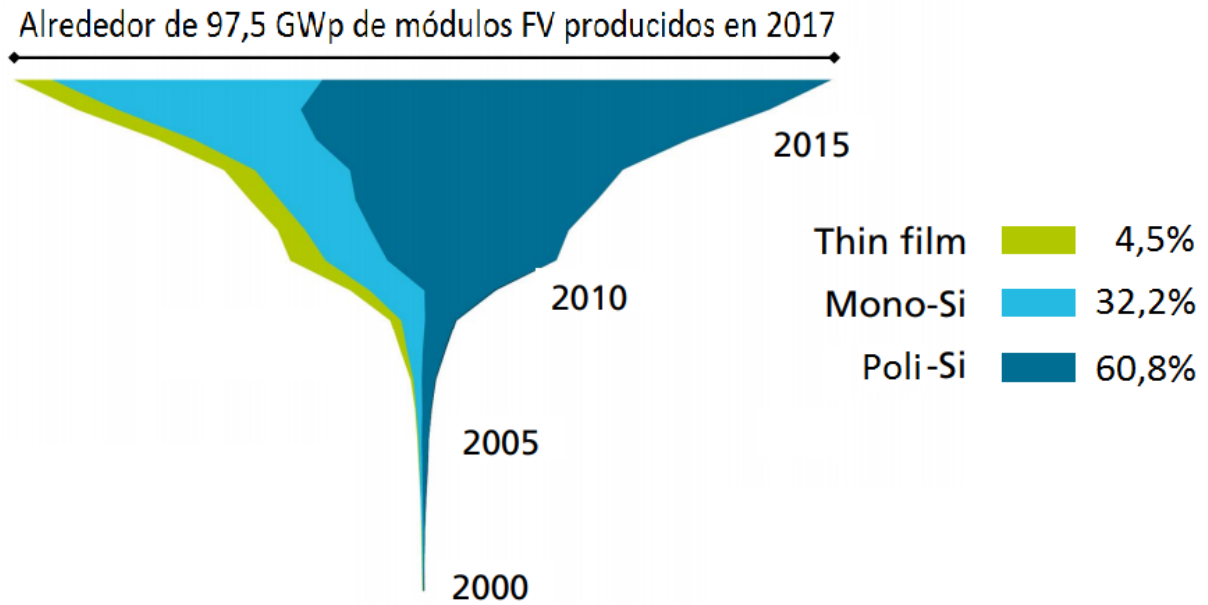


Figura 24. Participación de cada tecnología SFV en el mercado entre los años 2000-2017. Fuente: Fraunhofer ISE

Respecto al empleo, según las estimaciones realizadas por IRENA, el sector solar fotovoltaico empleó alrededor de 3,6 millones de personas en 2018, en donde aproximadamente el 85% de esos empleos se ubican en Asia, seguidos por América del Norte con 6,4%, África con 3,9% y Europa con 3,2%. De todos modos, como es común en esta tecnología, el país que sobresale es China con el 61% del total de los empleos, dado que es el mayor productor de equipos requeridos por esta tecnología además de ser el mercado más grande en cuanto a capacidad instalada (IRENA, 2019). La Figura 25 refleja esta situación.

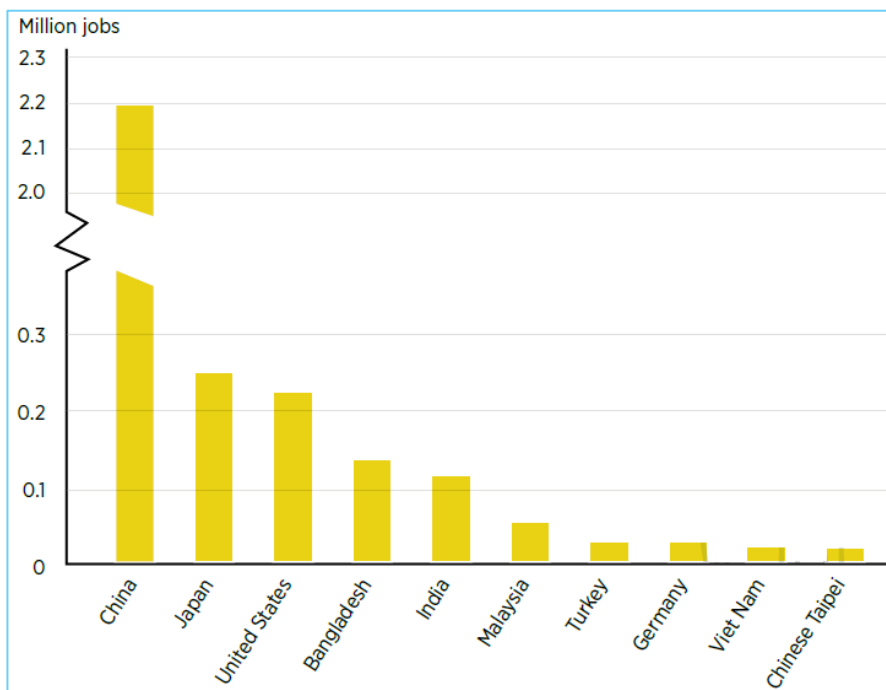


Figura 25. Top 10 países con mayor empleo en solar fotovoltaica. Fuente: IRENA

SFV EN ARGENTINA

El desarrollo de la energía SFV de gran escala en Argentina no ha sufrido de grandes avances hasta la llegada del Programa RenovAr en 2016. Hasta ese momento, sólo cinco³ plantas solar fotovoltaicas se encontraban operando comercialmente, sumando un total de 8,68 MW.

Luego de la sanción de la Ley 27.191 del 15 de octubre 2015 y su reglamentación por medio del Decreto 531 del 30 de marzo de 2016, se lanzó el Programa RenovAr el cual provocó la adjudicación de proyectos solar fotovoltaicos por más de 1.700 MW en sus cuatro rondas. Además, por medio del Mercado a Término de Energías Renovables (MaTER) ya se añadieron aproximadamente 300 MW más a la matriz energética argentina.

MARCO JURÍDICO

- Ley 26.190 modificada por la **Ley 27.191**: Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica.
- **Decreto 531/2016**: Reglamentación de la Ley 27.191
- **Resolución ex MEyM 72/2016** modificada por la **Resolución SGE 414/2019**: Certificado de Inclusión al Régimen de Fomento de las Energías Renovables
- **Decreto DNU 882/2016**: FODER
- **Resolución ex MEyM 136/2016**: Programa RenovAr – Ronda 1
- **Resolución ex MEyM 213/2016**: Adjudicación Programa RenovAr – Ronda 1
- **Resolución ex MEyM 252/2016**: Programa RenovAr – Ronda 1.5
- **Resolución ex MEyM 281/2016**: Adjudicación Programa RenovAr – Ronda 1.5
- **Resolución ex MEyM 275/2017**: Programa RenovAr – Ronda 2
- **Resolución ex MEyM 473/2017**: Adjudicación Programa RenovAr – Ronda 2
- **Resolución ex MEyM 488/2017**: Adjudicación Programa RenovAr – Ronda 2 Fase 2
- **Resolución ex MEyM 281/2017**: Mercado a Término de Energías Renovables (MaTER)
- **Disposición ex SSER 1/2018**: Mercado a Término de Energías Renovables (MaTER)
- **Resolución SGE 90/2019**: Programa RenovAr – Ronda 3 (MiniRen)

³ Se cuenta como una planta aparte a la Ampliación de San Juan I dado que cuenta con un medidor diferente.

- **Disposición SSERyEE 91/2019:** Adjudicación Programa RenovAr – Ronda 3

MAPA DE RADIACION SOLAR ARGENTINO

En mayo de 2007 Hugo Grossi Gallegos y Raúl Righini publican el Atlas Solar de la República Argentina. Los objetivos principales son desarrollar proyectos de generación de energía eléctrica, estudiar el impacto que los cambios en los niveles de radiación debido a las variaciones periódicas o anómalas tienen sobre las condiciones climáticas y determinar la influencia que la radiación solar a nivel de superficie tiene en el rendimiento de cosechas. Además permite evaluar la evapotranspiración potencial del suelo y determinar así su estado hídrico y planificar el secado de productos vegetales con mayor eficiencia (Grossi Gallegos & Righini, 2007)

A continuación, en la Figura 26 se presentan los mapas de radiación solar de Argentina para Enero y Julio.

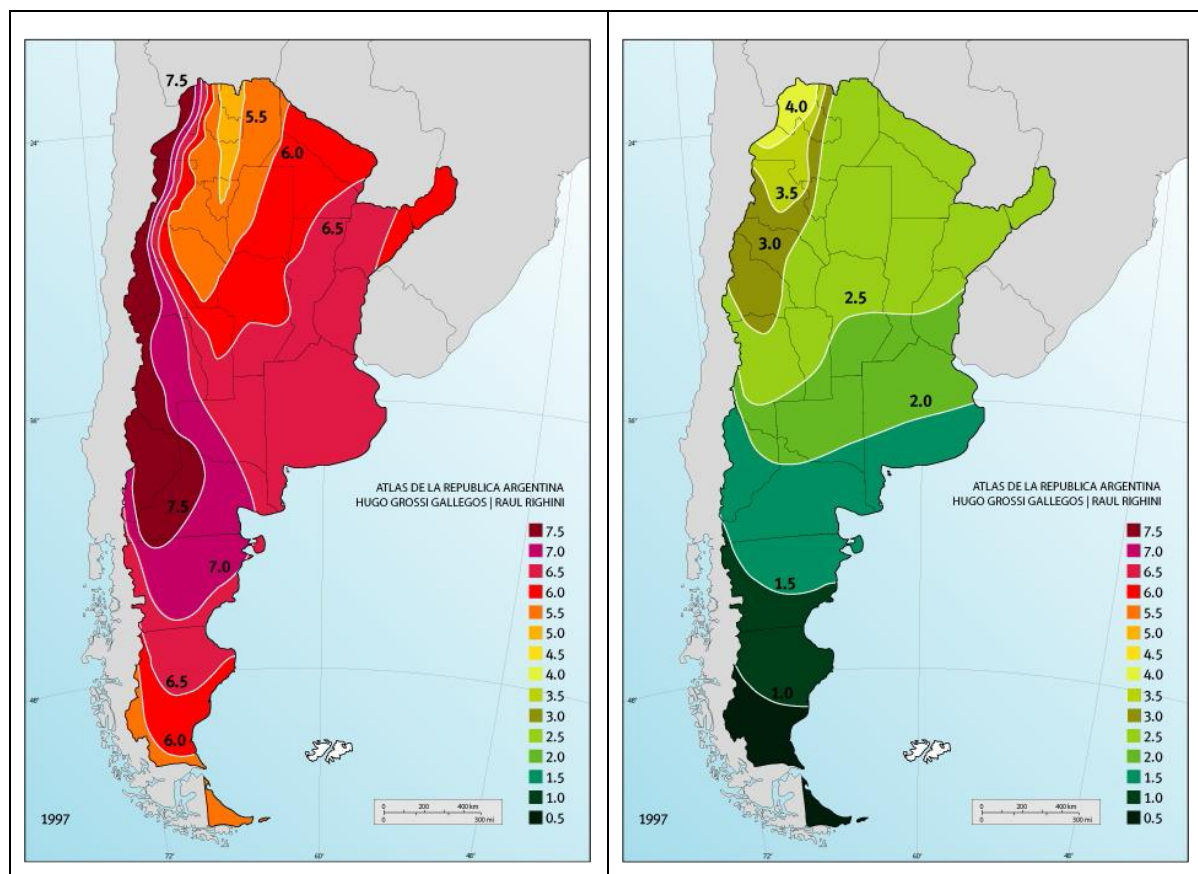


Figura 26. Mapas de radiación solar en Argentina en enero (izquierda) y julio (derecha) en kWh/m². Fuente: Atlas de Energía Solar de Argentina

LEY 26.190, GENREN y RESOLUCIÓN SE 108/2011

El 27 de diciembre del año 2006 se sancionó en el Congreso de la Nación la ley 26.190 – Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica –, la cual tenía como objeto *“declarar de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energía renovables con destino a la prestación de servicio público como así también la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos con esa finalidad. El objetivo final era el de poder lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el OCHO POR CIENTO (8%) del consumo de energía eléctrica nacional, en el plazo de DIEZ (10) años a partir de la puesta en vigencia del presente régimen.*

La Licitación Pública Nacional e Internacional EE N° 001/2009 se llevó a cabo por medio de Energía Argentina Sociedad Anónima (ENARSA), cuyo objetivo era adjudicar proyectos de energías renovables con contratos a 15 años con posibilidad de extenderlos 18 meses. Esta licitación es más conocida como Programa de Generación de Energía de Fuentes Renovables (GENREN).

El GENREN licitó 10 MW para la tecnología SFV a instalarse en regiones con irradiación mayor o igual a 5 MWh/m². Los resultados fueron la presentación de 6 proyectos por 20 MW donde se adjudicaron 3 por un total de 8 MW.

PROYECTO	PROVINCIA	POTENCIA	PRECIO	HABILITACIÓN COMERCIAL
Cañada Honda I	San Juan	2 MW	USD 596,55	01/06/2012
Cañada Honda II	San Juan	3 MW	USD 576,15	01/06/2012
Cañada Honda III	San Juan	5 MW	USD 558,50	NO
Chimbera I	San Juan	2 MW	USD 597,84	06/03/2013
Chimbera II	San Juan	3 MW	USD 570,36	NO
Chimbera III	San Juan	5 MW	USD 546,68	NO

Tabla 3. Proyectos SFV adjudicados en GENREN.

Teniendo presente el cumplimiento de la meta establecida por la Ley 26.190, el 29 de marzo de 2011 la Secretaría de Energía decide emitir la Resolución 108. Como resultado de esta resolución, se logra evitar los procesos licitatorios ya que de ahora en más sería posible que un privado pudiese presentar un proyecto de generación de energías renovables en el momento que lo considerase oportuno.

Estos nuevos contratos serían a 15 años con posibilidad de extenderlos 18 meses (igual que los realizados en GENREN), se considerarían todas aquellas tecnologías incluidas en la ley 26.190 y La remuneración a percibir por la parte vendedora y a pagar por la parte compradora se determinaría en base a los costos e ingresos aceptados por la Secretaría de Energía.

Los proyectos no ofertarían un precio ni competirían entre sí, sino que los mismos deberían de presentar junto con la descripción técnica del proyecto, la suma de los costos de instalación, fijos y variables para que la Secretaría de Energía realice el flujo de fondos correspondiente y pudiese determinar el precio por unidad de energía entregada al sistema. Una vez calculado, si el proyecto se encontraba en condiciones de firmar el contrato, se le informaría el precio calculado y de manifestarse de acuerdo se procedía a firmar el contrato, de lo contrario, el proyecto podría dar de baja su oferta.

Los proyectos de la tecnología SFV presentados bajo el esquema de la Resolución SE 108/2011 son los siguientes.

PROYECTO	PROVINCIA	POTENCIA	FIRMA CONTRATO	HABILITACIÓN COMERCIAL
San Juan I	San Juan	1,2 MW	25/10/2011	13/05/2011
Catamarca I	Catamarca	25 MW	26/01/2015	NO
Cerros del Sol	San Luis	5,2 MW	03/11/2014	NO
Solares de la Punta	San Luis	5,2 MW	15/12/2014	NO
Caleta Olivia	Santa Cruz	1,3 MW	09/06/2014	NO
Valle Solar I	Mendoza	20 MW	26/01/2015	NO
Ullum	San Juan	20 MW	05/08/2015	NO
Villa Unión	La Rioja	10 MW	06/05/2015	NO
Las Lomitas	San Juan	2,5 MW	08/05/2015	NO
San Juan I – Ampliación	San Juan	0,48	-	29/05/2018

Tabla 4. Proyectos SFV presentados a través de la Resolución SE 108/2011

A continuación, en las Figuras 27, 28 y 29 se muestra la producción de energía de los parques SFV con habilitación comercial que participaron tanto en el GENREN como en el proceso de la Resolución SE 108/2011. En la Tabla 5 se detallan las cinco plantas solar fotovoltaicas con su potencia y la generación anual.

AÑO	San Juan I 1,2 MW	San Juan I - Amp. 0,48 MW	Cañada Honda I 2 MW	Cañada Honda II 3 MW	Chimbera I 2 MW
2011	1.174				
2012	1.599		540	404	
2013	1.589		998	676	658
2014	1.611		991	654	894
2015	1.496		930	607	832
2016	1.467		908	590	803
2017	1.697		1.034	652	1.004
2018	1.850	2.157	1.226	744	1.212
2019	938	2.577	769	472	743
TOTAL	13.421	4.734	7.397	4.801	6.146


 Años incompletos

Tabla 5. Generación de las cinco plantas fotovoltaicas construidas bajo el Programa GENREN o Resolución SE 108/2011.
 Fuente: CAMMESA

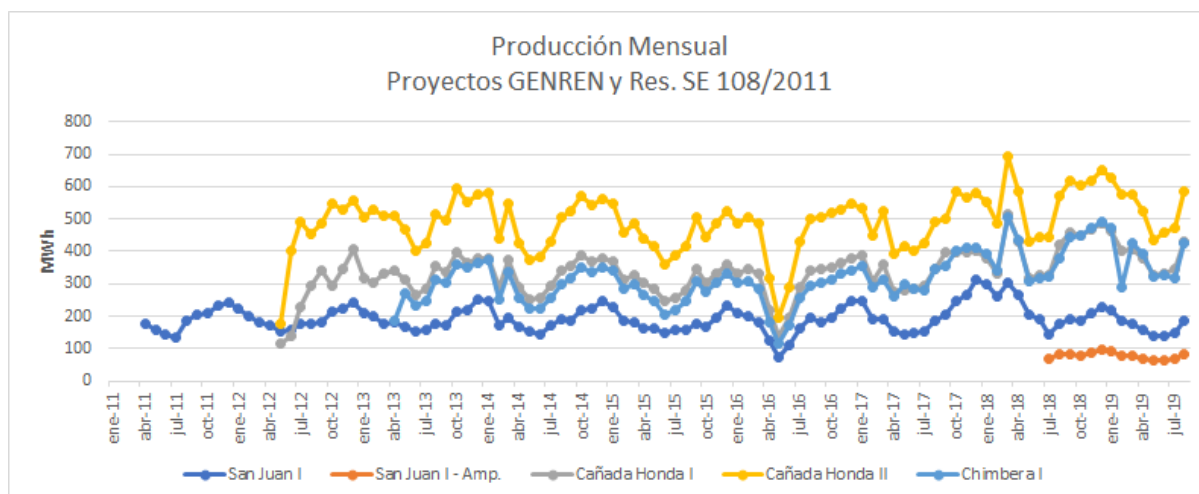


Figura 27. Generación mensual de las cinco plantas fotovoltaicas construidas bajo el Programa GENREN o Resolución SE 108/2011. Fuente: CAMMESA

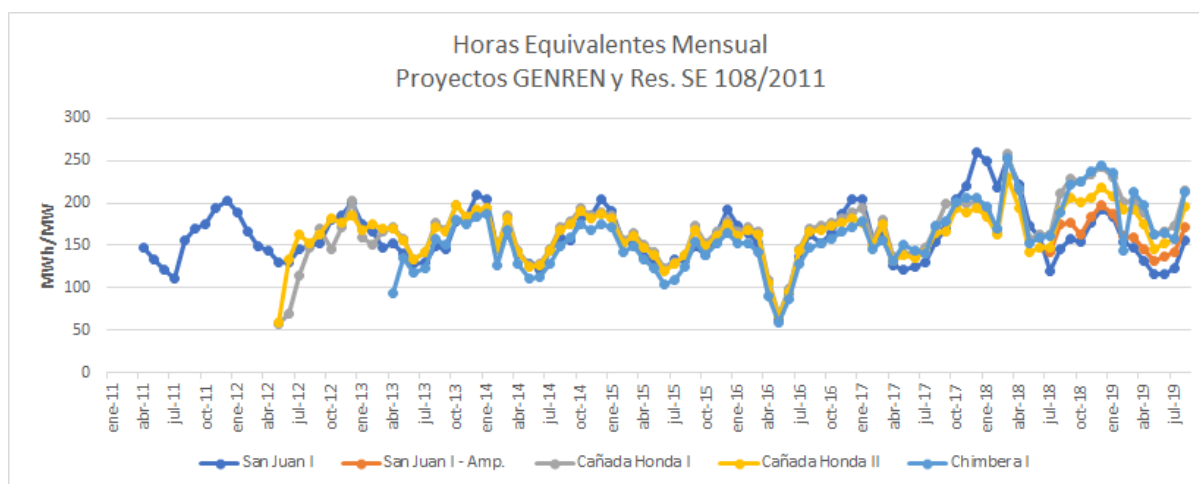


Figura 28. Horas Equivalentes mensual de las cinco plantas fotovoltaicas construidas bajo el Programa GENREN o Resolución SE 108/2011.

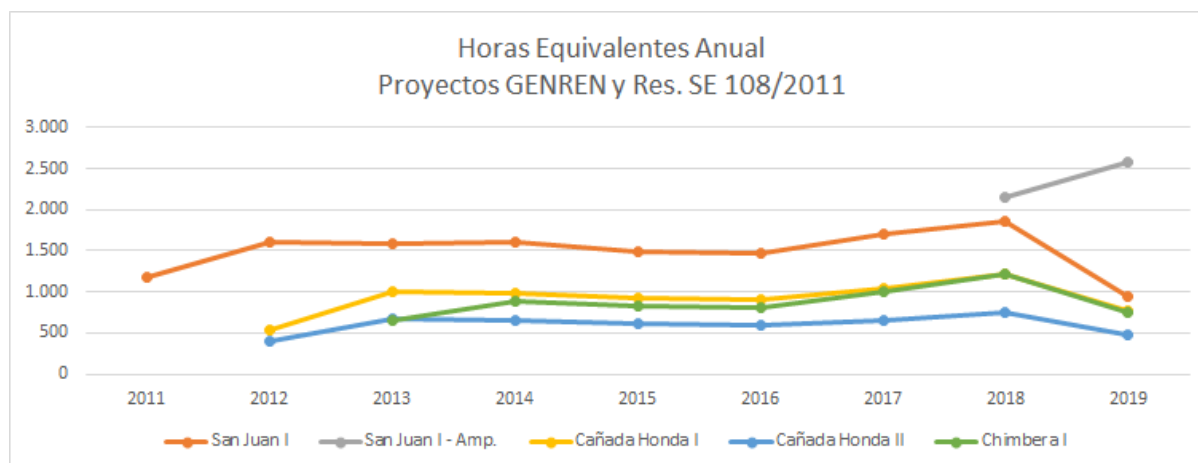


Figura 29. Figura 30. Horas Equivalentes anual de las cinco plantas fotovoltaicas construidas bajo el Programa GENREN o Resolución SE 108/2011.

LEY 27.191 Y PROGRAMA RENOVAR

Según el *Informe de Energías Renovables en Argentina. Informe a diciembre 2016* elaborado por la Subsecretaría de Energías Renovables (SSERyEE, 2016), con la sanción de la Ley 27.191 el 15 de octubre de 2015 se establecieron nuevos objetivos para la participación de las energías renovables en la matriz energética argentina, con una meta del 20% de energía de origen renovable para el año 2025. Además, se establecieron objetivos intermedios de la siguiente manera:

1. Al 31 de diciembre de 2017, deberán alcanzar como mínimo el ocho por ciento (8%) del total del consumo propio de energía eléctrica.
2. Al 31 de diciembre de 2019, deberán alcanzar como mínimo el doce por ciento (12%) del total del consumo propio de energía eléctrica.
3. Al 31 de diciembre de 2021, deberán alcanzar como mínimo el dieciséis por ciento (16%) del total del consumo propio de energía eléctrica.
4. Al 31 de diciembre de 2023, deberán alcanzar como mínimo el dieciocho por ciento (18%) del total del consumo propio de energía eléctrica.
5. Al 31 de diciembre de 2025, deberán alcanzar como mínimo el veinte por ciento (20%) del total del consumo propio de energía eléctrica.

La ley fue reglamentada por los Decretos N° 531/16 y N° 882/16 y también establece que los consumidores finales podrán cumplir con los objetivos prescriptos a través de la compra de electricidad a los distribuidores y/o directamente a CAMMESA. Los usuarios del mercado mayorista con una demanda de potencia media mayor a 300 kW podrán cumplir los objetivos a través de la suscripción de contratos de abastecimiento en el mercado privado (ya sea directamente con productores de energía independientes o con comercializadores de energía) o a través de proyectos de autogeneración.

Como primer paso para dar cumplimiento a la Ley de Energías Renovables N° 27.191, en mayo de 2016, el gobierno argentino lanzó el programa RenovAr, una convocatoria abierta que contempla una serie de beneficios fiscales y mecanismos de financiamiento, como así también mejoras regulatorias y contractuales con el objeto de sortear algunos de los obstáculos de inversión que provocaron el fracaso de los planes anteriores.

Las empresas desarrolladoras de proyectos adjudicadas celebran un Contrato de Abastecimiento de Energía Eléctrica Renovable por 20 años con CAMMESA, que actúa como comprador en representación de los distribuidores y de los usuarios del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM).

Junto con el Contrato de Abastecimiento, las empresas desarrolladoras del proyecto celebrarán un Acuerdo de Adhesión al Fideicomiso FODER, en virtud del cual tendrán el carácter de beneficiarios del Fideicomiso FODER. El FODER fue creado por la Ley N° 27.191 y el contrato fue aprobado y firmado por el MINEM en virtud de la Resolución N° 147/16. El FODER es un fideicomiso público estructurado para garantizar el pago de los contratos. También se le suma al FODER una garantía soberana de segunda instancia y una tercera garantía provista por el Banco Mundial.



Figura 31. Estructura Contractual y de Garantías del Programa RenovAr

RENOVAR – RONDA 1

El 5 de septiembre de 2016 se recibieron 123 ofertas en la Ronda 1 del Programa RenovAr. El total de potencia ofertada fue de 6.343 MW, seis veces más que los 1.000 MW licitados inicialmente. De todos ellos 58 fueron SFV que representaron 2.811 MW. La adjudicación fue por 400 MW para los siguientes proyectos:

PROYECTO	PROVINCIA	POTENCIA	PRECIO [USD/MWh]	HABILITACIÓN COMERCIAL
P.S.F CAUCHARI I	JUJUY	100 MW	60,00	NO
P.S.F CAUCHARI II	JUJUY	100 MW	60,00	NO
P.S.F CAUCHARI III	JUJUY	100 MW	60,00	NO
P.S.F. LA PUNA	SALTA	100 MW	58,98	NO

Tabla 6. Proyectos Adjudicados en el Programa RenovAr – Ronda 1.

También en este proceso se invitó a proyectos que hubiesen participado en el marco del GENREN y de la Resolución SE 108/2011 y cumplieren con las condiciones establecidas en la Resolución MEyM 202/2016 a readecuarse a las nuevas condiciones.

PROYECTO	PROVINCIA	POTENCIA	PRECIO [USD/MWh]	HABILITACIÓN COMERCIAL
P.S.F. SOLARES DE LA PUNTA I	SAN LUIS	5 MW	58,98	NO
P.S.F. CERROS DEL SOL	SAN LUIS	5 MW	58,98	NO

Tabla 7. Proyectos Adjudicados en el marco de la Resolución MEyM 202/2016

RENOVAR – RONDA 1.5

Debido al éxito de la Ronda 1, se convocó a proyectos de las tecnologías solar y eólica que habían participado en la Ronda 1 a que ajustarán sus precios y así competir de nuevo en la Ronda 1.5 para también poder ser adjudicados. El 11 de noviembre de 2016 se recibieron 47 ofertas en la Ronda 1.5 del Programa RenovAr. El total de potencia ofertada fue de 2.486 MW, cuatro veces más que los 600 MW licitados inicialmente.

Para la tecnología SFV se presentaron 28 proyectos por 925 MW. La adjudicación fue por 516 MW para los siguientes proyectos:

PROYECTO	PROVINCIA	POTENCIA	PRECIO [USD/MWh]	HABILITACIÓN COMERCIAL
P.S.F. LAVALLE	MENDOZA	17,6 MW	48,75	NO
P.S.F. LUJAN DE CUYO	MENDOZA	22 MW	48,75	NO
P.S.F. LA PAZ	MENDOZA	14,08 MW	48,75	NO
P.S.F. PASIP	MENDOZA	1,15 MW	47,25	07/09/2019
P.S.F. GENERAL ALVEAR	MENDOZA	17,6 MW	48,75	NO
P.S.F. CAFAYATE	SALTA	80 MW	56,28	19/07/2019
P.S.F. CALDENES DEL OESTE	SAN LUIS	24,75 MW	58,90	08/08/2018
P.S.F. FIAMBALA	CATAMARCA	11 MW	53,73	20/09/2019
P.S.F. LAS LOMITAS	SAN JUAN	2 MW	59,20	25/09/2018
P.S.F. SAUJIL	CATAMARCA	22,5 MW	51,93	05/12/2018
P.S.F. SARMIENTO	SAN JUAN	35 MW	52,95	NO
P.S.F. ULLUM N2	SAN JUAN	25 MW	55,23	19/12/2018
P.S.F. ANCHORIS	MENDOZA	21,3 MW	48,00	NO
P.S.F. ULLUM N1	SAN JUAN	25 MW	53,73	19/12/2019
P.S.F. ULLUM 4	SAN JUAN	14 MW	56,50	29/06/2019
P.S.F. LA CUMBRE	SAN LUIS	22 MW	56,70	08/09/2018
P.S.F. ULLUM3	SAN JUAN	32 MW	57,63	22/12/2018
P.S.F. IGLESIA-GUAÑIZUIL	SAN JUAN	80 MW	54,10	27/03/2019
P.S.F. TINOGASTA	CATAMARCA	15 MW	53,43	12/04/2019
P.S.F. NONOGASTA	LA RIOJA	35 MW	56,43	17/04/2019

Tabla 8. Proyectos Adjudicados en el Programa RenovAr – Ronda 1.5

RENOVAR – RONDA 2

El 19 de octubre de 2017 se recibieron 228 ofertas en la Ronda 2 del Programa RenovAr. El total de potencia ofertada fue de 9.402 MW, casi ocho veces más que los 1.200 MW licitados inicialmente. De todos ellos 99 fueron SFV que representaron 5.292 MW. La adjudicación fue por 556,8 MW para los siguientes proyectos:

PROYECTO	PROVINCIA	POTENCIA	PRECIO [USD/MWh]	HABILITACIÓN COMERCIAL
P.S.F. TINOGASTA II	CATAMARCA	6,96 MW	41,70	13/04/2019
P.S.F. SAUJIL II	CATAMARCA	20 MW	41,85	NO
P.S.F. NONOGASTA II	LA RIOJA	20,04 MW	40,44	NO
P.S.F. ALTIPLANO I	SALTA	100 MW	40,80	NO
P.S.F. LA PIRKA	CATAMARCA	100 MW	42,00	NO
P.S.F. ULLUM X	SAN JUAN	100 MW	42,00	NO
P.S.F. VERANO CAPITAL SOLAR ONE	MENDOZA	99,9 MW	42,50	NO
P.S.F. VILLA MARIA DEL RIO SECO	CORDOBA	20 MW	48,95	NO
P.S.F. CURA BROCHERO	CORDOBA	17 MW	49,95	NO
P.S.F. VILLA DOLORES	CORDOBA	26,85 MW	51,90	NO
P.S.F. AÑATUYA I	SANTIAGO. DEL ESTERO	6 MW	52,27	NO
P.S.F. ARROYO DEL CABRAL	CORDOBA	40 MW	49,97	NO

Tabla 9. Proyectos Adjudicadas en el Programa RenovAr – Ronda 2

Debido a la convocatoria, se realizó una Fase 2 de esta Ronda, en donde se llamó a los proyectos que participaron y no quedaron adjudicados a que readequen sus precios, por lo que se sumaron 259,5 MW.

PROYECTO	PROVINCIA	POTENCIA	PRECIO [USD/MWh]	HABILITACIÓN COMERCIAL
P.S.F. TOCOTA	SAN JUAN	72 MW	40,80	NO
P.S.F. ZAPATA	MENDOZA	37 MW	41,76	NO
P.S.F. NONOGASTA IV	LA RIOJA	1 MW	41,76	NO
P.S.F. GUAÑIZUIL IIA	SAN JUAN	100 MW	41,76	NO
P.S.F. LOS ZORRITOS	CATAMARCA	49,5 MW	41,76	NO

Tabla 10. Proyectos Adjudicadas en el Programa RenovAr – Ronda 2 - Fase 2

RENOVAR – RONDA 3 (MINIREN)

El 30 de mayo de 2019 se recibieron 56 ofertas en la Ronda 3 del Programa RenovAr. El total de potencia ofertada fue de 352 MW sobre los 400 MW a disposición. 18 proyectos fueron de tecnología SFV y representaron 128 MW. La adjudicación fue por 96,75 MW para los siguientes proyectos:

PROYECTO	PROVINCIA	POTENCIA	PRECIO [USD/MWh]	HABILITACIÓN COMERCIAL
P.S.F. HELIOS RIO DIAMANTE PV IV	MENDOZA	4 MW	56,74	NO
P.S.F. HELIOS SANTA ROSA PV	MENDOZA	5 MW	56,75	NO
P.S.F. ENERGIAS RENOVABLES LOS ALAMOS	CATAMARCA	9,25 MW	58,00	NO
P.S.F. ENERGIAS RENOVABLES LOS NOGALES	SAN LUIS	9,50 MW	55,90	NO
P.S.F. ENERGIAS RENOVABLES DEL AMANECER	CATAMARCA	9,50MW	58,90	NO
P.S.F. ENERLAND SAN MARTIN	MENDOZA	10 MW	54,22	NO
P.S.F. TINOGASTA TOZZI	CATAMARCA	10 MW	56,80	NO
P.S.F. SAENZ PEÑA	CHACO	10 MW	59,50	NO
P.S.F. CALCHAQUI	SANTA FE	10 MW	59,50	NO
P.S.F. NOGOLI I	SAN LUIS	10 MW	56,99	NO
P.S.F. SOLARES LA ANGOSTURA	SALTA	2 MW	58,99	NO
P.S.F. CAPDEVILLE – LAS HERAS	MENDOZA	2 MW	58,00	NO
P.S.F. ALGARROBO	SAN JUAN	5,5 MW	59,80	NO

Tabla 11. Proyectos Adjudicadas en el Programa RenovAr – Ronda 3

EMPLEO RENOVABLE EN ARGENTINA

Según el informe *Generación de Empleo Energías Renovables (Programa RenovAr y MATER)* elaborado por la Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética en agosto 2018 (SSERyEE, 2018) se calculó que en total, la industria SFV al momento de la emisión del informe se empleaban en los proyectos del Programa RenovAr a 1.835 personas en la fase de construcción y 5 en operación y mantenimiento, proyectándose un total de 4.851 personas para la construcción y 376 en operación y mantenimiento. Por su parte, en el MaTER se proyectó que habría 1.568 empleos en la fase de construcción y 165 en operación y mantenimiento.

Del informe también se desprende la participación que los diferentes rubros poseen dentro de los empleos que puedan generarse. En la fase de Construcción el 3% es administrativo, 24% corresponde a la obra civil, 64% al montaje de equipos, 3% a seguridad e higiene, 1% a socio-ambiental y un 5% restante en otras actividades.

Por su parte, en Operación y Mantenimiento la distribución es la siguiente: 12% administración, 33% operación, 43% mantenimiento y 12% otros.

Lo que resulta interesante resaltar, es que si bien la industria SFV es la segunda industria dentro de las energías renovables que más empleo genera en Argentina, cuando se calcula el empleo por Megawatt instalado su aporte es el menor junto con la energía eólica, empleando a un máximo de 2,8 personas por Megawatt en la fase de Construcción y a 0,2 personas por Megawatt en operación y mantenimiento.

ESTADÍSTICAS RENOVAR

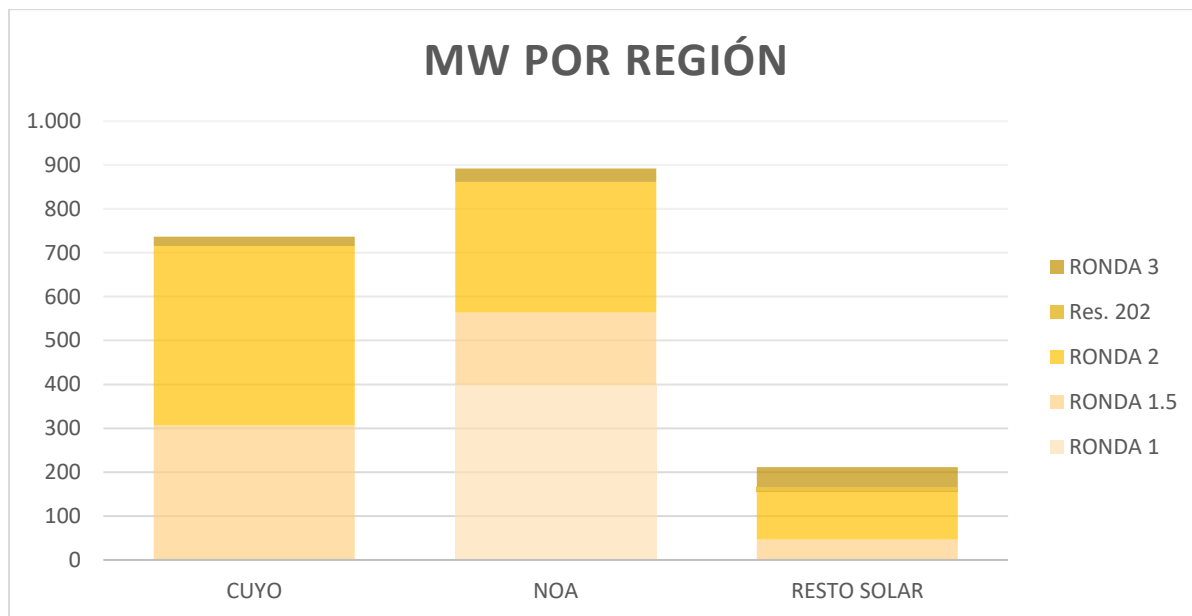


Figura 32. Programa RenovAr. Potencia Adjudicada por Región

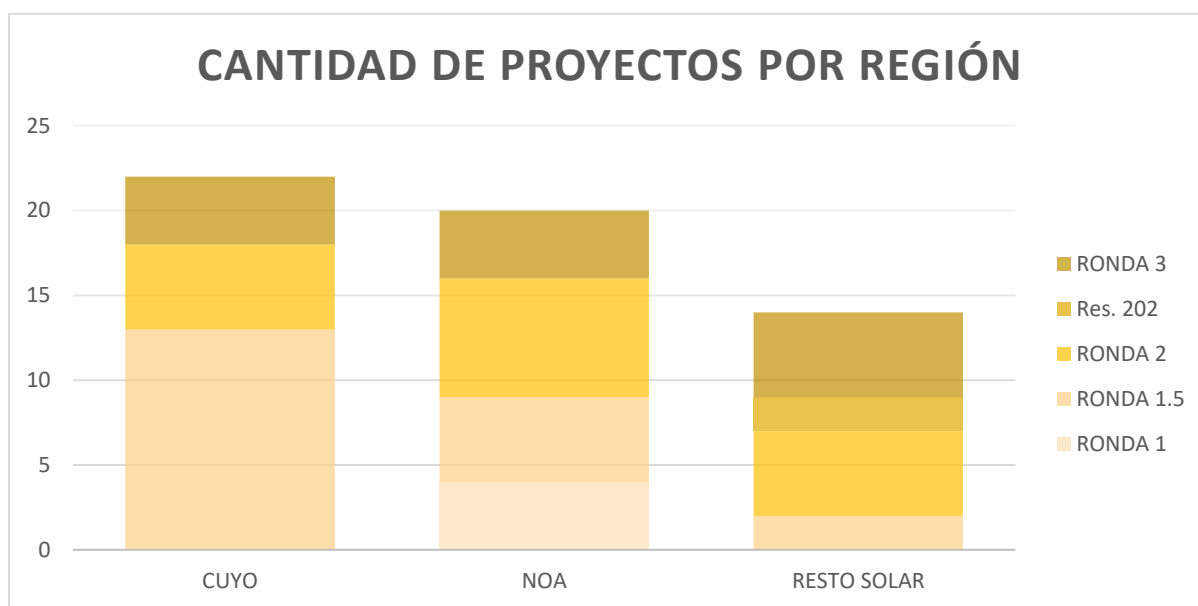


Figura 33. Programa RenovAr. Proyectos Adjudicados por Región

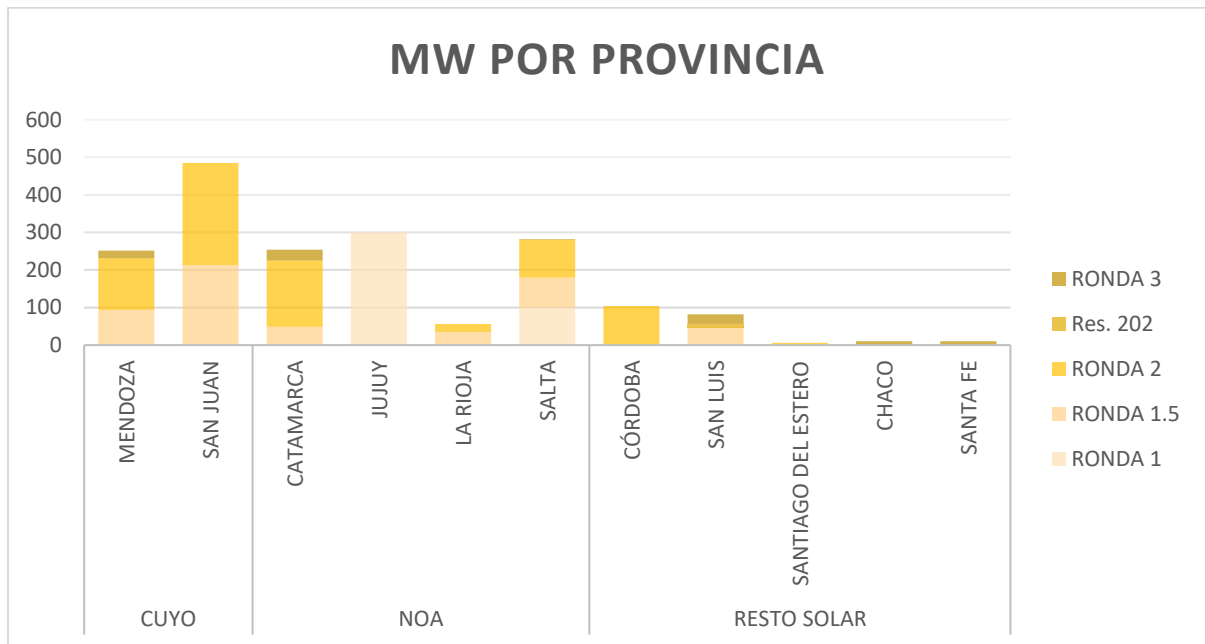


Figura 34. Programa RenovAr. Potencia Adjudicada por Provincia

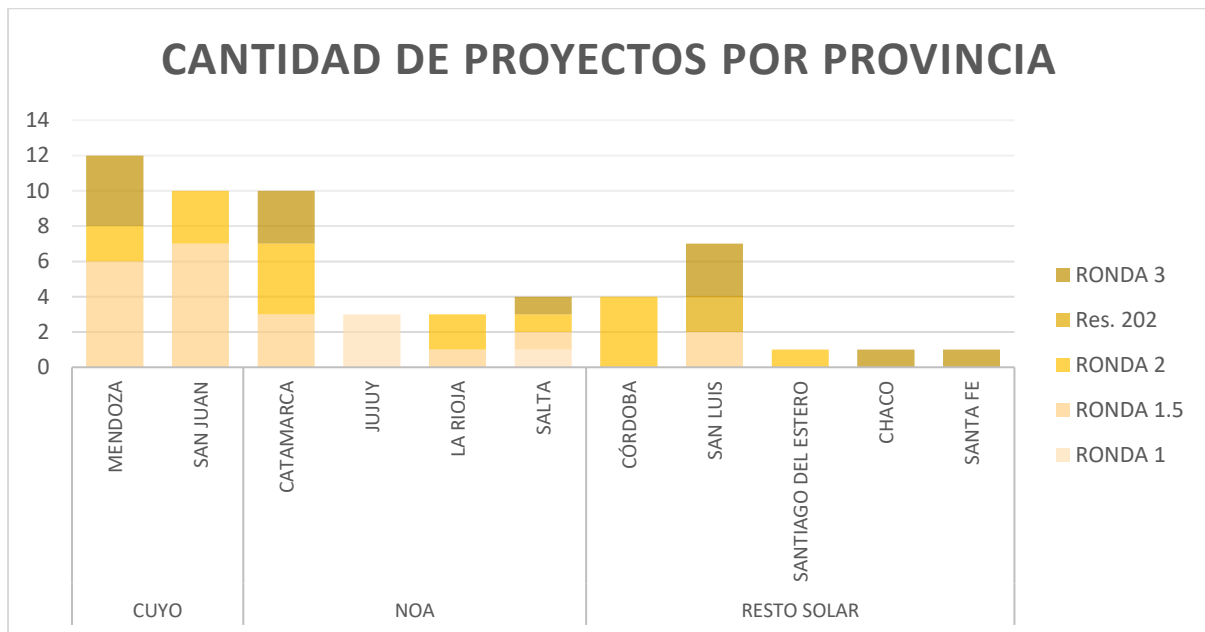


Figura 35. Programa RenovAr. Proyectos Adjudicados por Provincia

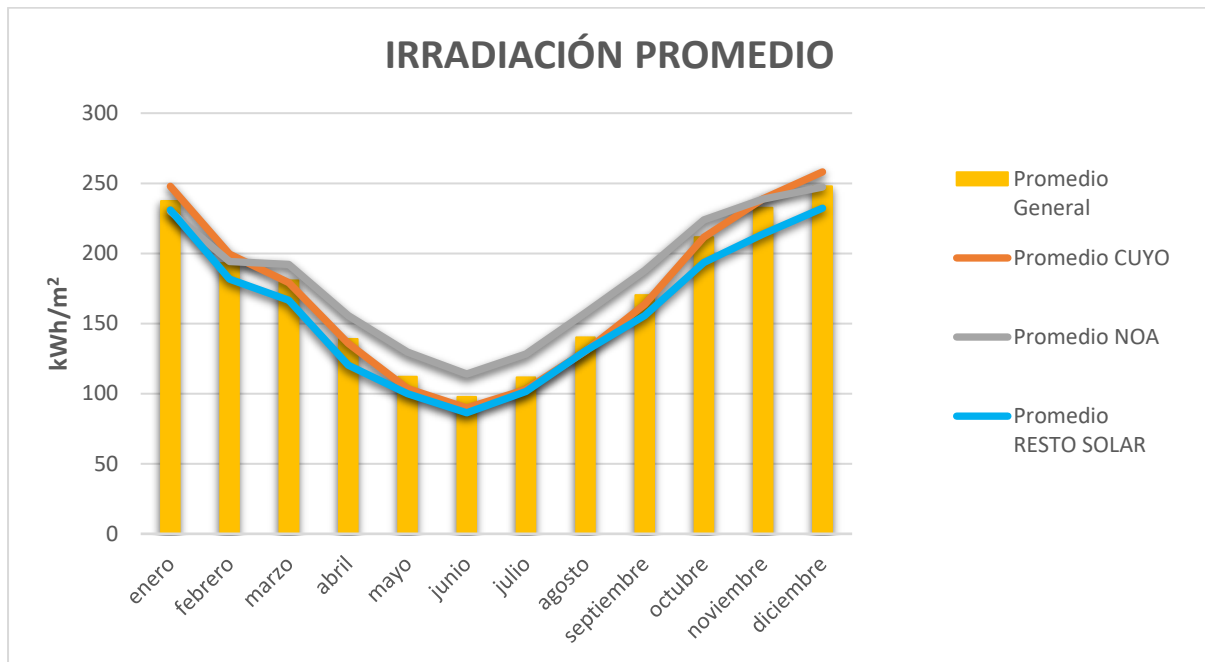


Figura 36. Programa RenovAr. Irradiación promedio informada por los proyectos

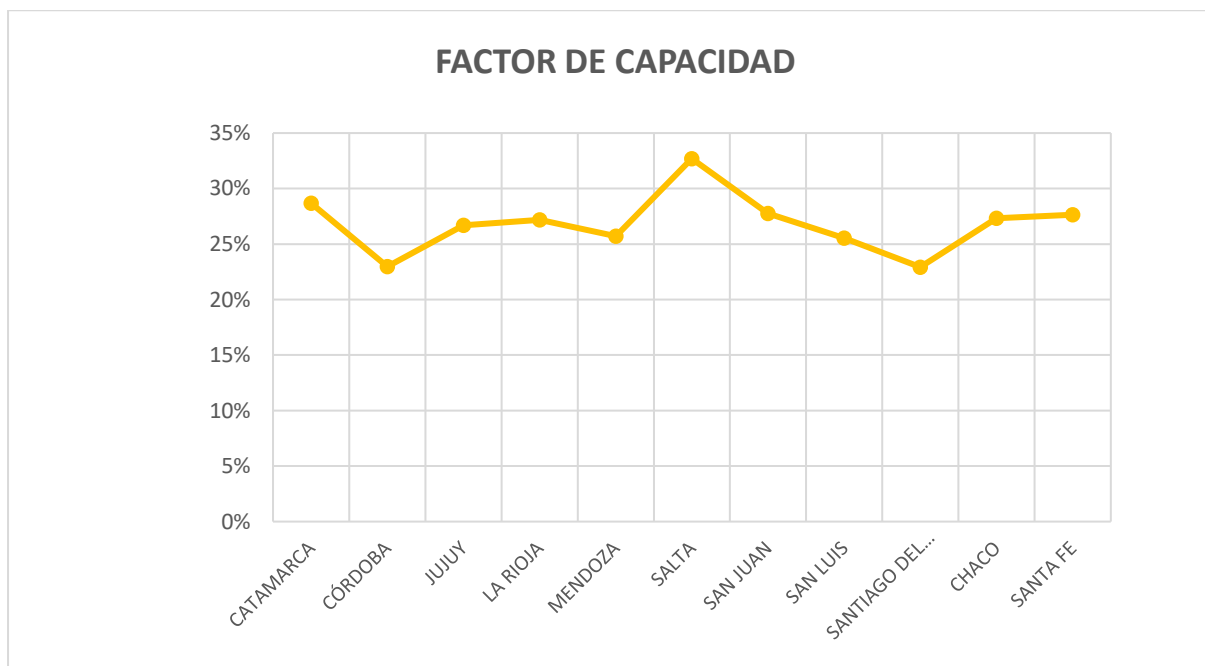


Figura 37. Programa RenovAr. Factor de Capacidad estimado por los proyectos

REGIÓN	RONDA 1	RONDA 1.5	RONDA 2	RONDA 3	Res. 202	Promedio
CUYO		1,15	1,14	1,15		1,15
NOA	1,06	1,18	1,17	1,16		1,15
RESTO SOLAR		1,24	1,21	1,16	1,11	1,18
Total general	1,06	1,17	1,17	1,16	1,11	1,16

Tabla 12. Programa RenovAr. Relación DC/AC promedio por Ronda por Región

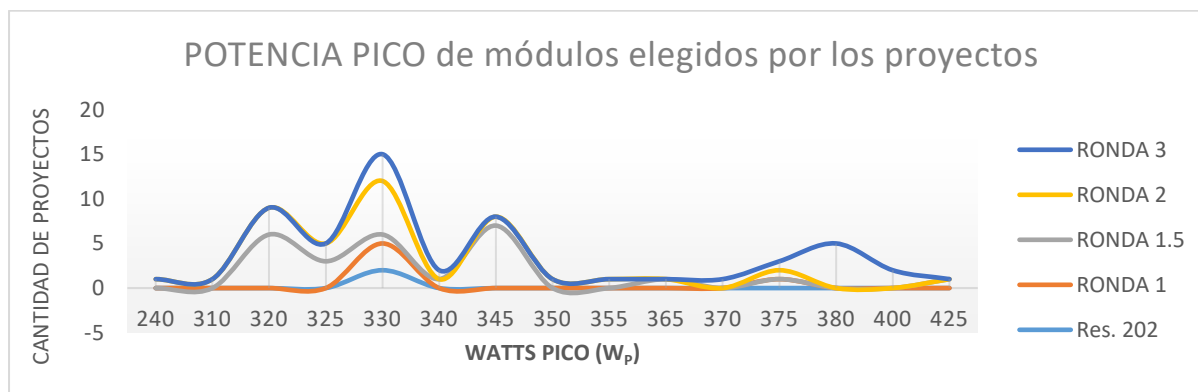


Figura 38. Programa RenovAr. Potencia Pico de los módulos fotovoltaicos utilizados por los Proyectos

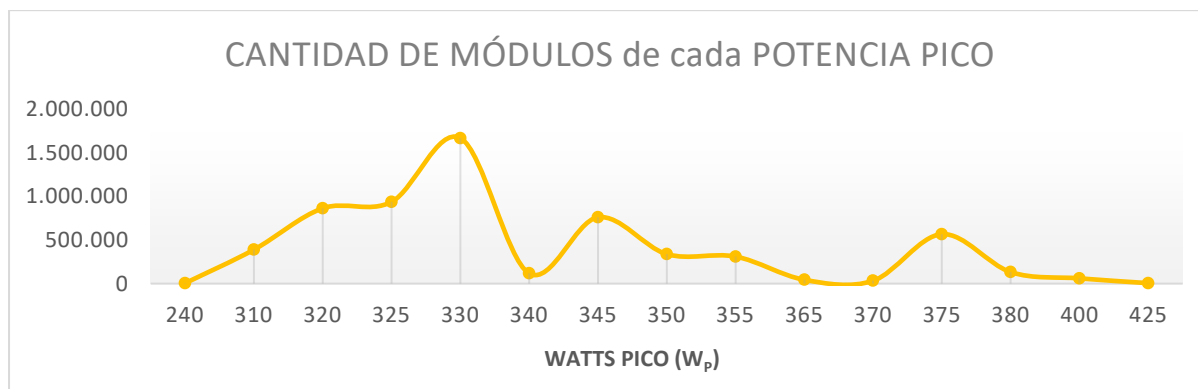


Figura 39. Programa RenovAr. Cantidad de módulos fotovoltaicos por potencia unitaria que se instalarán en Argentina

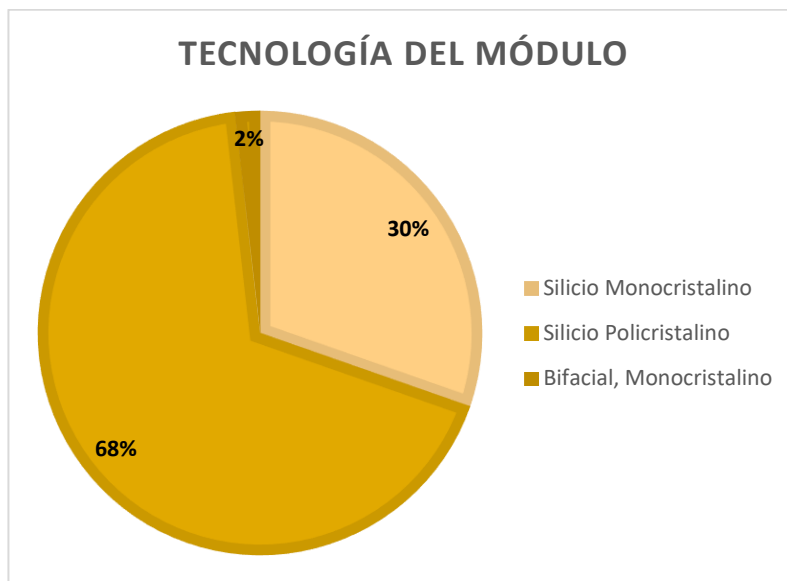


Figura 40. Programa RenovAr. Tecnología de módulos fotovoltaicos utilizada

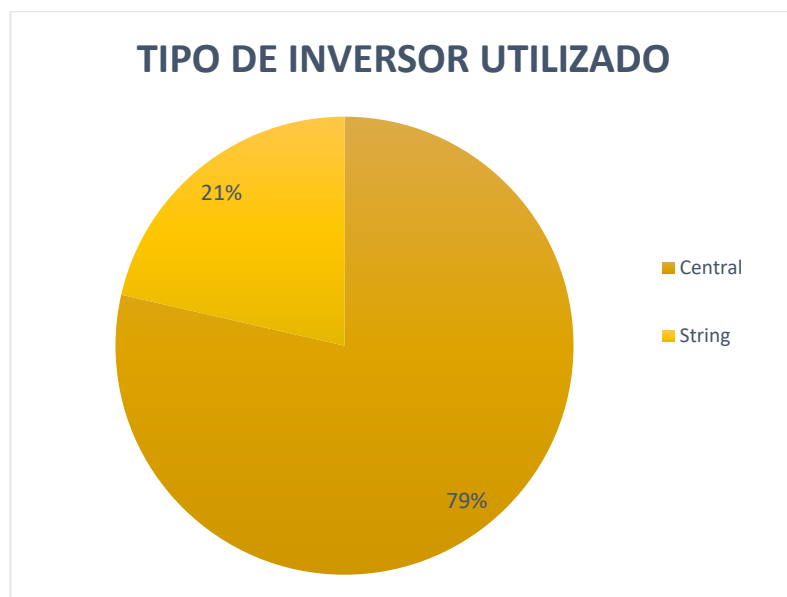


Figura 41. Programa RenovAr. Tipo de inversor utilizado en los proyectos

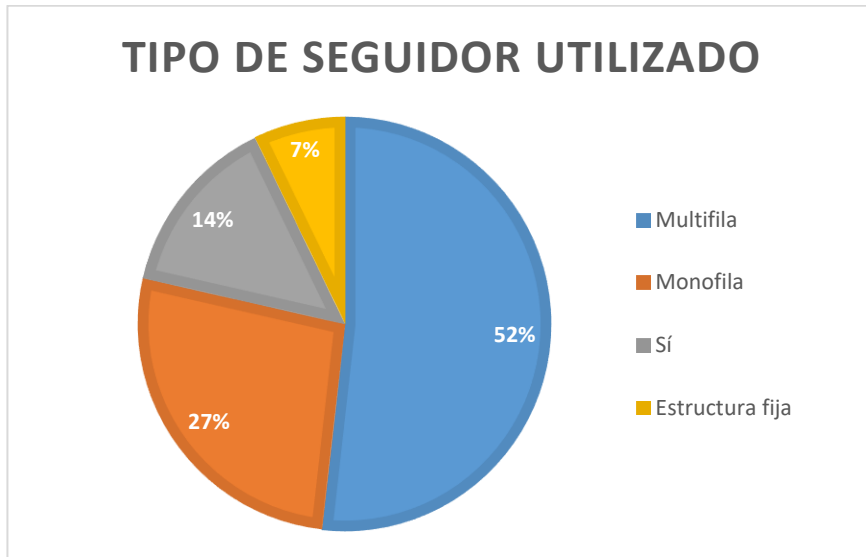


Figura 42. Programa RenovAr. Tipo de seguidor utilizado en los proyectos

Referencias

- BloombergNEF. (16 de enero de 2019). *BloombergNEF*. Obtenido de Clean Energy Investment Trends, 2018: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Clean-Energy-Investment-Trends-2018.pdf>
- Gregorini, B., Kühn, C., & Zúccoli, D. (2018). Proyecto Final de Carrera: Instalación de una central solar fotovoltaica. La Plata, Buenos Aires, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata.
- Grossi Gallegos, H., & Righini, R. (2007). *Atlas de Energía Solar de la República Argentina*. Argentina: Dirección Nacional de Programas y Proyectos Especiales / Universidad Nacional de Lujan.
- Honsberg, C., & Bowden, S. (18 de septiembre de 2019). *PVEducation*. Obtenido de <https://www.pveducation.org/>
- IAE-PVPS. (2018). *Trends 2018 in photovoltaic markets*. St. Urser, Suiza: International Energy Agency. Recuperado el 17 de septiembre de 2019, de <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=92>
- IAE-PVPS. (30 de abril de 2019). *2019 Snapshots of global PV markets*. St. Ursen, Suiza: International Energy Agency. Recuperado el 2019 de septiembre de 17, de <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=92>
- IRENA. (- de - de 2019). *IRENA*. Obtenido de RENEWABLE POWER GENERATION COST IN 2018: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf
- IRENA. (2019). *Renewable Energy and Jobs. Annual Review 2019*. Abu Dhabi: IRENA. Recuperado el 2019 de septiembre de 17, de <https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019>
- ISE. (14 de marzo de 2019). *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme*. Recuperado el 2019 de septiembre de 19, de Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- Jagannathan, V. (2011). *Power Electronics. Devices and circuits* (Segunda ed.). Nueva Delhi, India: PHI Learning Private Limited.
- Kipp & Zonen. (2019). *Kipp & Zonen*. Recuperado el 02 de octubre de 2019, de kippzonen.com/Download/415/Solar-Energy-Guide-English
- Pelayo López, J. A., Luna Soto, A., Bernabe Ramos, F., & Guzmán Flores, B. (2017). Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo. *Revista Iberoamericana de Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 6(12). Recuperado el 2019 de septiembre de 23, de <https://dialnet.unirioja.es>
- REN21. (2019). *Market and Industry Trends*. Recuperado el 23 de agosto de 2019, de Renewables 2019 Global Status Report: https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_03/chapter_03/#sub_2

- Smets, A., Jäger, K., Isabella, O., Van Swaaij, R., & Zeman, M. (2016). *Solar Energy: the physics and engineering of photovoltaic conversion technologies and systems*. Cambridge: UIT Cambridge.
- SolarPower Europe. (2019). *Global Market Outlook for Solar Power 2019-2023*. Bruselas: SolarPower Europe. Recuperado el 2019 de septiembre de 19, de <http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/05/SolarPower-Europe-Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf>
- Soty Solar. (23 de septiembre de 2019). *Soty Solar*. Obtenido de Seguidores Solares: Todo lo que necesitas saber: <https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares>
- SSERyEE. (diciembre de 2016). *Argentina*. Recuperado el 24 de septiembre de 2019, de Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/energias_renovables_en_argentina_-_diciembre_2016_version_en_espanol.pdf
- SSERyEE. (agosto de 2018). *Argentina*. Recuperado el 25 de septiembre de 2019, de Subsecretaría de Energías Renovables y Eficiencia Energética: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/empleorenovable.pdf>
- Taretto, K. R. (2018). *Celdas solares: teoría, ensayo y diseño* (Segunda ed.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Nueva Librería.