



Tecnología Fotovoltaica en el Contexto Global y Nacional

AUTORES

Ignacio Arias Olivares, Dr. en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Mecánica. Investigador, Departamento de Ingeniería Mecánica UC | ivarias@uc.cl

Ian Wolde Ponce, Dr. en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Mecánica. Investigador Postdoctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica UC | iwolde@uc.cl

José Miguel Cardemil, Dr. Eng. en Ingeniería Mecánica, Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica UC | jmcardem@uc.cl

Rodrigo Escobar Moragas, PhD. en Ingeniería Mecánica, Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica UC | rescobam@uc.cl

Tabla de Contenidos

1. Resumen Ejecutivo.....	4
2. Introducción y Contexto	4
3. Fundamentos y Estado del Arte de la Tecnología Fotovoltaica	5
3.1. Principios Físicos y Funcionamiento de los Sistemas PV	5
3.2. Tipologías Tecnológicas.....	6
3.3. Indicadores Clave de Desempeño	10
3.4. Tendencias y Avances Tecnológicos Recientes.....	11
3.5. Aplicaciones Actuales en Diferentes Escalas	15
4. Rol de la Tecnología PV en la Transición Energética Global.....	20
4.1. Descarbonización y Compromisos Internacionales	21
4.2. Comparación con Otras Tecnologías Renovables.....	21
4.3. Evolución de Costos y Competitividad	21
4.4. Ventajas y Desafíos Estructurales	22
5. Perspectivas Globales y Brechas Críticas para su Expansión.....	22
5.1. Proyecciones y Escenarios a 2030–2050	23
5.2. Brechas Críticas para la Escalabilidad Global.....	23
5.3. Oportunidades Sistémicas.....	24
6. Evolución Histórica de la Energía Solar Fotovoltaica en Chile.....	25
6.1. Evolución de la Capacidad Instalada (2014–2024).....	25
6.2. Costos y Competitividad en el Mercado Nacional	26
6.3. Marco Legal y Rol de los Prosumidores.....	29
6.4. Brechas Estructurales y Regionales	30
7. Estado Actual y Proyecciones Nacionales hacia 2030	30
7.1. Capacidad Instalada y Proyecciones hacia 2030	31
7.2. Rol Estratégico hacia la Descarbonización	32
7.3. Desafíos Inmediatos	33
8. Brechas Estructurales y Sociopolíticas en el Contexto Chileno	34
8.1. Infraestructura de Transmisión Saturada	34
8.2. Atraso Regulatorio y Normativo	34
8.3. Complejidad de Permisos y Tramitación Ambiental.....	35
8.4. Desigualdad Territorial y Exclusión Social	35
8.5. Riesgo de Dependencia Tecnológica y Concentración de Mercado	35
8.6. Financiamiento y Acceso a Capital	36
9. Conclusiones y Recomendaciones Estratégicas.....	36
10. Referencias	39

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema conceptual del funcionamiento de una celda solar fotovoltaica basada en silicio tipo p-n.	6
Figura 2. Estructura interna de una celda solar fotovoltaica de silicio y comparación de las principales tecnologías comerciales de módulos: monocristalinos, policristalinos y de película delgada.	7
Figura 3. Evolución Histórica de la Eficiencia Máxima en Celdas Solares por Tecnología (1975–2024)	12
Figura 4. Esquemas típicos de integración fotovoltaica a nivel residencial y comercial. a) Sistema fotovoltaico aislado (off-grid) con respaldo mediante grupo electrógeno y baterías. b) Instalación de autoconsumo conectado a red con inyección de excedentes. c) Instalación de autoconsumo conectado a red sin inyección de excedentes, mediante mecanismo antivertido. d) Instalación de autoconsumo con almacenamiento de energía en baterías. Estos esquemas permiten diferentes niveles de autonomía, interacción con la red y aprovechamiento energético, en función de la normativa local, las condiciones tarifarias y los objetivos del usuario.	15
Figura 5. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos comerciales.	17
Figura 6. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos utility-scale [45].	17
Figura 7. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos integrados a la agricultura (agrivoltaicos) [49].	18
Figura 8. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos flotantes [51].	18
Figura 9. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos integrados a edificaciones [53].	19
Figura 10. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos aplicados a sistemas móviles y autónomos [55].	19
Figura 11. Evolución del LCOE Solar en diferentes mercados alrededor del mundo [21]. ..	27
Figura 12. Tendencias y comparación de indicadores de desempeño Solar vs Eólica (Offshore/Onshore) 2010–2023 [21].	28
Figura 13. Desglose de la Reducción del LCOE Solar Global [21].	29
Figura 14. Proyección de capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Chile (2025–2060) bajo tres escenarios: Transición Lenta, Transición Acelerada y Carbono Neutralidad.	32

Índice de tablas

Tabla 1. Tipologías tecnológicas en sistemas fotovoltaicos: características clave y evaluación comparativa [9], [10], [11], [12]	8
Tabla 2. Aplicaciones actuales de la energía solar fotovoltaica: escalas, beneficios y barreras.	20
Tabla 3. Capacidad instalada FV en Chile (2014–2024) [69]	25

1 | Resumen Ejecutivo

La energía solar fotovoltaica (PV) se ha consolidado como una de las tecnologías clave en la transición energética global. Su rápida disminución de costos, su escalabilidad y su bajo impacto ambiental la posicionan como una de las principales fuentes para alcanzar la carbono-neutralidad hacia mediados de siglo. Actualmente, la PV representa más del 5% de la generación eléctrica mundial, con proyecciones que anticipan una participación superior al 20% para 2050.

Este informe revisa de manera accesible los fundamentos técnicos de la energía fotovoltaica, sus avances recientes y su rol dentro del portafolio de tecnologías limpias. A nivel global, se identifican desafíos relevantes que podrían limitar su expansión: infraestructura de transmisión insuficiente, barreras regulatorias, falta de almacenamiento y escasez de talento técnico especializado.

En el contexto chileno, la energía PV ha mostrado un crecimiento extraordinario durante la última década, pasando de menos de 100 MW en 2013 a más de 7.500 MW en 2024, con una participación cercana al 20% en la matriz eléctrica. Este desarrollo ha sido impulsado por condiciones excepcionales de radiación solar, un marco regulatorio relativamente favorable y una cartera creciente de proyectos PMGD y *utility-scale*.

Chile se ha comprometido a cerrar todas sus centrales a carbón al 2030 y alcanzar un sistema eléctrico 100% renovable antes del 2050. Para lograrlo, la energía fotovoltaica deberá continuar expandiéndose y abordando brechas estructurales críticas, tales como congestión en líneas de transmisión, vertimientos crecientes, procesos lentos de tramitación y una gobernanza fragmentada del sistema energético.

Este informe concluye que la energía solar fotovoltaica es un pilar esencial de la estrategia de descarbonización nacional. Sin embargo, para cumplir las metas propuestas, será necesario avanzar en planificación territorial, modernización del sistema eléctrico, fortalecimiento institucional y desarrollo de capacidades humanas. El fortalecimiento de estos aspectos permitirá que la tecnología PV no solo sea una solución energética, sino también una oportunidad de desarrollo sostenible e innovación para Chile.

2 | Introducción y Contexto

El cambio climático y la urgencia por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero han impulsado una transformación profunda del sistema energético global. La transición hacia un modelo basado en fuentes limpias, seguras y sostenibles se ha vuelto un imperativo técnico, económico y ético. En este contexto, la energía solar fotovoltaica (PV) ha emergido

como una de las tecnologías más relevantes por su versatilidad, bajo impacto ambiental y notable competitividad económica.

La rápida expansión de la energía PV en todo el mundo ha sido impulsada por una fuerte reducción de costos, mejoras en la eficiencia de conversión de las celdas solares y un ecosistema tecnológico que ha permitido su despliegue desde aplicaciones residenciales hasta megaplantas de generación. A la vez, los avances en digitalización, almacenamiento energético y nuevos materiales siguen ampliando su potencial de aplicación y contribución al sistema energético.

Este informe tiene como objetivo entregar una visión integral, actualizada y accesible sobre la tecnología solar fotovoltaica, abordando tanto sus fundamentos técnicos como su relevancia estratégica en el proceso de descarbonización. Se analizan los avances y desafíos globales, así como las brechas estructurales que deben abordarse para permitir un despliegue masivo y sostenible de esta tecnología.

A nivel nacional, Chile presenta condiciones excepcionales para el desarrollo de la energía solar: altos niveles de radiación directa, vastas extensiones territoriales disponibles y una ambiciosa agenda de descarbonización. En la última década, el país ha experimentado un crecimiento acelerado en capacidad fotovoltaica instalada, convirtiéndose en un referente latinoamericano en energía solar. No obstante, este crecimiento también ha visibilizado limitaciones relevantes, como congestión en las redes de transmisión, procesos de tramitación lentos y una falta de planificación energética integrada con el territorio.

A través de este reporte, elaborado por el equipo técnico del Centro de Energía UC, se busca proporcionar una base sólida para la comprensión del rol actual y futuro de la energía fotovoltaica, tanto en el contexto global como en el escenario chileno. La información contenida está dirigida a un público amplio: desde tomadores de decisión y profesionales del sector hasta estudiantes, académicos y ciudadanos interesados en la transición energética del país.

3

Fundamentos y Estado del Arte de la Tecnología Fotovoltaica

3.1. Principios Físicos y Funcionamiento de los Sistemas PV

La Energía Fotovoltaica aprovecha el efecto fotoeléctrico, descubierto por Edmond Becquerel en 1839 [1], que permite la generación de corriente eléctrica cuando la radiación solar incide sobre una unión p-n en un semiconductor [2]. Al absorber fotones con energía mayor al *band gap*, se excitan electrones que son separados por el campo eléctrico de la unión p-n, generando una corriente continua aprovechable mediante un circuito externo [3].

En la práctica, una celda PV consiste en una unión p-n dopada con elementos como fósforo (*n-type*) y boro (*p-type*), formando un diodo con un campo interno que canaliza el flujo de carga, facilitado por la separación de electrones y huecos [2], [3], [4].

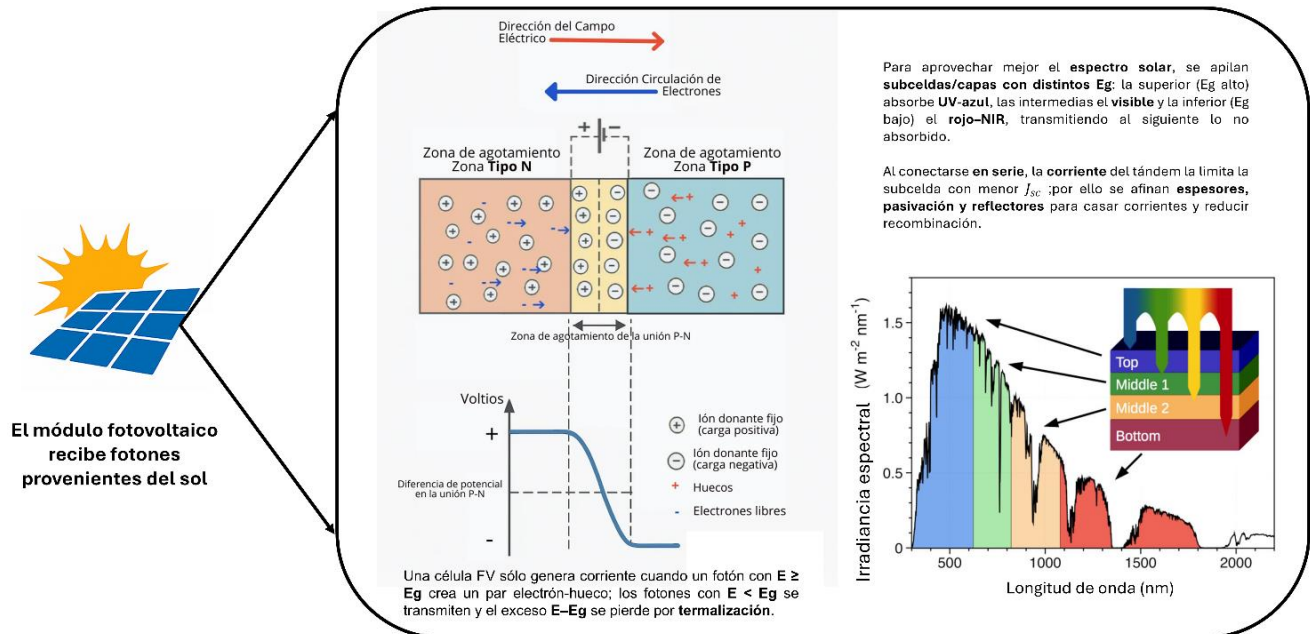


Figura 1. Esquema conceptual del funcionamiento de una celda solar fotovoltaica basada en silicio tipo p-n.

La **Figura 1** ilustra un esquema conceptual del funcionamiento de una celda solar fotovoltaica basada en silicio tipo p-n. La radiación solar incidente excita electrones en la capa dopada tipo-p, los cuales son separados por el campo eléctrico interno hacia la capa tipo-n. Esta diferencia de potencial genera una corriente eléctrica continua cuando se conecta una carga externa, permitiendo así transformar la energía solar en energía eléctrica utilizable.

3.2. Tipologías Tecnológicas

La tecnología fotovoltaica ha evolucionado significativamente desde sus primeras implementaciones a mediados del siglo XX [5] Actualmente, el mercado se compone de una variedad de tecnologías diferenciadas por su composición, eficiencia, costo, aplicaciones y estado de madurez tecnológica [6]. Comprender estas tipologías resulta fundamental para analizar las proyecciones de adopción a nivel global y nacional.

Las celdas de silicio cristalino (monocristalino y policristalino) dominan ampliamente el mercado global de la fotovoltaica debido a su robustez, alta eficiencia y larga trayectoria industrial [7]. Sin embargo, tecnologías bifaciales y de película delgada, junto con desarrollos emergentes como las perovskitas y las estructuras tándem, están ganando espacio gracias

a su potencial de mayor eficiencia y a su adaptabilidad a diversas condiciones de instalación (e.g. flexibilidad y menor peso en el caso de película delgada) [6], [8].

Particularmente, la tecnología de silicio monocristalino ha sido históricamente la tecnología más eficiente en aplicaciones comerciales. Su estructura ordenada permite una mejor movilidad de los portadores de carga, lo que se traduce en una eficiencia energética más alta. Su costo, antes una barrera, se ha reducido sustancialmente con mejoras en procesos como el corte con hilo de diamante y el dopado selectivo. Mientras que, la tecnología de Silicio policristalino, que dominó gran parte del mercado en la década pasada, está siendo progresivamente reemplazado por monocristalino debido a sus menores tasas de eficiencia y mayores pérdidas por recombinación de electrones en las fronteras entre cristales.

Por otra parte, las celdas de película delgada, como el telurio de cadmio (CdTe) o el cobre-indio-galio-selenio (CIGS), ofrecen ventajas en peso y flexibilidad, siendo adecuadas para techos livianos, superficies curvas o aplicaciones móviles [12]. No obstante, enfrentan desafíos en eficiencia y problemas ambientales relacionados al uso de materiales como el cadmio.

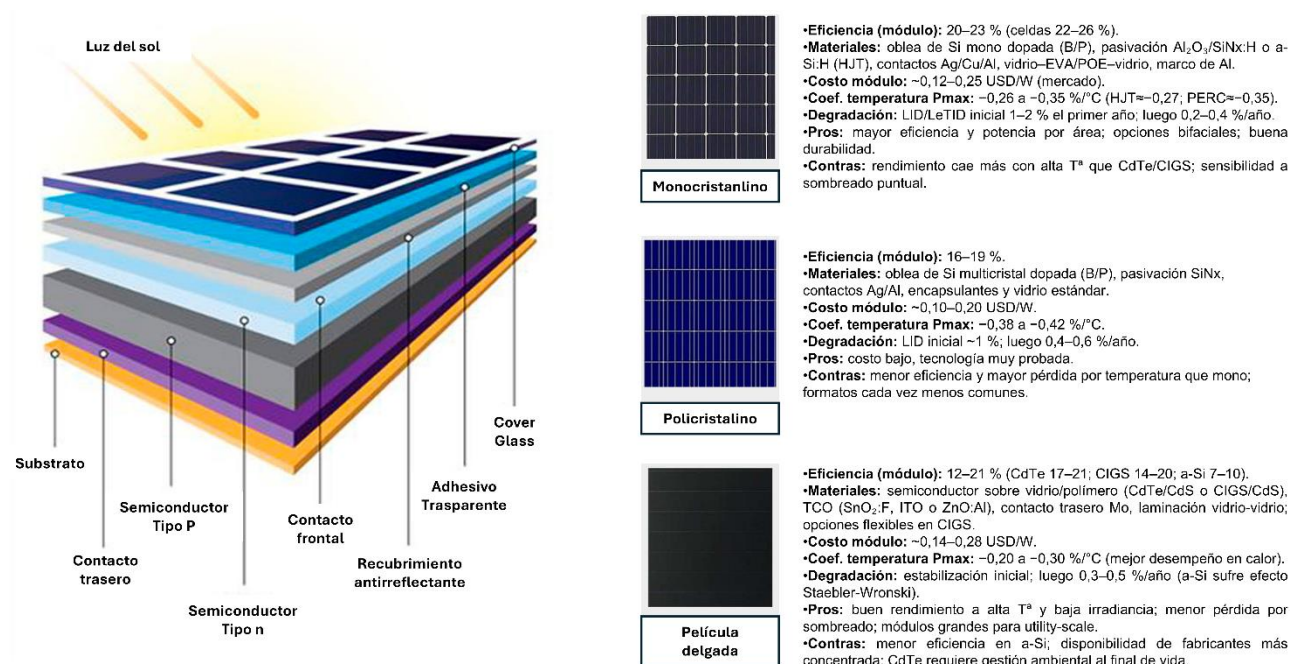


Figura 2. Estructura interna de una celda solar fotovoltaica de silicio y comparación de las principales tecnologías comerciales de módulos: monocristalinos, policristalinos y de película delgada.

La **Figura 2**, representa esquemáticamente la estructura multicapa de una celda típica basada en silicio, incluyendo el vidrio de cubierta (*cover glass*), recubrimiento antirreflectante, capas de contacto frontal y posterior, semiconductores tipo n y tipo p, y sustrato. A la derecha, se comparan las tecnologías más utilizadas según eficiencia típica de módulo, materiales empleados, coeficiente de temperatura, tasa de degradación, ventajas

y limitaciones técnicas. Los módulos monocristalinos ofrecen las mayores eficiencias y buena respuesta en condiciones bifaciales, mientras que los policristalinos presentan menores costos y robustez tecnológica. Por su parte, los módulos de película delgada (como CdTe o CIGS) destacan por su rendimiento en irradiancia difusa y alta temperatura, aunque con menor eficiencia y disponibilidad comercial. Estos parámetros son claves para seleccionar la tecnología óptima según el recurso solar, espacio disponible, presupuesto y aplicación específica.

En lo que respecta a las **tecnologías bifaciales**, estas son cada vez más adoptadas en plantas *utility-scale* [13], [14]. Estas celdas capturan radiación no solo por el lado frontal sino también por el posterior, aprovechando la reflexión del suelo (albedo). Esto puede aumentar la producción eléctrica entre un 10 % y un 20 %, especialmente cuando se combinan con estructuras de seguimiento solar [15].

Finalmente, las **tecnologías emergentes**, particularmente las **perovskitas y las celdas tandem**, han mostrado eficiencias récord en laboratorio [16]. Las celdas tandem combinan diferentes materiales con diferentes rangos de absorción espectral, como silicio en la base y perovskita en la capa superior, superando en algunos casos el 34 % de eficiencia bajo condiciones estándar [17]. Sin embargo, aún enfrentan retos críticos en términos de durabilidad, encapsulamiento y escalabilidad industrial. A continuación, la Tabla 1 muestra comparativa con las principales tipologías tecnológicas:

Tabla 1. Tipologías tecnológicas en sistemas fotovoltaicos: características clave y evaluación comparativa [9], [10], [11], [12].

Tecnología	Composición	Eficiencia típica	Ventajas	Desventajas
Silicio monocristalino (c-Si: PERC/TOPCon/HJT)¹	Oblea de silicio de un solo cristal	20–23 % (módulo)	• Alta densidad de potencia (W/m^2) → menor área y BOS. • Menor LID/LeTID en obleas n-type (TOPCon/HJT). • Coef. térmico de P_{max} mejor que mc-Si ($\approx -0,26$ a $-0,35$ %/°C; HJT $\approx -0,25$ %/°C). • Bifacialidad alta (n-type 0,7–0,9) y buen rendimiento en baja irradiancia (HJT). • Historial de fiabilidad con vidrio-vidrio y	• Costo de oblea y metalización superior (Ag/TCO), CAPEX de fabricación. • PID y <i>hot-spots</i> si diseño/puesta en marcha no es óptimo (sombras, <i>bypass</i>). • Mayor sensibilidad térmica que CdTe/CIGS en climas muy cálidos. • Riesgo de micro-fisuras/mismatch por cargas mecánicas.

¹ TOPCon = Tunnel Oxide Passivated Contact / HJT = Heterojunction (with Intrinsic Thin layer). TOPCon = contacto selectivo vía óxido-túnel + poli-Si; HJT = heterounión c-Si/a-Si:H con TCO. Ambos superan PERC en eficiencia y estabilidad, con HJT destacando en climas cálidos por su mejor coeficiente térmico.

			encapsulantes POE/EVA.	
Silicio policristalino (mc-Si)	Obleas multicristalinas de silicio	16–19 %	• Costo por W bajo; procesos maduros y amplia disponibilidad. • Buena estabilidad a largo plazo con encapsulados estándar. • Intercambiable con BOS de c-Si.	• Menor eficiencia y coef. térmico menos favorable ($\approx -0,38$ a $-0,42$ %/°C). • LID inicial y mayor <i>mismatch</i> por granos/dislocaciones → menor FF. • Tendencia a obsolescencia frente a TOPCon/HJT; menos formatos de alta potencia.
Película delgada (CdTe/CIGS/a-Si)	Semiconductores sobre vidrio/polímero (CdTe/CdS o CIGS/CdS), TCO y contacto trasero	12–21 % (según tecnología)	• Coef. térmico más favorable ($\approx -0,20$ a $-0,30$ %/°C) → mejor en alta Tª. • Mejor respuesta a baja irradiancia y tolerancia a sombreado (menor riesgo de <i>hot-spots</i>). • Posibilidad de módulos grandes y vidrio-vidrio; opciones flexibles en CIGS. • Uso de Si cero; potencial de menor huella energética.	• Eficiencia de módulo menor que c-Si de última generación (salvo CdTe premium). • Disponibilidad de materiales críticos (In, Te) y concentración de fabricantes. • Efecto Staebler-Wronski en a-Si y estabilización inicial de potencia. • Gestión ambiental de Cd en CdTe; requisitos de reciclaje y fin de vida.
Bifaciales (atributo de módulo, no tecnología)	c-Si mono o doble-cara (n-type/p-type)	+5–20 % energía anual adicional (según albedo 0,2–0,8)	• Captura de irradiancia reflejada → menor LCOE en suelos claros o superficies reflectantes. • Potencias pico mayores sin aumentar área frontal. • Muy buen desempeño con seguidores y elevaciones moderadas.	• Requiere diseño del entorno (albedo, altura, separación de filas) y modelado de <i>yield</i> más complejo. • Vidrio-vidrio incrementa peso y puede elevar costo BOS; atención a cargas. • Ensuciamiento trasero y sombreado estructural pueden reducir la ganancia esperada.

Emergentes (perovskitas, tandem)	Capas híbridas (perovskita) o combinaciones perovskita-Si/II I-V	25–34 % (laboratorio; tandem c-Si/perovskita)	• Altísimo techo de eficiencia (bandgap sintonizable; tandem supera el límite de Shockley-Queisser del Si). • Procesos de baja T^a y potencial bajo costo por m^2; opción de ligereza y semiflexibilidad. • Excelente respuesta espectral y rendimiento en baja irradiancia.	• Estabilidad aún en validación (humedad, UV, T^a, ion-migration, hysteresis). • Encapsulación crítica; toxicidad por Pb (en la mayoría de las formulaciones) y gestión fin de vida. • Escalado industrial y uniformidad de gran área no resueltos; datos de campo limitados. • Integración tandem: compatibilidad térmica/proceso con Si y coste de TCO/metalización.
---	--	---	--	--

3.3. Indicadores Clave de Desempeño

La evaluación técnica y económica de los sistemas fotovoltaicos se basa en un conjunto de indicadores que permiten caracterizar su eficiencia, estabilidad, viabilidad financiera y rendimiento operativo bajo condiciones reales. Estos parámetros son fundamentales tanto en el diseño como en la operación de proyectos solares, y facilitan la comparación entre tecnologías, regiones y estrategias de implementación.

- **Eficiencia del módulo fotovoltaico:** Porcentaje de la radiación solar que es convertido en energía eléctrica en condiciones estándar (STC). Su valor depende del tipo de celda, la temperatura, la orientación y el mantenimiento del sistema [18]
- **Factor de capacidad (*Capacity Factor*):** Relación entre la producción real y la producción teórica máxima anual. En sistemas fijos suele oscilar entre 18 % y 25 %, y en sistemas con seguimiento puede superar el 30 % en zonas de alta irradiancia como el norte de Chile [19].
- **Performance Ratio (PR):** Mide la eficiencia global del sistema considerando pérdidas por temperatura, inversores, sombras y otros efectos. Valores típicos varían entre 75 % y 90 %, siendo un indicador clave para auditar el rendimiento real [20].
- **Costo Nivelado de la Energía (LCOE):** Representa el costo total por MWh generado durante la vida útil del sistema, considerando inversión, operación, reemplazos y degradación. Ha caído de forma sostenida, alcanzando valores por debajo de 30 USD/MWh en mercados competitivos como Chile [21].

- **Tasa de degradación anual:** Corresponde a la pérdida progresiva de eficiencia de los módulos con el tiempo, habitualmente entre 0,3 % y 0,8 % anual dependiendo de la tecnología y condiciones ambientales [22]
- **Eficiencia del inversor:** Proporción de la energía continúa convertida efectivamente en alterna. Valores cercanos al 97–99 % son habituales en inversores modernos [23].
- **Disponibilidad del sistema:** Porcentaje del tiempo en que la planta está operativa y entregando energía, considerando mantenimientos y fallas. Se espera superar el 98 % en instalaciones bien gestionadas.
- **Temperatura operativa promedio:** Afecta directamente la eficiencia de los módulos. Las tecnologías más avanzadas integran materiales o diseños que mitigan pérdidas térmicas.

3.4. Tendencias y Avances Tecnológicos Recientes

La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como la tecnología renovable más dinámica del siglo XXI. Solo en 2024, el mundo instaló entre 554 y 602 GW de nueva capacidad PV, alcanzando más de 2,2 TW acumulados, lo que equivale a más del 10 % del consumo eléctrico mundial y representa aproximadamente el 60 % de toda la nueva capacidad renovable incorporada ese año [24].

Este crecimiento se sustenta en un ecosistema tecnológico altamente innovador, donde destacan los siguientes desarrollos clave:

- **Avances en eficiencia y arquitectura de celdas**

Un avance destacado en la industria fotovoltaica es la consolidación y maduración de las celdas tándem silicio perovskita. Según el NREL, los registros de eficiencia para este tipo de celdas están alrededor de 33,9 % (ver **Figura 3**), superando el límite teórico de una sola unión de silicio ($\approx 33,7$ %) [25] y marcando un hito en tecnología híbrida [26]. Recientemente, LONGi obtuvo un nuevo récord de 34,6 % en una célula prototipo tipo tándem [27], certificada por el NREL.

En cuanto a aplicaciones industriales, empresas como Qcells han reportado eficiencias de módulo comercial que rondan el 28,6 % para celdas grandes con capa superior de perovskita, homologadas por el Instituto Fraunhofer ISE [28]. Por su parte, LONGi ha anunciado avances en eficiencia de módulos de gran área de hasta 34,85 %, con aprobación del NREL [29].

Estas arquitecturas tándem combinan un silicio dopado P o N como capa inferior con una capa delgada de perovskita en la parte superior, permitiendo aprovechar diferentes rangos del espectro solar. La mejora en eficiencia se logra sin incrementar significativamente el espacio físico, lo que representa una optimización sustancial en densidad de potencia por metro cuadrado [30].

Adicionalmente, las perovskitas brindan ventajas tecnológicas y de diseño que las hacen atractivas para aplicaciones avanzadas:

- Permiten el desarrollo de módulos flexibles o semirrígidos, ideales para integración arquitectónica e instalación en superficies curvas.
- Su fabricación puede realizarse mediante técnicas a baja temperatura y en ambientes menos exigentes, lo que reduce costos de procesamiento y energía.

Finalmente, más allá de los récords de laboratorio, estudios del NREL y la fotovoltaica industrial destacan que incluso una modesta mejora de 2,5 % en eficiencia absoluta puede traducirse en reducciones significativas en el LCOE, equiparables a duplicar el tamaño de la planta o de las líneas de producción.

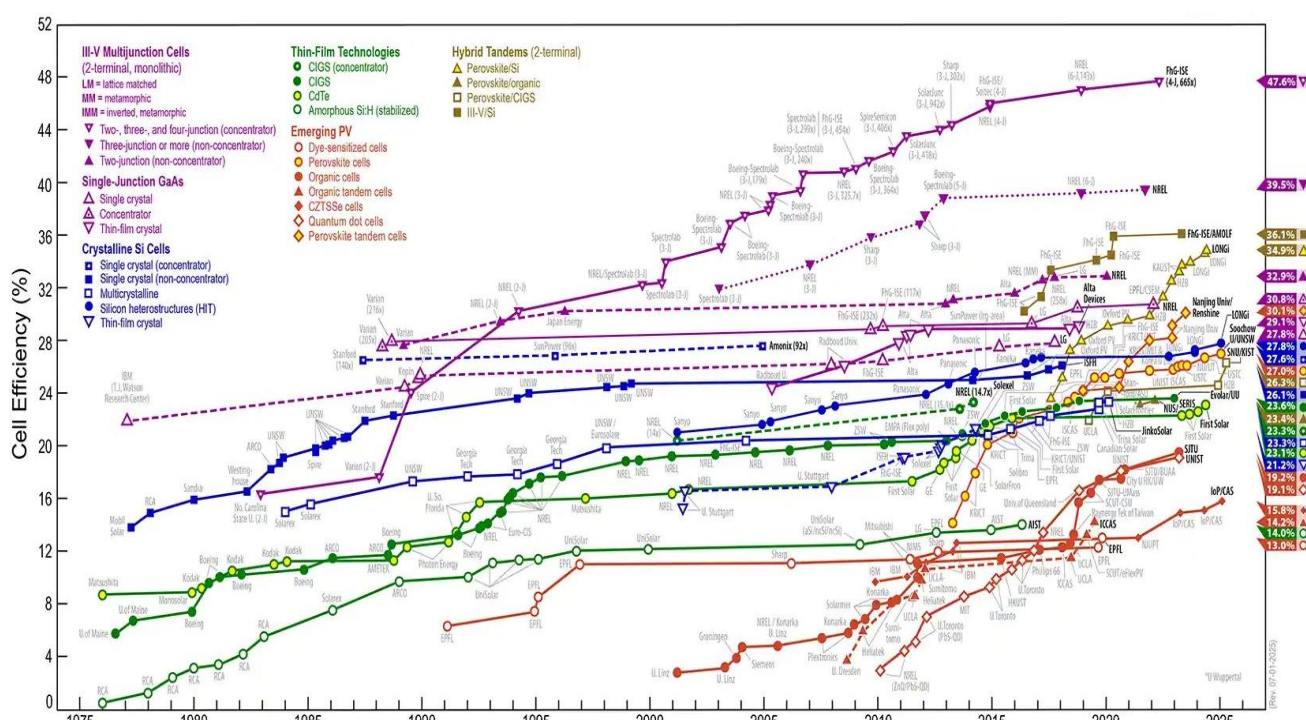


Figura 3. Evolución Histórica de la Eficiencia Máxima en Celdas Solares por Tecnología (1975–2024).

• Reducción de costos y presión industrial

Durante el período 2023–2024, la industria fotovoltaica global experimentó una **caída histórica en los precios de los módulos solares**, principalmente debido a una **sobrecapacidad productiva masiva concentrada en China**, que actualmente domina más del **80 %** de la producción global de módulos y celdas [31].

- Según OPIS APAC Solar Weekly Report, los precios de módulos de silicio monocristalino fabricados en China (Mono PERC) se redujeron cerca de **48 % en 2023**, con precios FOB llegando a apenas **0,12 USD/W** [32].

- Un reporte de **Wood Mackenzie** confirma que los precios de módulos chinos descendieron a alrededor de **0,11 USD/W** durante el primer semestre de 2024, lo que representa una caída de más del **40 % en un año** [33].
- Además, **Reuters** reportó que los precios de módulos terminados en China cayeron un **42 % en 2023**, resultando hasta un **60 % más baratos** que productos fabricados en EE. UU., y que la capacidad de producción del país superó el doble de la demanda global [34].

Esta reducción acelerada de precios generó un impulso significativo en la adopción de sistemas solares en mercados emergentes como India, Brasil y Pakistán. Sin embargo, también provocó **presión financiera severa** sobre fabricantes en Europa y Estados Unidos, donde múltiples fábricas debieron cerrar o reconvertirse debido a márgenes insostenibles.

Frente a esta situación, varios países han implementado **barreras arancelarias e incentivos industriales**:

- **Estados Unidos**, bajo el capítulo 301, impuso aranceles del 50 % a módulos y celdas chinas[35].
- La **UE** analiza salvaguardas y considerar subsidios a la producción local.
- **China**, por su parte, ha empezado a restringir la entrada de nuevas capacidades y promover fusiones para sanear su mercado hipercompetitivo [36].

Esta dinámica revela una **cadena de suministro vulnerable y poco diversificada**, sujeta a choques geopolíticos y fluctuaciones extremas de precios. Si bien los módulos baratos reducen el LCOE y fomentan la adopción solar, también plantean riesgos al concentrar la producción y dejar regiones dependientes de importaciones para sostener sus proyectos.

Por ello, se destaca la necesidad de diseñar una **estrategia de resiliencia industrial global**, que combine:

- **Apoyo a la manufactura local** mediante incentivos, inversión en I+D y desarrollo de clústeres.
- **Diversificación de origen de suministro**, incluyendo actores en Vietnam, Malasia, Estados Unidos y Europa.
- **Coordinación de políticas comerciales**, evitando represalias unilaterales que distorsionan el mercado y perpetúan precios volátiles.

Solo así será posible mantener los beneficios de la energía solar a precio bajo, sin sacrificar la capacidad tecnológica, la seguridad de abastecimiento ni el empleo industrial.

- **Expansión de nuevas aplicaciones**
Las tecnologías bifaciales, junto a sistemas de seguimiento solar horizontal (*single-axis trackers*), se han convertido en el nuevo estándar en grandes plantas solares en

regiones con alta irradiancia. Estas configuraciones permiten aumentar la producción eléctrica anual en un 10 % a 30 % respecto a módulos monofaciales convencionales, particularmente en zonas de alto albedo como el Desierto de Atacama [37], [38].

Además, se han expandido aplicaciones emergentes como:

- **Agrivoltaica:** compatibiliza la generación solar con la agricultura, ofreciendo beneficios como reducción de estrés hídrico en cultivos y uso eficiente del suelo.
- **Sistemas flotantes (*floating PV*):** instalados sobre cuerpos de agua como embalses y represas, reducen la evaporación y aumentan la eficiencia térmica de los paneles.
- **PV integrada en edificaciones (BIPV):** incorpora módulos en fachadas, techos y ventanas, con creciente penetración en desarrollos urbanos de alta densidad [39].

- **Desafíos emergentes: integración y saturación**

Con más de 25 países en los que la energía PV puede cubrir más del 10 % de la demanda eléctrica, y algunos superando el 20 %, se ha intensificado el fenómeno de *curtailment* (vertimiento), provocado por congestión en las redes, precios negativos o falta de almacenamiento. Según IEA PVPS, esta situación comienza a afectar la rentabilidad de los proyectos, especialmente en horas de alta generación y baja demanda [40], [41].

Frente a esto, se vuelve imperativo avanzar en:

- Despliegue de almacenamiento a gran escala (baterías, hidrógeno, sales fundidas).
- Expansión y digitalización de redes de transmisión y distribución.
- Desarrollo de mecanismos de flexibilidad, respuesta a la demanda y acoplamiento sectorial, como el uso de energía solar para electrificación del transporte o calor industrial.

- **Compromisos globales y sostenibilidad industrial**

En la COP28, más de 130 países se comprometieron a triplicar la capacidad renovable instalada al 2030 y duplicar la eficiencia energética. En este contexto, la tecnología PV es vista como el pilar más inmediato y escalable para alcanzar dichos objetivos [42].

Sin embargo, persisten importantes brechas estructurales que amenazan el cumplimiento de estas metas:

- La concentración geográfica de la manufactura (China, principalmente).
- La dependencia de minerales críticos como silicio, plata e indio [43].
- Las limitaciones de financiamiento en países en desarrollo, agudizadas por el alza del costo del capital.
- La falta de capacidad industrial local y de políticas industriales coordinadas.

Estas brechas podrían acentuar las desigualdades en la transición energética global si no se abordan con medidas de cooperación internacional y financiamiento climático justo.

3.5. Aplicaciones Actuales en Diferentes Escalas

La versatilidad tecnológica de la energía solar fotovoltaica ha permitido su adopción en una amplia gama de aplicaciones, desde pequeños sistemas domésticos hasta megaproyectos de generación a escala industrial. Esta adaptabilidad ha sido uno de los principales factores de su crecimiento sostenido y de su creciente protagonismo en las estrategias de transición energética a nivel global y nacional.

Los esquemas más habituales de integración de sistemas fotovoltaicos a la infraestructura energética de un país se encuentran a nivel residencial, tanto en configuraciones **conectadas a red (on-grid)** como **aisladas (off-grid)**. Desde estas tipologías básicas se derivan aplicaciones comerciales y edilicias de mayor escala orientadas al autoconsumo, respaldo energético o interacción activa con la red.

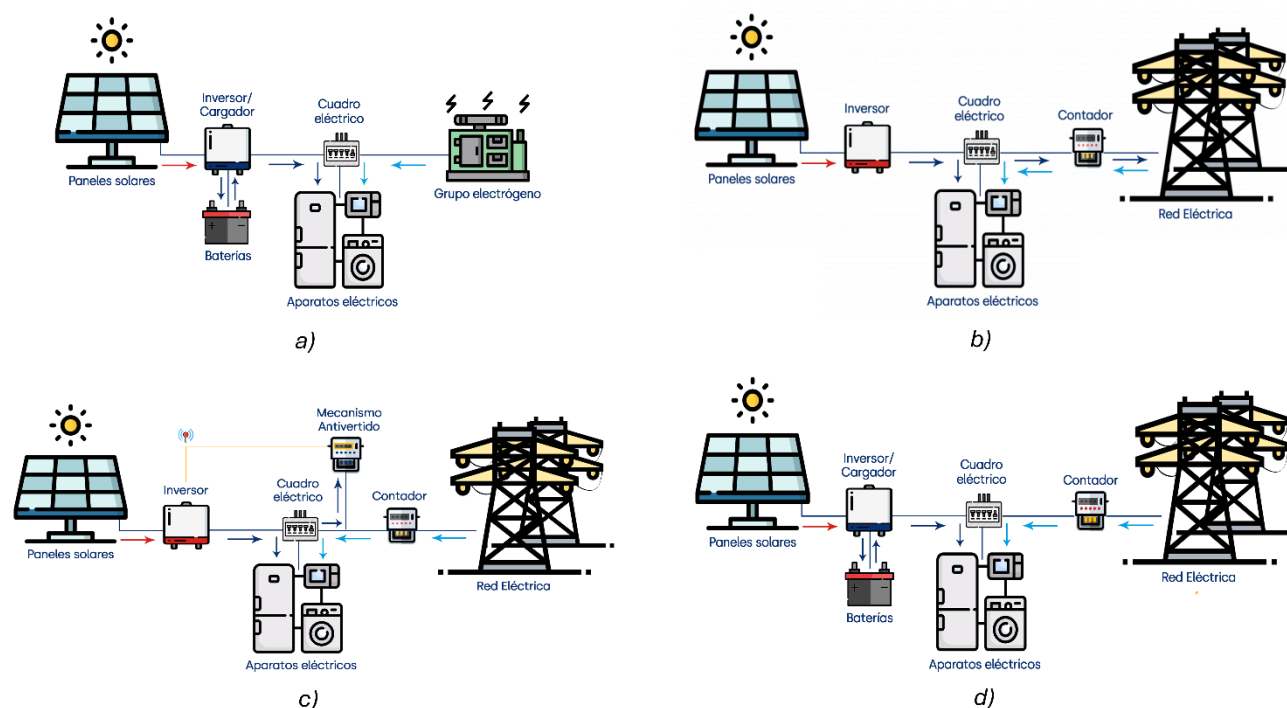


Figura 4. Esquemas típicos de integración fotovoltaica a nivel residencial y comercial². **a)** Sistema fotovoltaico aislado (*off-grid*) con respaldo mediante grupo electrógeno y baterías. **b)** Instalación de autoconsumo conectada a red con inyección de excedentes. **c)** Instalación de autoconsumo conectada a red sin inyección de excedentes, mediante mecanismo antivertido. **d)** Instalación de autoconsumo con almacenamiento de energía en baterías. Estos esquemas permiten diferentes niveles de autonomía, interacción con la red y aprovechamiento energético, en función de la normativa local, las condiciones tarifarias y los objetivos del usuario.

² Figura adaptada con fines educativos a partir de recursos gráficos de libre acceso publicados por ENDEF ENGINEERING S.L. en su sitio web institucional (<https://endef.com>, acceso: octubre de 2025). Todos los derechos pertenecen a sus respectivos autores.

La **Figura 4** presenta las configuraciones más comunes en entornos residenciales y comerciales. En cada caso se destacan los principales **componentes del sistema**, incluyendo:

- **Paneles solares:** responsables de captar la radiación solar incidente y convertirla en energía eléctrica de corriente continua (DC).
- **Inversores (o inversores/cargadores):** convierten la energía DC generada por los módulos en corriente alterna (AC), adecuada para el consumo local o la inyección a la red eléctrica. En sistemas con baterías, permiten además cargar y descargar el almacenamiento.
- **Cuadro eléctrico:** centraliza la distribución de energía a los aparatos eléctricos del hogar o edificio.
- **Contadores bidireccionales:** miden tanto la energía consumida desde la red como la inyectada (en esquemas *on-grid*).
- **Mecanismos antivertido:** dispositivos electrónicos o sistemas de control que evitan la inyección de excedentes a la red, cuando la normativa no lo permite.
- **Baterías:** almacenan energía para su uso posterior, especialmente útil en sistemas aislados o en aplicaciones con respaldo energético.
- **Grupo electrógeno:** fuente auxiliar de generación en sistemas aislados (*off-grid*), activada ante falta de radiación solar o descarga de baterías.

Las aplicaciones actuales pueden clasificarse según su escala, nivel de conexión a red y función específica dentro del sistema energético. A continuación, se describen los principales tipos:

- **Sistemas residenciales y comerciales (distribuidos):** Los sistemas *on-grid* de pequeña escala, instalados en techos de viviendas, comercios e industrias, constituyen una de las formas más visibles y accesibles de energía solar. Su potencia típica va desde los 2 a 50 kW y están diseñados para autoconsumo con inyección eventual a la red bajo esquemas de medición neta o balance neto. Estos sistemas han ganado terreno gracias a reducciones de costo, incentivos fiscales, y normativas que facilitan su conexión, como las leyes de generación distribuida en Chile, México, Alemania y Australia. En zonas rurales o remotas, los sistemas *off-grid* fotovoltaicos combinados con baterías (por ejemplo, sistemas solares domiciliarios o mini-redes) han sido clave para el acceso universal a la energía. Según REN21 (2024), más de 180 millones de personas utilizan soluciones solares fuera de red, lo que ha permitido cerrar brechas de acceso en países del África subsahariana y del sudeste asiático [44].



Figura 5. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos comerciales.

- **Sistemas *utility-scale* (a gran escala):** Los parques solares de gran escala, conectados directamente al sistema de transmisión, han sido el principal motor de crecimiento de la capacidad PV mundial en la última década. Estos sistemas varían entre 1 MW y más de 500 MW, y se localizan típicamente en zonas con alta irradiancia y disponibilidad de suelo, como desiertos, terrenos agrícolas degradados o áreas industriales. La incorporación de tecnologías bifaciales y seguidores solares ha elevado su productividad, permitiendo factores de capacidad superiores al 30 % en regiones óptimas como el norte de Chile, el Medio Oriente y partes del sur de Estados Unidos [24]. En Chile, proyectos como Sol de Atacama o Luz del Norte superan los 100 MW y forman parte de un creciente portafolio que integra almacenamiento en baterías y contratos de suministro a grandes consumidores eléctricos.



Figura 6. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos *utility-scale* [45].

- **Agrivoltaica:** La agrivoltaica permite el uso simultáneo de terrenos agrícolas para producción energética y cultivos. Esta solución ha demostrado beneficios como la reducción del estrés térmico e hídrico de las plantas, mejora del rendimiento en cultivos sensibles al calor, y aumento de la eficiencia del uso del suelo (*land use efficiency*). Países como Japón, Francia, Alemania y recientemente Chile han

comenzado a explorar esta aplicación, con normativas específicas que habilitan su desarrollo [46], [47]. Estudios recientes indican que, bajo ciertas configuraciones, la agrivoltaica puede mantener o incluso mejorar la productividad agrícola al tiempo que genera electricidad limpia y trazable, ofreciendo una respuesta a la creciente competencia por el uso del territorio[48].



Figura 7. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos integrados a la agricultura (agrivoltaicos) [49].

- **Sistemas flotantes (*floating PV*):** Los sistemas fotovoltaicos instalados sobre cuerpos de agua —como embalses, lagunas artificiales o represas hidroeléctricas— representan una solución atractiva para países con limitaciones de suelo o altos niveles de evaporación. Estos sistemas aprovechan la infraestructura eléctrica ya existente en represas, mejoran la eficiencia de los módulos por enfriamiento natural, y reducen la pérdida de agua por evaporación [50]. Según REN21 (2024), ya existen más de 5 GW de capacidad flotante instalada en el mundo, con proyectos emblemáticos en China, Corea del Sur, India y Brasil. En América Latina, se desarrollan pilotos en represas del sistema interconectado brasileño y en embalses del norte de Chile [24].



Figura 8. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos flotantes [51].

- **PV integrada en edificaciones (BIPV):** Los sistemas *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) incorporan módulos solares como parte estructural de edificaciones, ya sea en techos, fachadas, ventanas o barandas. Esta solución permite generar electricidad en el punto de consumo, reduciendo pérdidas por transporte y mejorando la estética y funcionalidad de edificios sustentables. A pesar de su mayor costo inicial, el crecimiento de las regulaciones de construcción energética y el desarrollo de materiales arquitectónicos con propiedades fotovoltaicas están acelerando su adopción, particularmente en Europa, China y Estados Unidos [52].



Figura 9. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos integrados a edificaciones [53].

- **Aplicaciones móviles y autónomas:** Finalmente, las tecnologías fotovoltaicas están presentes en un número creciente de sistemas portátiles y móviles, incluyendo cargadores solares, vehículos eléctricos con paneles integrados, estaciones base de telecomunicaciones, infraestructura de monitoreo ambiental, y tecnologías humanitarias (iluminación autónoma, clínicas móviles, etc.). Estas aplicaciones, aunque pequeñas en escala, son vitales en contextos de aislamiento, emergencia o seguridad energética [54].



Figura 10. Imagen ilustrativa de sistemas fotovoltaicos aplicados a sistemas móviles y autónomos [55].

Tabla 2. Aplicaciones actuales de la energía solar fotovoltaica: escalas, beneficios y barreras.

Tipo de Aplicación	Potencia Típica	Tipo de Conexión	Principales Beneficios	Desafíos Relevantes	Refs
Residencial / Comercial (Distribuidos)	2–50 kW	<i>On-grid / Off-grid</i>	Autonomía energética, ahorro en la cuenta eléctrica, fácil implementación	Intermitencia, espacio disponible en techos, barreras regulatorias	[56], [57], [58]
Utility-scale (Gran Escala)	1–500+ MW	<i>On-grid</i> (Alta Tensión)	Alta producción, economías de escala, competitividad en el mercado spot	Ocupación de grandes superficies, impacto ambiental, <i>curtailment</i>	[59], [60]
Agrivoltaica	Variable (dependiente del cultivo y terreno)	<i>On-grid</i> (Distribución) / Mixta	Uso dual del suelo, mejora microclimática en cultivos, trazabilidad	Compatibilidad con prácticas agrícolas, regulación específica	[61], [62]
Sistemas Flotantes	100 kW – 100 MW	<i>On-grid /</i> Híbrida con hidro	Uso eficiente del recurso agua, reducción de evaporación, enfriamiento natural	Corrosión, anclaje estructural, limpieza y mantenimiento	[62]
Integración en Edificaciones (BIPV)	Hasta 100 kW por edificio	<i>On-grid /</i> Autoconsumo	Generación en sitio, reducción de pérdidas, valor arquitectónico	Costo inicial elevado, integración arquitectónica compleja	[57]
Aplicaciones Móviles / Autónomas	<1 kW – 10 kW	<i>Off-grid /</i> Autónoma	Acceso energético en zonas remotas, portabilidad, respaldo en emergencias	Limitación de potencia, dependencia de radiación local	[54], [63]

4

Rol de la Tecnología PV en la Transición Energética Global

La transición energética global, impulsada por la necesidad de enfrentar la crisis climática y reducir la dependencia de combustibles fósiles, requiere una transformación estructural del sistema energético mundial. En este proceso, la energía solar fotovoltaica (PV) ha emergido como una de las tecnologías más relevantes, tanto por su rápido crecimiento como por su capacidad de despliegue masivo, descentralizado y económico.

Según datos de REN21 (2024), la PV aportó en 2023 más del 60 % de toda la nueva capacidad de generación renovable instalada en el mundo, y ya representa más del 10 % del consumo eléctrico [24]. Este crecimiento ha sido particularmente destacado en países como China, India, Brasil, Alemania, Estados Unidos y Australia, donde la combinación de políticas de apoyo, condiciones climáticas favorables y costos decrecientes ha permitido una penetración significativa en las matrices energéticas.

4.1. Descarbonización y Compromisos Internacionales

La PV juega un rol esencial en los compromisos climáticos internacionales, especialmente desde el Acuerdo de París (2015) y las metas establecidas en la COP28 (2023) [42], donde más de 130 países se comprometieron a triplicar la capacidad renovable instalada a 2030. Este objetivo no puede lograrse sin una expansión masiva de la energía solar, que, por su disponibilidad global, modularidad y rápida instalación, se perfila como la fuente más escalable para cumplir las metas de neutralidad de carbono.

Además, la energía PV tiene una huella ambiental baja durante su operación, y aunque aún enfrenta desafíos en términos de reciclaje y uso de minerales críticos, estudios recientes han demostrado que su ciclo de vida presenta emisiones por kWh entre 20 y 50 veces menores que tecnologías fósiles convencionales.

4.2. Comparación con Otras Tecnologías Renovables

A diferencia de otras tecnologías como la eólica, hidroeléctrica o geotérmica, la PV se caracteriza por su escalabilidad horizontal y su bajo umbral de entrada tecnológica. Esto permite su implementación en sistemas aislados, zonas urbanas densas o territorios sin grandes infraestructuras eléctricas.

En términos económicos, la fotovoltaica ha logrado alcanzar LCOE inferiores a 30 USD/MWh en varios países, superando incluso a la generación térmica convencional en licitaciones abiertas y contratos bilaterales. Su principal desafío, sin embargo, radica en su variabilidad horaria y estacional, lo que exige su integración con sistemas de almacenamiento, redes inteligentes y mecanismos de flexibilidad del sistema [21].

4.3. Evolución de Costos y Competitividad

El descenso de precios ha sido uno de los motores clave del despliegue PV. Entre 2010 y 2022, el costo promedio de generación solar a gran escala cayó en más de un 85 %, pasando de 0,378 a 0,049 USD/kWh según IRENA, convirtiéndose en la fuente más barata de nueva generación en más de dos tercios del planeta [21]. Esta caída ha sido posible gracias a la maduración industrial, el aprendizaje tecnológico, las economías de escala y la mejora en eficiencia de los módulos.

En el escenario actual, los proyectos solares ya no requieren necesariamente subsidios directos para ser competitivos, aunque sí requieren condiciones habilitantes: acceso a financiamiento, estabilidad regulatoria, infraestructura de red y mecanismos de gestión de la intermitencia.

4.4. Ventajas y Desafíos Estructurales

Entre las principales ventajas de la PV se encuentran:

- Su disponibilidad universal, ya que todos los países disponen de radiación solar en distinta magnitud.
- Su modularidad, que permite desde instalaciones desde fracciones de kW hasta parques de cientos de MW.
- Su rápida implementación, en comparación con otras tecnologías de generación.
- Su impacto ambiental reducido durante la operación y mínima necesidad de agua.

No obstante, la expansión acelerada de la PV también enfrenta desafíos estructurales:

- La congestión en redes de transmisión en muchos países, donde la generación se ubica lejos de los centros de consumo.
- La intermitencia inherente de la fuente solar, que requiere soluciones complementarias como baterías, hidrógeno o redes integradas.
- La dependencia de una cadena de suministro altamente concentrada geográficamente, lo que genera vulnerabilidades ante interrupciones logísticas o conflictos comerciales.
- El acceso desigual al financiamiento, particularmente en países en desarrollo, donde las tasas de interés elevadas y el riesgo percibido aumentan los costos de capital.

En conjunto, la energía solar fotovoltaica se posiciona como columna vertebral de la descarbonización energética global, combinando ventajas técnicas, económicas y ambientales. A futuro, su consolidación dependerá de la capacidad de los países para abordar estas brechas estructurales y asegurar una transición energética justa, resiliente y sostenible.

5

Perspectivas Globales y Brechas Críticas para su Expansión

Las proyecciones a mediano y largo plazo confirman que la energía solar fotovoltaica será una de las tecnologías centrales para alcanzar los objetivos globales de sostenibilidad, electrificación y neutralidad de carbono. Sin embargo, su expansión no está exenta de barreras estructurales, regulatorias y geopolíticas que deben ser resueltas para garantizar una transición energética equitativa y eficaz.

5.1. Proyecciones y Escenarios a 2030 – 2050

En 2022, la IEA estimó que, para seguir la hoja de ruta Net Zero by 2050 (NZE), las adiciones anuales de solar FV debían “más que cuadruplicarse” hasta ~630 GW en 2030 [64], [65]. Con la actualización del escenario Net Zero (NZE) y las metas de COP28, la propia IEA eleva ese ritmo a ~900 GW/año para lograr ~6.700 GW acumulados en 2030. En 2024 se añadieron ~554–602 GW (IEA-PVPS), señal de un avance excepcional que aún debe intensificarse para alinearse con la senda NZE.

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) estima que para alcanzar un sistema energético alineado con 1,5 °C de calentamiento, se requeriría una capacidad fotovoltaica acumulada de al menos 5,4 TW para 2030 y 18.2 TW para 2050 [66]. Estas cifras convierten a la PV en la fuente de generación más relevante en términos de crecimiento neto global.

Adicionalmente, el Pacto Global adoptado en la COP28 fijó como meta colectiva triplicar la capacidad renovable mundial y duplicar la eficiencia energética para 2030, compromisos que sitúan a la energía solar en el centro de las estrategias de los países firmantes [24], [42].

5.2. Brechas Críticas para la Escalabilidad Global

A pesar del dinamismo tecnológico y económico de la fotovoltaica, existen brechas críticas que deben ser abordadas para viabilizar estas proyecciones:

- a) **Infraestructura eléctrica limitada:** La expansión de la capacidad PV ha superado en muchos países la capacidad de sus redes eléctricas. Fenómenos como la congestión de líneas de transmisión, largos tiempos de conexión, y restricciones de despacho están generando altos niveles de vertimiento de energía solar, especialmente en mercados con penetración acelerada como China, Chile, Australia e India [67].
- b) **Acceso desigual al financiamiento:** En países en desarrollo, los costos del capital son hasta 7 veces mayores que en países de la OCDE, lo que encarece significativamente los proyectos solares. Según REN21, esta diferencia es uno de los principales obstáculos estructurales para la equidad energética global. Además, muchos países carecen de políticas de mitigación de riesgo, garantías públicas o marcos de licitación robustos que permitan atraer inversión privada [24].
- c) **Concentración de la cadena de suministro:** Más del 80 % de la producción global de polisilicio, obleas, celdas y módulos se concentra actualmente en China, lo que genera una vulnerabilidad geoestratégica para otros mercados. Esta situación ha llevado a una creciente presión para desarrollar cadenas de valor más diversificadas, con políticas industriales activas en EE. UU., Europa, India y América Latina [68].
- d) **Riesgos ambientales y sociales emergentes:** A medida que se incrementa el despliegue de la energía solar, emergen nuevos desafíos asociados al uso del suelo,

impactos ecosistémicos, acceso al agua, reciclaje de módulos y participación comunitaria. La expansión no planificada puede generar conflictos sociales o degradación ambiental en zonas sensibles, por lo que se requiere una planificación territorial integrada y procesos participativos [69].

- e) **Capacidad institucional y normativa:** En muchos países, el ritmo de innovación tecnológica supera la velocidad de actualización normativa. Se requieren marcos regulatorios dinámicos que permitan la conexión de nuevos proyectos, definan estándares técnicos modernos, y articulen adecuadamente el desarrollo de la generación distribuida, el almacenamiento, y la gestión flexible de la demanda [70].

5.3. Oportunidades Sistémicas

Pese a estas brechas, existen grandes oportunidades de articulación entre la tecnología PV y otros sectores:

- **Acoplamiento con almacenamiento energético:** Tecnologías como baterías, hidrógeno verde y almacenamiento térmico (ej. sales fundidas) permiten que la energía solar sea flexible y despachable. En particular, los procesos de electrólisis flexibles pueden absorber pico de generación, reducir el *curtailment* y estabilizar precios eléctricos; además, los vehículos de hidrógeno (FCEVs) pueden inyectar energía a la red en momentos de baja generación solar y /o alta demanda [71].
- **Electrificación de procesos industriales y transporte:** El uso de PV para alimentar directamente procesos como electrólisis (hidrógeno verde) y transporte eléctrico (BEVs, FCEVs) ofrece una vía tangible hacia la descarbonización en sectores intensivos como minería, agroindustria y movilidad urbana [71].
- **Producción descentralizada en ciudades:** Los sistemas solares distribuidos urbanos mejoran la resiliencia energética, reducen pérdidas en la red y promueven la participación ciudadana en generación distribuida. Estudios muestran reducciones del costo total del sistema eléctrico y mejor autoabastecimiento cuando se integra generación distribuida en esquemas sector acoplado [63].
- **Integración regional a través de interconexiones:** Las interconexiones eléctricas entre zonas permiten aprovechar complementariedades horarias y recursos geográficos, mejorando la eficiencia global del sistema renovable[24].

A raíz de los aspectos antes mencionados, es evidente que las perspectivas globales de la tecnología fotovoltaica son extremadamente favorables, tanto por su competitividad como por su adaptabilidad. No obstante, su expansión sostenida y equitativa requerirá un esfuerzo coordinado entre gobiernos, industria, organismos multilaterales y comunidades para resolver las brechas estructurales que hoy limitan su escalabilidad global.

6

Evolución Histórica de la Energía Solar Fotovoltaica en Chile

En la última década, Chile ha experimentado una transformación estructural en su matriz eléctrica, posicionándose como líder regional en el desarrollo de energías renovables no convencionales (ERNC), con la tecnología PV como su principal impulsor. Este avance ha sido impulsado por una combinación de políticas públicas, condiciones geográficas y climáticas privilegiadas (particularmente en el norte del país con niveles de Irradiancia Global Horizontal (GHI) y Irradiancia Normal Directa (DNI) de clase mundial³, baja nubosidad y concentración de aerosoles atmosféricos sobre 1000 m.s.n.m), y una rápida disminución de costos tecnológicos [67].

6.1. Evolución de la Capacidad Instalada (2014 – 2024)

El crecimiento de la capacidad solar fotovoltaica en Chile ha sido sostenido y acelerado. Según el Reporte Mensual ERNC de febrero de 2025, la potencia instalada solar FV alcanzó 10.731 MW, lo que representa el 30,6 % de la capacidad total ERNC dentro de la matriz eléctrica nacional [72].

Tabla 3. Capacidad instalada FV en Chile (2014–2024)⁴ [73]

Año	Capacidad FV (MW)	% total ERNC	% del SEN total
2014	402	13,1 %	0,9 %
2018	2.313	20 %	9 %
2020	3.142	25,4%	12,6 %
2025-FEB	10.731	47,9%	30,6 %

Este crecimiento ha sido liderado por proyectos *utility-scale* ubicados principalmente en el Desierto de Atacama, pero también ha comenzado a expandirse a otras regiones mediante proyectos PMGD y generación distribuida [74].

³ Para más información visite: <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=chile>

⁴ Los datos aquí presentados pueden ser obtenidos de los reportes mensuales ERNC presentados por la Comisión Nacional de Energía en: <https://www.cne.cl/nuestros-servicios/reportes/informacion-y-estadisticas/>

6.2. Costos y Competitividad en el Mercado Nacional

Chile se ha posicionado como uno de los países con mayor competitividad a nivel mundial en generación solar fotovoltaica. Según el informe de IRENA (2023) [21], el costo nivelado promedio ponderado (LCOE) de los proyectos solares fotovoltaicos a gran escala en Chile alcanzó 36 USD/MWh en 2023, ubicándose consistentemente entre los valores más bajos del planeta.

Este dato debe contextualizarse dentro de una trayectoria de más de una década de disminución sostenida de costos. Como se ilustra en la **Figura 11**, Chile ha experimentado una reducción acumulada del 82 % en el LCOE solar entre 2010 y 2023, partiendo desde niveles superiores a los 200 USD/MWh en la década anterior. Aunque esta disminución es inferior a la de países como Australia o Corea del Sur (-93 %), sigue siendo significativamente más profunda que la de mercados como Países Bajos (-54 %) o Turquía (-40 %).

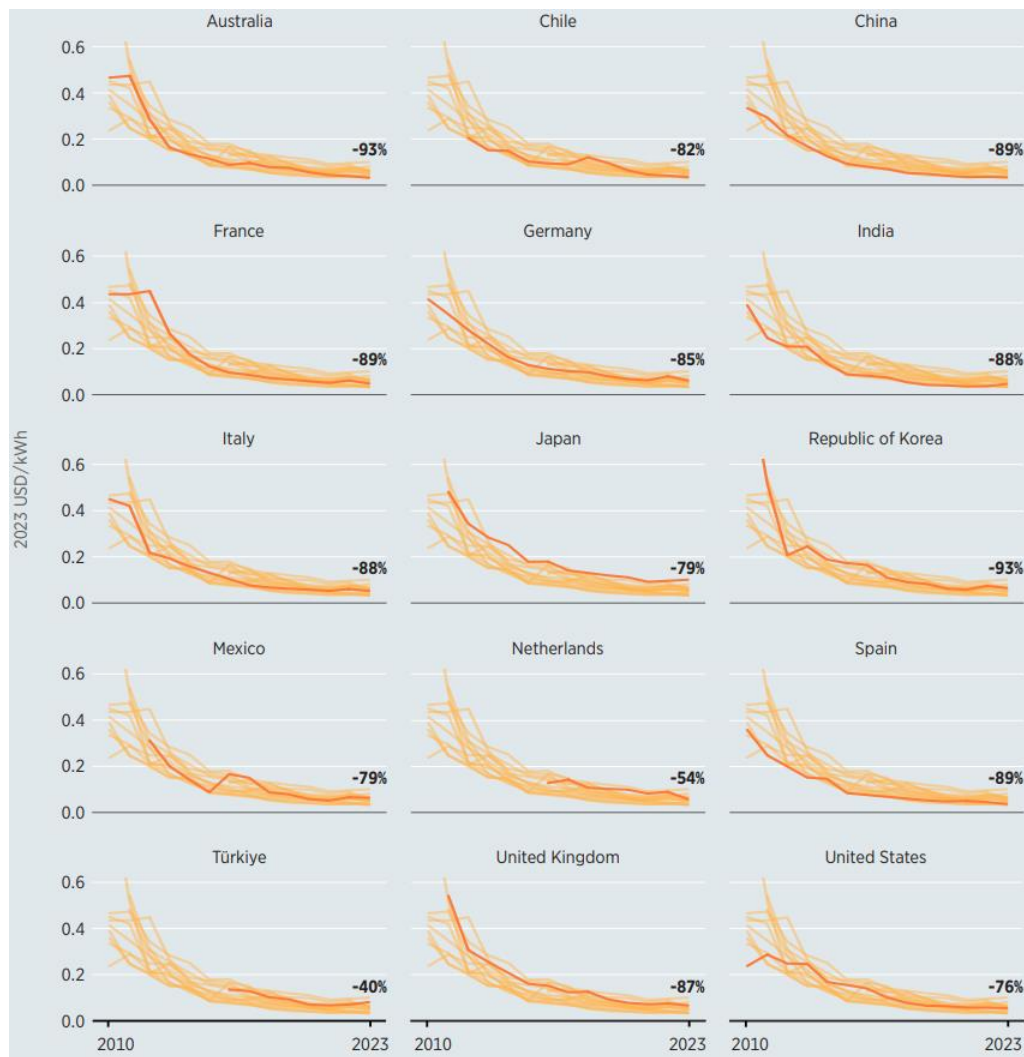


Figura 11. Evolución del LCOE Solar en diferentes mercados alrededor del mundo [21].

Esta evolución refleja una combinación de factores estructurales y estratégicos:

- **Recurso solar de clase mundial:** zonas del norte de Chile presentan niveles de irradiación DNI superiores a los 2.800–3.000 kWh/m²·año, lo que incrementa significativamente el factor de capacidad de los proyectos solares.
- **Procesos de licitación competitivos y transparentes:** las subastas públicas realizadas desde 2015 han facilitado contratos a largo plazo (PPA) a precios decrecientes, reduciendo la percepción de riesgo para inversionistas.
- **Madurez tecnológica e industrial:** el sector solar chileno ha consolidado una base de proveedores, desarrolladores e ingenierías con experiencia técnica, permitiendo eficiencias de escala y mejoras en el diseño de plantas (uso de bifaciales, seguidores, optimización *layout*, etc.).
- **Reducción global de costos de módulos y componentes:** si bien esta es una tendencia mundial, Chile ha logrado capturar este descenso de forma más efectiva que otros países latinoamericanos, gracias a su apertura al mercado internacional y la baja de aranceles en componentes solares.

La **Figura 11** también deja ver que, si bien la curva de aprendizaje de Chile se ha estabilizado desde 2021 en torno a los 30–40 USD/MWh, esto sigue otorgándole una ventaja estructural frente a países de la OCDE con menores niveles de radiación solar y mayores costos de capital.

Además, al contextualizar esta trayectoria en la comparación internacional, se observa que Chile ha logrado mantener un LCOE solar incluso por debajo de muchos países de la OCDE, superando ampliamente en competitividad a mercados como Japón, México o Países Bajos.

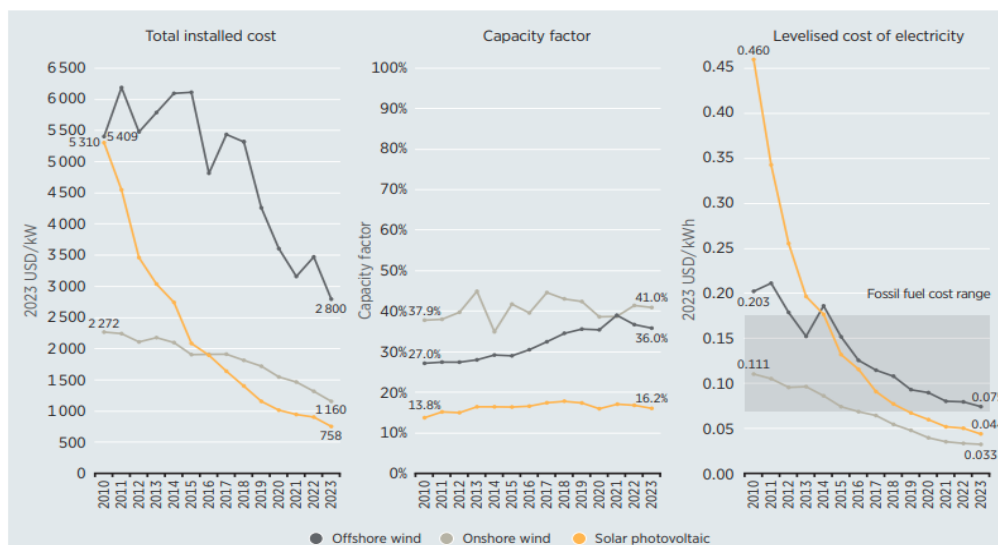


Figura 12. Tendencias globales y comparación de indicadores de desempeño Solar vs Eólica (Offshore/Onshore) 2010–2023 [21].

Esta evolución nacional se alinea con una tendencia global aún más amplia, como lo muestra la **Figura 12** del mismo informe de IRENA, que compara las tecnologías renovables líderes:

- A nivel global, el LCOE solar PV pasó de 460 USD/MWh en 2010 a solo 44 USD/MWh en 2023, una caída del 90 %.
- En paralelo, el costo de instalación de sistemas solares disminuyó de 5.310 a 1.160 USD/kW en el mismo periodo, siendo el más bajo entre las renovables a gran escala.
- Aunque el factor de planta promedio mundial de la solar es aún inferior al de la eólica (16,2 % en 2023 vs 36–41 % en eólica), la ventaja en costos compensa esta diferencia, consolidando a la PV como la fuente más barata de nueva capacidad en más de dos tercios del planeta.
- Importante también es que el LCOE solar ya está por debajo del rango de costos de generación fósil (sombreado en gris en la figura), sin considerar externalidades ambientales ni precios de carbono.

Para entender las causas detrás de esta drástica caída del LCOE solar, la **Figura 13** muestra la descomposición de los factores que explican la reducción de 416 USD/MWh entre 2010 y 2023 a nivel global:

La disminución más significativa provino de la reducción en el costo de los módulos fotovoltaicos (–188 USD/MWh), seguida por mejoras en los costos de instalación y montaje (–58 USD/MWh), y una importante reducción en costos blandos (*soft costs*), como permisos, ingeniería y gestión (–56 USD/MWh).

Otros aportes relevantes vinieron de la baja en el costo de inversores (–36 USD/MWh), estructuras de soporte (–25 USD/MWh) y componentes eléctricos secundarios (BoS).

También se observan contribuciones adicionales por reducción en el costo del capital (WACC), menores costos operacionales (O&M), y un ligero aumento en el factor de planta global, que pasó de 13,8 % a 16,2 %.

Esta figura sintetiza que no solo la eficiencia tecnológica ha sido clave para la caída del LCOE, sino también la maduración del ecosistema industrial, la estandarización de procesos, la digitalización, y el entorno financiero favorable que redujo la percepción de riesgo de estos proyectos.

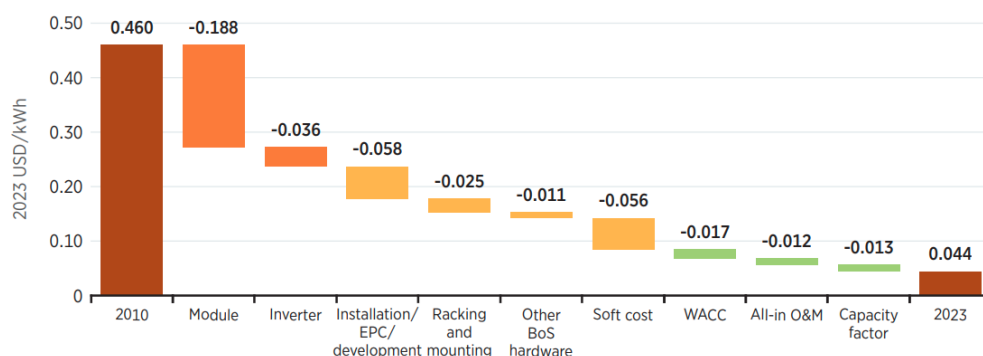


Figura 13. Desglose de la Reducción del LCOE Solar Global [21].

En resumen, la energía solar fotovoltaica ha consolidado su liderazgo en competitividad tanto en Chile como a nivel global. Su bajo LCOE, sumado a su modularidad y tiempos cortos de implementación, la convierten en la opción más atractiva para nuevas inversiones en generación limpia. No obstante, este liderazgo enfrenta riesgos emergentes, como la saturación de redes en zonas de alta generación, los vertimientos crecientes y la necesidad de complementar la expansión con almacenamiento y transmisión para asegurar la valorización de la energía generada.

6.3. Marco Legal y Rol de los Prosumidores

Desde la implementación de la Ley 20.571 en 2014, Chile ha habilitado la figura del prosumidor, permitiendo a los usuarios generar electricidad para autoconsumo e inyectar excedentes a la red [75]. Esta normativa fue fortalecida con la Ley 21.118 (2018), que amplió

el límite de potencia a 300 kW, y la Ley 21.505 (2022), que habilitó la participación de sistemas de almacenamiento [76].

Según Osorio-Aravena *et al.* (2025) [77], hacia fines de 2022 existían más de 16.300 instalaciones prosumidoras conectadas al sistema, totalizando 161 MWp. Aunque el 83 % de las instalaciones correspondía al sector residencial, el mayor volumen de capacidad estaba en el sector agrícola (57,8 MWp), seguido del industrial y el público.

Pese a estos avances, los prosumidores siguen representando menos del 0,5 % de la capacidad instalada total del país, debido a obstáculos como:

- Procesos de conexión lentos y complejos.
- Esquema tarifario poco atractivo (*net-billing* en lugar de *net-metering*).
- Falta de incentivos tributarios o financieros masivos.
- Baja difusión del potencial de autoconsumo urbano.

6.4. Brechas Estructurales y Regionales

A pesar del liderazgo de Chile en adopción de tecnología PV, persisten brechas estructurales importantes:

- **Congestión en las redes de transmisión:** especialmente en el norte, ha generado vertimientos crecientes. En ciertos meses de 2023 y 2024, el vertimiento solar superó los 2 TWh/año, afectando la rentabilidad y estabilidad de proyectos [78], [79].
- **Concentración geográfica:** más del 85 % de la capacidad instalada se encuentra en las regiones de Antofagasta, Atacama y Tarapacá, lo que limita la resiliencia y equidad territorial del sistema [80].
- **Escasa penetración en zonas urbanas:** programas como "Casa Solar" han permitido avanzar, pero la generación distribuida sigue lejos de alcanzar su potencial. A enero de 2025, la generación distribuida representa menos del 2,7 % de toda la energía inyectada al sistema [81].

7

Estado Actual y Proyecciones Nacionales Hacia 2030

La energía solar fotovoltaica se ha consolidado como el pilar central de la transformación energética en Chile. A diciembre de 2024, la capacidad total de generación eléctrica del país ascendía a 34.864 MW, de los cuales 10.494 MW correspondían a tecnología solar fotovoltaica, lo que representa el 30,1 % de la capacidad total instalada nacional y la convierte en la fuente de mayor peso dentro del conjunto de ERNC [82].

En conjunto, las ERNC alcanzaron 16.533 MW de capacidad en el SEN, representando el 47,5 % de la matriz eléctrica nacional, cifra sin precedentes en la historia energética del país. Este hito refleja la madurez técnica, económica y normativa alcanzada por la tecnología solar en el contexto chileno.

7.1. Capacidad Instalada y Proyecciones Hacia 2030

La potencia instalada en energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década. Si en 2014 la participación era marginal con poco más de 400 MW, en diez años Chile ha multiplicado por más de 25 veces su capacidad instalada, superando la barrera de los 10 GW en operación comercial.

Este crecimiento ha sido liderado por proyectos de gran escala en el norte del país (Atacama, Antofagasta y Tarapacá), pero también ha comenzado a expandirse a otras regiones mediante proyectos PMGD, iniciativas de generación distribuida, y esquemas híbridos con almacenamiento. En paralelo, la energía eólica alcanzó una participación del 13,5 % del total nacional, mientras que otras fuentes ERNC como la mini-hidro, biomasa, geotermia y concentración solar de potencia (CSP) completan el 3,9 % restante.

En lo que respecta a las proyecciones del sector PV en Chile, diversos estudios institucionales y académicos coinciden en que Chile podría alcanzar entre **18 y 22 GW de capacidad solar fotovoltaica instalada para el año 2030**, dependiendo del ritmo de expansión de la infraestructura habilitante (transmisión, almacenamiento) y de la estabilidad de las condiciones financieras y regulatorias [83].

El *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables 2022–2026*⁵ considera como meta intermedia alcanzar al menos **70 % de generación eléctrica renovable para 2030**, lo que implicaría que la solar fotovoltaica entregue más del **35–40 % de la energía eléctrica nacional** si se combinan adecuadamente generación, almacenamiento e interconexión territorial.

Algunos factores que favorecen este crecimiento son:

- El potencial técnico estimado por estudios de la CNE y el Ministerio de Energía supera los **1.800 GW solares** en territorio nacional [72].
- La cartera actual de proyectos en calificación supera los **8.000 MW**, lo que permitiría duplicar la capacidad operativa si se concretan antes de 2030 [72].
- El avance de soluciones híbridas PV + BESS (*battery energy storage systems*), en paralelo, a la gestión flexible de la demanda —particularmente en sectores intensivos en consumo energético como la minería— permite desplazar procesos eléctricos hacia momentos del día con alta disponibilidad solar, utilizando mecanismos de

⁵ Estos datos pueden ser corroborados en:

https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/agenda_energia_2022_-_2026.pdf

control automático, contratos flexibles o integración con tecnologías como el hidrógeno verde (minería verde).

Para estimar la trayectoria de expansión futura de la energía solar fotovoltaica en Chile más allá de 2030, se han considerado los datos del Plan Energético de Largo Plazo⁶ (PELP, 2025) y las proyecciones desarrolladas en el trabajo de Osorio-Aravena *et al.* (2025) [77]. La **Figura 14** muestra tres escenarios contrastantes de capacidad instalada PV hacia el año 2060:

- Escenario de Transición Lenta: asume una expansión moderada del sistema eléctrico, con limitaciones en transmisión, regulación y financiamiento.
- Escenario de Transición Acelerada: considera una expansión proactiva habilitada por inversión pública y privada, habilitadores técnicos y marcos regulatorios efectivos.
- Escenario de Carbono Neutralidad: compatible con la meta de emisiones netas cero al 2050, asumiendo electrificación masiva y despliegue de nuevas industrias como el hidrógeno verde y la minería solar.

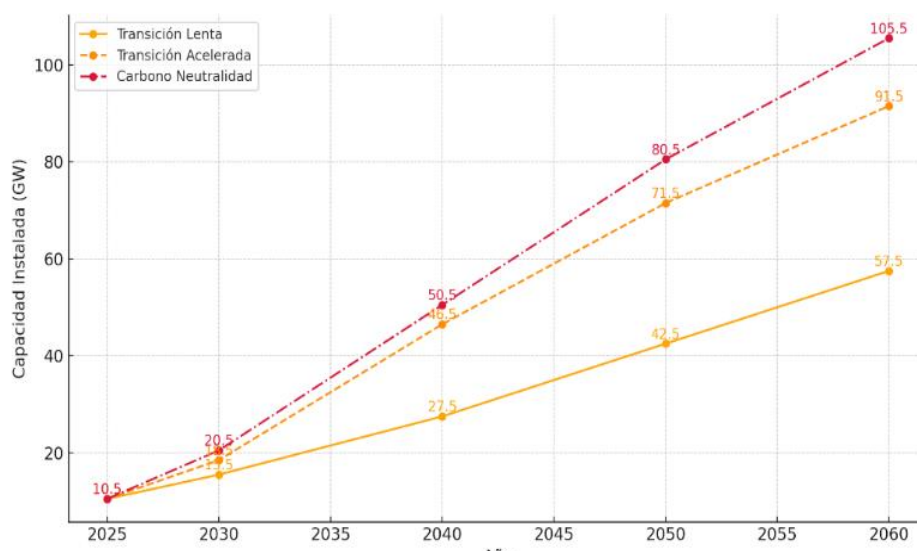


Figura 14. Proyección de capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en Chile (2025–2060) bajo tres escenarios: Transición Lenta, Transición Acelerada y Carbono Neutralidad.

Estas proyecciones permiten visualizar la brecha existente entre una senda conservadora y los requerimientos de una matriz 100 % renovable, destacando la importancia de políticas ambiciosas, coordinación institucional y desarrollo de infraestructura habilitante.

7.2. Rol Estratégico Hacia la Descarbonización

⁶ El Plan Energético de Largo Plazo puede ser consultado en:

https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_definitivo_pelp_2023-2027.pdf

Chile ha asumido compromisos nacionales e internacionales que posicionan a la energía solar como eje estratégico del proceso de descarbonización. Entre las políticas clave destacan:

- El Plan Nacional de Descarbonización, que contempla el retiro de todas las centrales a carbón hacia 2040, con hitos intermedios al 2025 y 2030 [84].
- El Plan de Expansión de Transmisión 2023–2028⁷, que incluye obras estructurales como Kimal–Lo Aguirre, clave para evacuar la creciente generación solar del norte hacia centros de consumo en el centro-sur.
- La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, que prevé que una parte sustantiva del hidrógeno producido en Chile será generada mediante electrólisis alimentada con energía solar, en especial en la Macrozona Norte [85].

Así, la energía solar no solo será crucial en el reemplazo de generación fósil, sino también como habilitadora de la electrificación de procesos industriales, transporte y nuevos vectores energéticos como el amoníaco y el metanol.

7.3. Desafíos Inmediatos

Pese a estas proyecciones alentadoras, alcanzar los objetivos nacionales requiere resolver barreras estructurales que persisten:

- Limitaciones en transmisión eléctrica, especialmente en el norte, donde los vertimientos alcanzaron récords históricos en 2024.
- Retrasos en la tramitación de permisos ambientales y eléctricos, que ralentizan la puesta en marcha de nuevos proyectos.
- Desigualdad territorial en generación distribuida, donde aún hay bajo aprovechamiento en zonas urbanas e industriales del centro-sur.
- Falta de regulación robusta para sistemas híbridos y almacenamiento, lo que dificulta la operación flexible del sistema en horas de alta generación solar.

En síntesis, Chile ha consolidado a la energía solar fotovoltaica como la tecnología de mayor penetración en su matriz eléctrica. Las perspectivas hacia 2030 son optimistas, pero su concreción depende de decisiones estratégicas en transmisión, regulación, financiamiento y gobernanza energética territorial. Alinearse con estas prioridades permitirá a Chile avanzar de forma efectiva hacia una matriz **100 % limpia, resiliente y sostenible**.

⁷ Para un mayor detalle del plan de Expansión de Transmisión acceda a: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2024/05/ITF-Plan-de-Expansion-de-la-Transmision-2023.pdf>

8 Brechas Estructurales y Sociopolíticas en el Contexto Chileno

De acuerdo con la información presentada en las secciones anteriores, se ha identificado que pese al notable crecimiento de la energía solar fotovoltaica en Chile y sus alentadoras proyecciones hacia 2030, existen **limitaciones estructurales y barreras sociopolíticas** que amenazan con desacelerar su expansión y limitar su potencial como eje de la transición energética. Identificar y abordar estas brechas resulta clave para materializar los escenarios más ambiciosos de descarbonización, resiliencia y soberanía energética.

8.1. Infraestructura de Transmisión Saturada

Uno de los principales cuellos de botella es la limitada capacidad de transmisión del SEN. Las regiones del norte —las más generadoras de energía solar— también registran los índices más altos de vertimiento (*curtailment*), por la incapacidad de transportar toda la generación hacia los centros de consumo. En días extremos de 2024, más del 20 % de la energía eólica y solar fue desperdiciada, equivalente al consumo anual de 2,2 millones de hogares [86], [87]. Otros reportes señalan que las pérdidas totales en 2024 superaron los 5.900 GWh, 148 % más que el año anterior, y superaron inclusive la nueva generación solar inyectada [88].

La **demora en la ejecución de obras clave**, como la línea HVDC Kimal–Lo Aguirre, agrava este problema. Aunque está considerada en el Plan de Expansión de la Transmisión 2023–2028, su entrada en operación no será inmediata, y requiere esfuerzos coordinados entre Estado, sector privado y regulador para no seguir retrasándose [89].

8.2. Atraso Regulatorio y Normativo

El marco normativo chileno aún no se adapta completamente a una matriz energética con alta participación renovable. Algunas de las brechas más relevantes incluyen:

- **Falta de incentivos robustos y normativas claras para sistemas híbridos PV + almacenamiento**, que podrían reducir vertimientos y entregar servicios complementarios de flexibilidad al sistema.
- **Retrasos en la regulación de la generación distribuida a mayor escala**, con barreras administrativas que dificultan el crecimiento de proyectos en el sector comercial e industrial.

- **Incertidumbre regulatoria en mercados complementarios**, como el almacenamiento energético, respuesta de demanda o hidrógeno verde, lo que desincentiva la inversión.

8.3. Complejidad de Permisos y Tramitación Ambiental

La obtención de permisos sigue siendo un proceso **lento, complejo y con poca estandarización**, lo que genera incertidumbre en los desarrolladores de proyectos solares, en particular los de menor escala o los que buscan instalarse en terrenos privados o urbanos.

- El **tiempo promedio de tramitación ambiental supera los 24 meses**, sin garantías claras de aprobación [90], [91].
- Existen **diferencias significativas entre regiones**, lo que refleja una falta de capacidades institucionales homogéneas para gestionar el auge de proyectos renovables.
- Se requiere avanzar hacia un **sistema de ventanilla única digital, ágil y transparente**, tal como han implementado países líderes en transición energética [92].

8.4. Desigualdad Territorial y Exclusión Social

El despliegue de la energía solar en Chile ha sido liderado por grandes proyectos en el norte del país, con escasa integración de comunidades locales o distribución territorial equitativa. Esto genera una doble brecha:

- Por un lado, **zonas urbanas del centro-sur** aún tienen baja penetración de generación distribuida, pese al alto potencial de techos solares y autoconsumo [93].
- Por otro, **comunidades cercanas a grandes parques solares** enfrentan conflictos socioambientales por falta de participación, externalidades no compensadas o beneficios económicos limitados [94].

Superar esta brecha requiere avanzar hacia un modelo de transición energética **más inclusivo, descentralizado y participativo**, que considere la dimensión social del acceso a la energía limpia.

8.5. Riesgo de Dependencia Tecnológica y Concentración de Mercado

Aunque Chile ha logrado precios récord en licitaciones solares, su cadena de valor sigue altamente dependiente de **proveedores internacionales** (particularmente asiáticos) para módulos, inversores y baterías. Esta situación genera:

- Vulnerabilidad frente a **choques logísticos y geopolíticos**, como los ocurridos durante la pandemia o conflictos comerciales.
- Baja **generación de empleo local de calidad** en etapas de manufactura e innovación.

Para reducir esta dependencia, se requiere fomentar el desarrollo local de capacidades industriales, formación de capital humano técnico, y alianzas estratégicas con países y empresas líderes en I+D.

8.6. Financiamiento y Acceso a Capital

A pesar del creciente interés del mercado, **muchos proyectos solares de pequeña y mediana escala enfrentan dificultades de financiamiento**, debido a barreras como:

- Falta de garantías bancarias adecuadas.
- Percepción de riesgo en zonas con congestión de red o incertidumbre normativa.
- Ausencia de mecanismos financieros innovadores como **PPAs ciudadanos, cooperativas energéticas o leasing solar**.

El fortalecimiento de instrumentos de apoyo público, como créditos verdes o líneas de cofinanciamiento, puede ser clave para democratizar la transición energética.

9

Conclusiones y Recomendaciones Estratégicas

La energía solar fotovoltaica ha pasado de ser una tecnología emergente para consolidarse como **el pilar más dinámico y competitivo de la transición energética global**. Su bajo costo, versatilidad de aplicación y rápida escalabilidad la posicionan como una solución clave para enfrentar la crisis climática y avanzar hacia sistemas energéticos sostenibles, resilientes y descentralizados. Este reporte ha demostrado que, tanto a nivel internacional como en el contexto chileno, la fotovoltaica ha superado importantes barreras tecnológicas y económicas, pero enfrenta todavía desafíos estructurales que condicionan su expansión plena.

Entre los principales hallazgos se destaca que Chile cuenta con **una de las matrices eléctricas más renovables del mundo**, con un 47,5 % de participación de las ERNC a inicios de 2025 y más de 10,5 GW instalados en tecnología solar fotovoltaica. Este liderazgo ha sido impulsado por factores como la excelente radiación solar del norte, procesos de licitación competitivos y una rápida adopción de tecnologías de última generación, incluyendo módulos bifaciales y sistemas con seguimiento solar.

Sin embargo, este crecimiento acelerado ha puesto en evidencia **cuellos de botella significativos** en transmisión, tramitación de permisos, distribución territorial de beneficios y regulación del almacenamiento. Además, los vertimientos crecientes, la concentración geográfica de los proyectos y la débil penetración de generación distribuida revelan la necesidad de pasar desde una lógica de expansión reactiva a una estrategia de planificación integrada, participativa y territorialmente justa.

A partir de los análisis desarrollados, se proponen las siguientes **recomendaciones para actores públicos y privados**:

- **Acelerar la expansión de la infraestructura de transmisión**, priorizando obras estructurales como la línea HVDC Kimal–Lo Aguirre, y evaluando mecanismos de planificación anticipada (*grid readiness*) para zonas de alto potencial solar.
- **Modernizar el marco regulatorio**, habilitando esquemas híbridos PV + almacenamiento, mejorando los incentivos a la generación distribuida y promoviendo instrumentos que viabilicen la participación de nuevos actores, incluyendo comunidades, municipios y cooperativas energéticas.
- **Fortalecer los procesos de evaluación ambiental y permisos**, avanzando hacia un sistema de ventanilla única digital, con criterios diferenciados según el impacto del proyecto y estándares mínimos de participación ciudadana.
- **Fomentar el desarrollo de capacidades locales**, tanto en manufactura como en operación, instalación y mantenimiento, mediante programas de formación técnica, alianzas universidad-industria y clústeres regionales de innovación.
- **Impulsar mecanismos de financiamiento verde e inclusivo**, con garantías estatales, líneas de cofinanciamiento y esquemas como PPAs ciudadanos, especialmente para proyectos de menor escala y generación distribuida.
- **Promover la integración sectorial**, utilizando energía solar para procesos industriales, electrificación del transporte y producción de hidrógeno verde, ampliando su contribución a la resiliencia y descarbonización del país.

Mirando hacia 2030, **Chile enfrenta una ventana estratégica de oportunidad**: cuenta con los recursos naturales, la trayectoria técnica y la experiencia institucional para consolidar una matriz eléctrica 100 % renovable y convertirse en exportador de energía limpia. Pero esta meta solo será alcanzable si se abordan las brechas identificadas con decisión política, coordinación multisectorial y visión de largo plazo.

La energía solar fotovoltaica no solo representa una solución tecnológica, sino una oportunidad país para diversificar la economía, democratizar el acceso a la energía, generar empleos de calidad y contribuir activamente al cumplimiento de los compromisos climáticos globales. En este desafío, la acción concertada entre Estado, industria, academia y sociedad civil será determinante para construir un futuro energético sostenible, justo y resiliente para Chile.

10 | Referencias

- [1] K. K. Chinnakutti, S. Anandan, and J. Theerthagiri, "Earth-Abundant Nitride-Based Materials for Photovoltaics," *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment: Volume 1-4*, vol. 2, pp. 403–416, Jan. 2024, doi: 10.1016/B978-0-323-93940-9.00111-0.
- [2] V. Benda, "Photovoltaics: The Basics," *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems: With Special Focus on Photovoltaic Systems*, pp. 151–179, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-811479-7.00008-7.
- [3] A. A. Bayod-Rújula, "Solar photovoltaics (PV)," *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*, pp. 237–295, Aug. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-814853-2.00008-4.
- [4] L. C. Hirst, "1.14 - Principles of Solar Energy Conversion," *Comprehensive Renewable Energy*, pp. 293–313, Jan. 2012, doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00115-3.
- [5] "Historia de la energía solar - Fersan." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://fersansolar.es/blog/historia-de-la-energia-solar/>
- [6] A. C. LazaroIU, M. Gmal Osman, C. V. StrejoIU, and G. LazaroIU, "A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality," *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 16297*, vol. 15, no. 23, p. 16297, Nov. 2023, doi: 10.3390/SU152316297.
- [7] "How crystalline silicon will dominate global energy by 2050- PV Tech." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.pv-tech.org/solars-ascendancy-how-crystalline-silicon-will-dominate-global-energy-by-2050/>
- [8] "Tamaño del mercado de paneles solares más eficientes | CAGR del 11.11 %." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.globalgrowthinsights.com/es/market-reports/most-efficient-solar-panels-market-105934>
- [9] A. O. Ali *et al.*, "Advancements in photovoltaic technology: A comprehensive review of recent advances and future prospects," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 26, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.100952.
- [10] P. Priya and A. A. Stonier, "Emerging innovations in solar photovoltaic (PV) technologies: The perovskite solar cells and more," *Energy Reports*, vol. 14, pp. 216–242, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.egyr.2025.06.003.
- [11] S. Al-Ali, A. G. Olabi, and M. Mahmoud, "A review of solar photovoltaic technologies: developments, challenges, and future perspectives," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 27, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.ecmx.2025.101057.

- [12] P. S. Silveira Camargo, P. A. Petroli, R. Andrade de Souza, F. S. Kerpen, and H. M. Veit, "CdTe photovoltaic technology: An overview of waste generation, recycling, and raw material demand," *Curr Opin Green Sustain Chem*, vol. 47, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.cogsc.2024.100904.
- [13] A. A. Belsky, V. T. Ngyen, M. H. Sheikhi, and V. V. Starshaia, "Analysis of specifications of bifacial photovoltaic panels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 224, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.116092.
- [14] J. Zhong *et al.*, "Development and challenges of bifacial photovoltaic technology and application in buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 187, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113706.
- [15] R. Guerrero-Lemus, R. Vega, T. Kim, A. Kimm, and L. E. Shephard, "Bifacial solar photovoltaics - A technology review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1533–1549, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.041.
- [16] C. Luo, H. Gu, B. Zhang, S. M. Park, M. Wei, and Y. Hou, "Perovskite Tandems: the Next Big Leap in Photovoltaic Technology," *Advanced Materials*, p. e08331, 2025, doi: 10.1002/ADMA.202508331;SUBPAGE:STRING:ABSTRACT;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:15214095;WGROU:STRING:PUBLICATION.
- [17] "34.85%! LONGi Breaks World Record for Crystalline Silicon-Perovskite Tandem Solar Cell Efficiency Again -LONGi." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.longi.com/en/news/silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>
- [18] "Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency?>
- [19] "Utility-Scale PV | Electricity | 2024 | ATB | NREL." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: https://atb.nrel.gov/electricity/2024/utility-scale_pv
- [20] "Best practice guidelines for the use of economic and technical KPIs 2024 PVPS Task 13 Reliability and Performance of Photovoltaic Systems", Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: www.iea-pvps.org
- [21] IRENA, *Renewable power generation costs in 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*. 2024. [Online]. Available: www.irena.org
- [22] "How long do residential solar panels last? – pv magazine International." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2025/08/05/how-long-do-residential-solar-panels-last-3/>
- [23] D. J. Friedman, P. L. Hacke, M. Al-Jassim, S. Ovaitt, and S. Shoemaker, "2024 Photovoltaic Inverter Reliability Workshop Summary Report & Proceedings," 2024. [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.

- [24] REN21, “RENEWABLES 2023 GLOBAL STATUS REPORT,” 2024. Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf
- [25] D. I. Kutsarov, E. Rezaee, J. Lambert, W. T. Stroud, A. Panagiotopoulos, and S. R. P. Silva, “Progress in Flexible Perovskite Solar Cells: Paving the Way for Scalable Manufacturing,” *Adv Mater Technol*, p. 2401834, 2025, doi: 10.1002/ADMT.202401834;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:2365709X;WGROU:STRING:PUBLICATION.
- [26] “A new world record of 33.9% for the efficiency of crystalline silicon-perovskite tandem solar cells - hzgt solar.com.” Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.hzgt solar.com/a-new-world-record-of-339-for-the-efficiency-of-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cells>
- [27] “34.6%! Record-breaker LONGi Once Again Sets a New World Efficiency for Silicon-perovskite Tandem Solar Cells.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.longi.com/en/news/2024-snec-silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>
- [28] “Qcells hits 28.6% efficiency with scalable perovskite-silicon solar cell – pv magazine International.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2024/12/19/qcells-hits-28-6-efficiency-with-scalable-perovskite-silicon-solar-cell/>
- [29] “34.85%! LONGi Breaks World Record for Crystalline Silicon-Perovskite Tandem Solar Cell Efficiency Again -LONGi.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.longi.com/en/news/silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>
- [30] D. Yang, R. Yang, S. Priya, and S. (Frank) Liu, “Recent Advances in Flexible Perovskite Solar Cells: Fabrication and Applications,” *Angew Chem Int Ed Engl*, vol. 58, no. 14, p. 4466, Mar. 2019, doi: 10.1002/ANIE.201809781.
- [31] “Solar PV Global Supply Chains – Analysis - IEA.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- [32] “Oversupply in China Weighs on Prices across the Solar Value Chain - OPIS, A Dow Jones Company.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.opis.com/blog/china-solar-value-chain-price/>
- [33] “China’s solar growth sends module prices plummeting | Wood Mackenzie.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.woodmac.com/blogs/energy-pulse/chinas-solar-growth-sends-module-prices-plummeting/>
- [34] “China solar industry faces shakeout, but rock-bottom prices to persist | Reuters.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available:

<https://www.reuters.com/business/energy/china-solar-industry-faces-shakeout-rock-bottom-prices-persist-2024-04-03/>

- [35] “EE. UU. eleva al 60% los aranceles sobre polisilicio, obleas y células solares de China mientras su capacidad de fabricación de módulos alcanza los 50 GW – pv magazine España.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.es/2025/02/05/ee-uu-eleva-al-60-los-aranceles-sobre-polisilicio-obleas-y-celulas-solares-de-china-mientras-su-capacidad-de-fabricacion-de-modulos-alcanza-los-50-gw/>
- [36] “China’s OPEC-for-solar push risks overreaching | Reuters.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/commentary/breakingviews/chinas-opec-for-solar-push-risks-overreaching-2025-08-14/>
- [37] R. Fu, D. Feldman, and R. Margolis, “U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018,” 2009, Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.
- [38] R. O. Yakubu, L. D. Mensah, D. A. Quansah, and M. S. Adaramola, “A systematic literature review of the bifacial photovoltaic module and its applications,” *The Journal of Engineering*, vol. 2024, no. 8, p. e12421, Aug. 2024, doi: 10.1049/TJE2.12421.
- [39] “Renewables 2023 – Analysis - IEA.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- [40] “Best practice guidelines for the use of economic and technical KPIs 2024 PVPS Task 13 Reliability and Performance of Photovoltaic Systems”, Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: www.iea-pvps.org
- [41] “Active Power Management of Photovoltaic Systems-State of the Art and Technical Solutions 2024 Task 14 PV in the 100% Renewable Energy System”, Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: www.iea-pvps.org
- [42] “COP28 Tripling Renewable Capacity Pledge – Analysis - IEA.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/cop28-tripling-renewable-capacity-pledge>
- [43] “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – Analysis - IEA.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [44] REN21, “RENEWABLES 2024 GLOBAL STATUS REPORT - ECONOMIC AND SOCIAL VALUE CREATION.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr2024_ESVC_Report.pdf
- [45] “El 33% de la nueva potencia que se instaló en Colombia corresponde a energía solar fotovoltaica - Energía Estratégica.” Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: <https://www.energiaestrategica.com/son-datos-correspondientes-al-primer-semestre->

de-este-ano-en-total-ingresaron-al-sistema-interconectado-nacional-sin-76-mw-
ademas-ingresaron-en-operaciones-importantes-lineas-electricas-dentro-d/#

- [46] “Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production: Overview and Performance of Agrivoltaic Systems”, Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: www.iea-pvps.org
- [47] P. Gese, F. Mancilla Martínez-Conde, G. Ramírez-Sagner, and F. Dinter, “Agrivoltaic in Chile-Integrative solution to use efficiently land for food and energy production and generating potential synergy effects shown by a pilot plant in Metropolitan region,” 2019, doi: 10.18086/swc.2019.19.04.
- [48] A. Chalgybayeva, Z. Gabnai, P. Lengyel, A. Pestisha, and A. Bai, “Worldwide Research Trends in Agrivoltaic Systems—A Bibliometric Review,” *Energies* 2023, Vol. 16, Page 611, vol. 16, no. 2, p. 611, Jan. 2023, doi: 10.3390/EN16020611.
- [49] “Primera instalación de investigación agrivoltaica para manzanas en Alemania - Energías.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/452221-Primera-instalacion-de-investigacion-agrivoltaica-para-manzanas-en-Alemania.html>
- [50] G. M. Tina, F. Bontempo Scavo, L. Micheli, and M. Rosa-Clot, “Economic comparison of floating photovoltaic systems with tracking systems and active cooling in a Mediterranean water basin,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 76, p. 101283, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.ESD.2023.101283.
- [51] K. Ilgen, D. Schindler, S. Wieland, and J. Lange, “The impact of floating photovoltaic power plants on lake water temperature and stratification,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, Dec. 2023, doi: 10.1038/S41598-023-34751-2;SUBJMETA=286,4077,639,704,909;KWRD=LIMNOLOGY,RENEWABLE+ENERGY.
- [52] “Technology Collaboration Programme by International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme PVPS Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach,” 2024, Accessed: Aug. 14, 2025. [Online]. Available: www.iea-pvps.org
- [53] “Energía fotovoltaica integrada en edificios – 2030 Palette.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://2030palette.org/energia-fotovoltaica-integrada-en-edificios/?lang=es>
- [54] C. L. Kok, X. Fu, Y. Y. Koh, and T. H. Teo, “A Novel Portable Solar Powered Wireless Charging Device,” *Electronics* 2024, Vol. 13, Page 403, vol. 13, no. 2, p. 403, Jan. 2024, doi: 10.3390/ELECTRONICS13020403.
- [55] “Sistema de energía solar para telecomunicaciones - Conocimiento - DS New Energy.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.dsisolar.com/info/solar-power-system-for-telecommunications-50190523.html>

- [56] J. Holweger, C. Ballif, and N. Wyrsh, "Distributed flexibility as a cost-effective alternative to grid reinforcement," Sep. 2021, Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2109.07305>
- [57] S. Nasirov, A. Ciarreta, C. A. Agostini, and C. Gutiérrez-Hita, "Editorial: Distributed solar PV applications," *Front Energy Res*, vol. 12, p. 1367587, Jan. 2024, doi: 10.3389/FENRG.2024.1367587/BIBTEX.
- [58] A. Goodrich, T. James, and M. Woodhouse, "Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities," 2012, Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [59] "Solar - IEA." Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>
- [60] B. He *et al.*, "Toward a Comprehensive Economic Comparison Framework for Solar Projects: A Case Study of Utility and Residential Scales," *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 10320*, vol. 16, no. 23, p. 10320, Nov. 2024, doi: 10.3390/SU162310320.
- [61] M. A. Al Mamun, P. Dargusch, D. Wadley, N. A. Zulkarnain, and A. A. Aziz, "A review of research on agrivoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112351, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112351.
- [62] G. ; Huang *et al.*, "A Comprehensive Review of Floating Solar Plants and Potentials for Offshore Applications," *Journal of Marine Science and Engineering 2023, Vol. 11, Page 2064*, vol. 11, no. 11, p. 2064, Oct. 2023, doi: 10.3390/JMSE11112064.
- [63] P. Rahdan, E. Zeyen, C. Gallego-Castillo, and M. Victoria, "Distributed photovoltaics provides key benefits for a highly renewable European energy system," *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 138–140, Jul. 2023, doi: 10.1109/PVSC57443.2024.10749694.
- [64] A. O. M. Maka, T. Ghalut, and E. Elsaye, "The pathway towards decarbonisation and net-zero emissions by 2050: The role of solar energy technology," *Green Technologies and Sustainability*, vol. 2, no. 3, p. 100107, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.GRETS.2024.100107.
- [65] "Renewables target for 2030 within reach, IEA says | World Economic Forum." Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.weforum.org/stories/2024/01/energy-transition-renewables-capacity/>
- [66] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Global Renewables Outlook Edition: 2020," *International Renewable Energy Agency*, p. 292, 2020, Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>
- [67] "Snapshot of Global PV Markets 2025 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS", Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: www.iea-pvps.org

- [68] “Renewables 2024 – Analysis - IEA.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>
- [69] I. PVPS Task *et al.*, “End of Life Management of Photovoltaic Panels Trends in PV Module Recycling Technologies,” 2018. Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://iea-pvps.org/key-topics/end-of-life-management-of-photovoltaic-panels-trends-in-pv-module-recycling-technologies-by-task-12/>
- [70] “Electricity Market Report 2023 – Analysis - IEA.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>
- [71] K. Ardani, C. Hunter, C. Johnson, and S. Koebrich, “Maximizing Solar and Transportation Synergies,” 2021, Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.
- [72] CNE, “ERNC REPORTE MENSUAL - FEBRERO 2025”, Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2025/02/RMensual_ERNC_v202502.pdf
- [73] “El sostenido y auspicioso crecimiento de la energía solar en Chile – CENTRA.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://centra.uai.cl/el-sostenido-y-auspicioso-crecimiento-de-la-energia-solar-en-chile/>
- [74] “El desierto de Atacama saca músculo de la mayor radiación solar del planeta | EL PAÍS Chile.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://elpais.com/chile/2024-09-23/el-desierto-de-atacama-saca-musculo-de-la-mayor-radiacion-solar-del-planeta.html>
- [75] E2BIZ INVESTIGACIÓN, “Proyección de la Generación Distribuida en los sectores residencial, comercial e industrial en Chile.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/e2biz-2021_proyeccion_de_generacion_distribuida.pdf
- [76] “Como funciona la ley NetBilling - Tritec Intervento.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://tritec-intervento.cl/como-funciona-la-ley-netbilling/>
- [77] J. C. Osorio-Aravena, E. Muñoz-Cerón, J. Aguilera, J. de la Casa, and L. Reyes-Chamorro, “Enablers, trends, opportunities and scenarios for solar photovoltaic prosumers in Chile,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 58, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.esr.2025.101693.
- [78] “Vertimientos de energías renovables alcanzaron récord en 2024 Revista Nueva Minería & Energía.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.nuevamineria.com/revista/vertimientos-de-energias-renovables-alcanzaron-record-en-2024/>
- [79] “La Generación Distribuida: Un Impulso Energético en Chile - EMAT Chile.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://ematchile.com/la-generacion-distribuida-un-impulso-energetico-en-chile/>

- [80] “Vertimiento renovable: el 23,1% de la energía solar y eólica fue reducida en enero por congestión en la red - Reporte Minero | El portal de minería en Chile.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2025/03/vertimiento-energia-renovable-enero-2025>
- [81] “Home - Programa Casa Solar.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.casasolar.cl/>
- [82] CNE, “ERNC REPORTE MENSUAL - ENERO 2025”, Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2025/01/RMensual_ERNC_v202501.pdf
- [83] “Energía solar ya representa el 40% de las ERNC en Chile y podría cuadruplicar su capacidad instalada al 2030 - Reporte Minero | El portal de minería en Chile.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2025/05/energia-solar-chile-2025-crecimiento-proyecciones-2030>
- [84] “Plan de Descarbonización | Ministerio de Energía.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://energia.gob.cl/panel/plan-de-descarbonizacion>
- [85] Gobierno de Chile, “Plan de Acción de Hidrógeno Verde.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.planhidrogenoverde.cl/>
- [86] “‘Permisología’ asociada a los proyectos de inversión,” 2023, Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio%2F10221%2F35549%2F1%2FInforme_BCN_aspectos_regulatorios_para_la_inversio__n_FINAL.pdf
- [87] “Los desafíos de la fotovoltaica y la energía eólica en Chile | REVE Actualidad del sector eólico en España y en el mundo.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://reve.aeeolica.org/2024/08/10/los-desafios-de-la-fotovoltaica-y-la-energia-eolica-en-chile/>
- [88] “La preocupante capacidad de Chile para desperdiciar energía.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.energynews.es/la-preocupante-capacidad-de-chile-para-desperdiciar-energia/>
- [89] “La retrasada línea de transmisión que podría evitar cortes.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.ex-ante.cl/kimal-lo-aguirre-la-retrasada-linea-de-transmision-que-podria-evitar-los-efectos-de-un-corte-masivo-de-luz-y-la-permisologia-que-enfrenta/>
- [90] “Trámites de proyectos de inversión están demorando 1433 días.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.ex-ante.cl/permisologia-estudios-de-impacto-ambiental-de-proyectos-de-inversion-estan-demorando-en-promedio-1-433-dias-4-anos/>

- [91] “Vertimiento de energía: el nudo que Chile necesita desatar.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://climatetrackerlatam.org/historias/vertimiento-de-energia-el-nudo-que-chile-necesita-desatar/>
- [92] “Diario Financiero: Industria renovable plantea fórmula para destrabar la tramitación de proyectos - ACERA A.G. - Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.acera.cl/industria-renovable-plantea-formula-para-destrabar-la-tramitacion-de-proyectos/>
- [93] S. Santiago, “El futuro de la distribución de energía eléctrica,” 2016.
- [94] “Comunidades energéticas, una forma de resistir como consumidores | América Futura | EL PAÍS América.” Accessed: Aug. 17, 2025. [Online]. Available: <https://elpais.com/america-futura/2023-11-26/comunidades-energeticas-una-forma-de-resistir-como-consumidores.html>