



# Observatorio de Transición Justa de Asturias



Principado de  
**Asturias**



**FAEN**

Fundación Asturiana  
de la Energía

## Fotovoltaica: Tendencias industriales y necesidades.



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	EVOLUCIÓN RECIENTE DE COSTES Y RENDIMIENTO.....	5
1.1.1	FACTORES DE COSTE EN LA FABRICACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	6
1.1.2	LA CURVA DE APRENDIZAJE EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN.....	9
1.1.3	¿QUÉ ENTENDEMOS POR “FOTOVOLTAICA DE NUEVA GENERACIÓN”?.....	10
2.	MEJORA DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA CONVENCIONAL.....	11
2.1	EVOLUCIÓN DE LAS CÉLULAS: PERC, TOPCON, HJT, IBC.....	11
2.1.1	PERC.....	11
2.1.2	TOPCon.....	12
2.1.3	HJT.....	13
2.1.4	IBC.....	13
2.1.5	RESUMEN COMPARATIVO.....	14
2.2	AUMENTO DE EFICIENCIAS Y REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN LA FABRICACIÓN DE MÓDULOS.....	14
2.3	MÓDULOS BIFACIALES Y OPTIMIZACIÓN DE LA CAPTACIÓN DEL ALBEDO.....	17
2.4	REDUCCIÓN DE DEGRADACIÓN (LID, PID) Y MAYOR VIDA ÚTIL.....	19
2.5	OPTIMIZACIÓN DE FABRICACIÓN: REDUCCIÓN DE PLATA, OBLEAS MÁS FINAS, AUTOMATIZACIÓN.....	20
2.5.1	REDUCCIÓN DEL USO DE PLATA.....	20
2.5.2	OBLEAS MÁS FINAS.....	21
2.5.3	AUTOMATIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN INDUSTRIAL.....	22
2.5.4	IMPACTO ESTRATÉGICO.....	22
2.6	CÉLULAS TÁNDEM: EL SALTO EN EFICIENCIA.....	23
2.6.1	CONCEPTO Y FUNDAMENTOS FÍSICOS.....	23
2.6.2	SILICIO + PEROVSKITA (ESTADO ACTUAL Y RETOS).....	23
2.7	NUEVOS MATERIALES Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES.....	24
2.7.1	PEROVSKITAS PURAS.....	24
2.7.2	FOTOVOLTAICA ORGÁNICA.....	24
2.7.3	TINTES FOTOVOLTAICOS.....	25
2.7.4	CÉLULAS DE PUNTOS CUÁNTICOS.....	25



2.7.5	CIGS y tecnologías de capa fina avanzadas. ....	26
3.	INNOVACIONES EN DISEÑO Y APLICACIONES .....	26
3.1	FOTOVOLTAICA INTEGRADA EN EDIFICIOS (BIPV). ....	26
3.2	AGROVOLTAICA Y SINERGIAS SUELO-ENERGÍA.....	27
3.3	FOTOVOLTAICA FLOTANTE.....	28
3.4	INTEGRACIÓN EN INFRAESTRUCTURAS (CARRETERAS, MOBILIARIO URBANO).....	29
4.	DIGITALIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO. ....	30
4.1	ELECTRÓNICA DE POTENCIA AVANZADA (MICROINVERSORES, OPTIMIZADORES)....	30
4.2	MONITORIZACIÓN INTELIGENTE Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO. ....	32
4.3	INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA A LA OPERACIÓN. ....	33
4.4	INTEGRACIÓN CON ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE LA DEMANDA. ....	34
5.	SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR EN MÓDULOS. ....	34
5.1	REDUCCIÓN DE MATERIALES CRÍTICOS Y ESTRATÉGICOS.....	34
5.2	HUELLA DE CARBONO DEL MÓDULO. ....	36
5.3	RECICLAJE Y RECUPERACIÓN DE MATERIALES. ....	37
5.4	ECODISEÑO Y NUEVAS NORMATIVAS EUROPEAS.....	38
6.	IMPACTO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO.....	39
6.1	MAYOR DENSIDAD ENERGÉTICA POR SUPERFICIE.....	40
6.2	FLEXIBILIDAD, ALMACENAMIENTO E HIBRIDACIÓN. ....	41
6.2.1	IMPACTO TÉCNICO. ....	41
6.2.2	IMPACTO ECONÓMICO. ....	42
6.2.3	IMPACTO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO.....	43
6.2.4	IMPLICACIONES REGULATORIAS.....	43
6.3	REDES INTELIGENTES Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA. ....	43
6.3.1	IMPACTO TÉCNICO. ....	43
6.3.2	IMPACTO ECONÓMICO. ....	44
6.3.3	IMPACTO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO.....	44
7.	CONCLUSIONES DE APLICACIÓN PARA ASTURIAS.....	45
7.1	CLAVES ESTRATÉGICAS PARA LA REGIÓN. ....	46



## 1. INTRODUCCIÓN.

El objetivo de este informe es analizar las principales líneas de desarrollo de la fotovoltaica de nueva generación con una perspectiva aplicada: identificar qué mejoras son previsibles en el corto y medio plazo, qué tecnologías presentan mayor madurez para su implantación y qué retos técnicos, regulatorios y de mercado deben considerarse. No se trata únicamente de describir avances tecnológicos, sino de evaluar su potencial impacto real en el sistema energético y energético regional.

La reducción acelerada de costes, la mejora continua de rendimientos y su carácter modular y distribuido han convertido a la fotovoltaica en un pilar fundamental de la transición energética, tanto para el desarrollo de grandes plantas industriales como para el impulso de las comunidades energéticas. Sin embargo, el sector se encuentra en una nueva fase de evolución tecnológica que va más allá del despliegue masivo de los sistemas convencionales basados en silicio cristalino. En los próximos años veremos la implantación progresiva de tecnologías fotovoltaicas de nueva generación que permitirán aumentar la eficiencia de conversión, reducir el uso de materiales críticos, ampliar las aplicaciones posibles y mejorar la integración en el entorno urbano, industrial y rural. Desde células avanzadas como TOPCon o HJT hasta configuraciones tándem con perovskitas, pasando por soluciones bifaciales, flotantes o integradas en edificios, la innovación tecnológica abre oportunidades relevantes tanto desde el punto de vista energético como económico.

Para Asturias, este análisis resulta especialmente relevante, tanto por lo que se pueda hacer en la región como por lo que otros territorios pueden desarrollar y mejorar la competitividad frente a nuestra economía. El impulso al autoconsumo, el desarrollo de comunidades energéticas y la electrificación de la demanda requieren tecnologías eficientes, competitivas y adaptables a un territorio con características climáticas, orográficas e industriales especiales, donde el recurso existente puede aportar mejoras de competitividad en el suministro energético. La mejora de la eficiencia por unidad de superficie, la posibilidad de integrar generación en cubiertas industriales y residenciales, el desarrollo de soluciones compatibles con el sector agroganadero (agrovoltaica) o la valorización de espacios industriales en transición pueden modificar decisiones de inversión en fotovoltaica y energía a lo largo de los próximos años, afectando a la competitividad de la economía regional.

Anticipar las tendencias tecnológicas y comprender sus implicaciones permitirá a administraciones públicas, empresas y ciudadanía tomar decisiones informadas, optimizar inversiones y diseñar políticas energéticas coherentes con los objetivos de neutralidad climática, competitividad económica y cohesión territorial.

## 1.1 EVOLUCIÓN RECIENTE DE COSTES Y RENDIMIENTO.

La industria fotovoltaica se mueve en un equilibrio entre presión sobre precios finales en el mercado y costes de producción que han alcanzado una estabilidad fruto de la madurez de producción. El resultado es una cadena de valor competitiva y un fuerte impacto de las economías de escala en los precios finales.

Entre los factores que influyen en los costes de fabricación están:

- Economías de escala y geografía industrial. La producción masiva en regiones con cadenas de suministro integradas, especialmente en Asia, ha permitido bajar los costes de fabricación de módulos hasta niveles muy competitivos. Datos recientes muestran que la producción de módulos TOPCon en fábricas integradas a gran escala podría llegar a estar por debajo de 0,20 US\$/W en China frente a Europa o USA debido a mayores costes laborales y energéticos.
- Composición del coste. Aunque históricamente el polisilicio representaba el componente dominante, la mejora tecnológica ha desplazado parte de la carga a otros materiales y procesos. Componentes como el vidrio y los marcos de aluminio ahora representan fracciones significativas del coste total de producción, y el precio de la plata (utilizada en metalización) sigue siendo un elemento volátil.
- Efecto de la tecnología de célula. PERC sigue siendo rentable por su madurez, aunque está perdiendo cuota frente a tecnologías de tipo N. Como consecuencia, TOPCon representa un punto de equilibrio técnico-económico: su eficiencia superior justifica un ligero aumento de coste. HJT y otras tecnologías más avanzadas requieren inversiones de capital mayores por equipos y proceso (vacío, PECVD), lo que eleva el coste unitario por W.
- Procesos de fabricación y eficiencia. El tamaño de oblea (por ejemplo, 210 mm frente a 182 mm) influye directamente en el coste por Wp, porque permite utilizar más silicio por oblea pero reduce el coste específico por potencia generada.
- Mercado y regulación. Factores como la eliminación de subvenciones a la exportación en China o tensiones arancelarias influyen en el precio final de mercado de módulos en Europa y otras regiones, afectando a la valoración de coste de fabricación.

Categoría	Valor representativo
Coste de fabricación TOPCon (Asia)	0,16–0,19 \$/Wp
Coste de fabricación TOPCon (Europa)	0,24–0,30 \$/Wp
Coste aproximado módulos mercado spot (Europa, enero 2026)	0,10–0,13 €/Wp
Eficiencia PERC (comercial)	20–22%
Eficiencia TOPCon (comercial)	22–24%
Eficiencia HJT (comercial)	23–25%
Eficiencia Back Contact/IBC (comercial)	22–24%
Eficiencia de módulos bifaciales <sup>1</sup>	+5–30

<sup>1</sup> Rendimiento extra dependiente de albedo/ubicación

Tabla 1. Factores de coste y rendimiento según tecnologías de módulos (2026).

Esto repercute directamente en el LCOE<sup>2</sup>, al integrar todos los costes relevantes a lo largo de la vida útil de una instalación (inversión inicial, operación y mantenimiento, financiación y producción esperada), mientras que este valor del LCOE determina la viabilidad de proyectos y la demanda de módulos, que influye sobre la cadena de valor industrial asociada. Hemos de tener en consideración que:

- El LCOE de la fotovoltaica ha caído aproximadamente un 90 % desde 2010, impulsado por la caída de costes de módulos y la mayor eficiencia de los sistemas.
- El LCOE es significativamente menor en regiones con alta irradiación solar, menor coste de terreno y menores costes de conexión.
- Se espera que el LCOE siga disminuyendo hacia 2030, con estimaciones que apuntan a reducciones adicionales significativas debido a mejoras tecnológicas, mayores eficiencias y menores costes de financiación.
- El LCOE combinado (generación y almacenamiento) es actualmente mayor debido al coste de las baterías; sin embargo, la integración inteligente y las reducciones de costes esperadas en almacenamiento acercan a este tipo de sistemas a niveles competitivos, especialmente cuando se valoran otros componentes de precio adicionales al de la energía.

Configuración / Región	LCOE típico (€/MWh)	Notas
Solar fotovoltaica global (utilidad)	40 €/MWh	Promedio global según IRENA (2023)
Solar fotovoltaica con seguimiento un eje	55,5 €/MWh	Estimación WoodMac 2024 para UE
Rango global amplio fotovoltaica fija	26 – 108 €/MWh	WoodMac, según ubicación y condiciones (ewind.aeolica.org)
Solar + almacenamiento	60 – 225 €/MWh	Según estimaciones de sistemas híbridos globales (ewind.aeolica.org)
Pequeñas instalaciones residenciales	142 €/MWh	Datos de benchmark EE. UU. para PV doméstica (The Department of Energy's; Energy.gov)

Tabla 2. LCOE típico para algunas configuraciones de plantas fotovoltaicas.

### 1.1.1 FACTORES DE COSTE EN LA FABRICACIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Los costes de fabricación de un módulo fotovoltaico se concentran en las materias primas (vidrio, células, polímeros, aluminio), pero energía, agua, logística y personal condicionan fuertemente el coste final por vatio. Analicemos el proceso en su conjunto.

<sup>2</sup> El Coste Nivelado de Energía (LCOE, por sus siglas en inglés) es el valor presente neto del coste unitario de la electricidad generada por una planta durante su vida útil. Representa el precio promedio al que debe venderse la energía para cubrir los costes de construcción, operación, mantenimiento y combustible, siendo fundamental para comparar la competitividad de diferentes tecnologías energéticas



- En una planta típica de módulos de silicio cristalino, las materias primas son la partida dominante del coste directo: diferentes fuentes sitúan los materiales entre el 60-70 % del coste de fabricación del módulo terminado (supera el 90 % del coste operativo de la línea cuando la inversión en maquinaria ya está amortizada). Los elementos clave son las células de silicio (o la lámina de célula si se compra ya procesada), el vidrio templado frontal, el marco de aluminio, los encapsulantes poliméricos (EVA o POE) y el backsheet (si no es un diseño vidrio-vidrio).
- En peso, el vidrio representa alrededor del 70-76 % del módulo, seguido de los polímeros ( $\approx 10-11$  %), el aluminio (8-13 %) y el silicio de las células (3-5 %), mientras que el cobre y la plata suponen solo alrededor del 1 % y menos del 0,1 % del peso, respectivamente. Esto implica que fluctuaciones en el precio del vidrio, del aluminio o del silicio impactan mucho el coste total, mientras que la plata, por su importancia estratégica, afecta también al coste por vatio.
- Los costes de energía tienen dos niveles: por un lado, la electricidad y el gas consumidos en la propia línea de módulos (horno de laminación, climatización, maquinaria), y por otro, la energía incorporada en las materias primas, sobre todo en el silicio solar y el aluminio, cuya producción es muy intensiva en energía. En plantas de ensamblaje de módulos, el coste directo de energía suele ser una fracción moderada del coste operativo, pero si la electricidad es cara, penaliza tanto los consumos internos como el precio de materias como el vidrio, el aluminio y el silicio. Además, la huella energética del silicio y de los procesos térmicos de la cadena (producción de lingotes, obleas, células, laminación) es uno de los factores principales de la huella de carbono del módulo.
- El consumo de agua se concentra sobre todo en la fase de fabricación de células (limpiezas químicas, procesos húmedos) y en menor medida en lavado de vidrio y sistemas de refrigeración de equipos. En regiones con estrés hídrico o costes crecientes de tratamiento, el agua se vuelve un vector de coste y de riesgo.
- Los costes de personal incluyen los de costes de operaciones de fabricación, técnicos de mantenimiento, calidad, logística interna y personal de ingeniería y administración. En plantas relativamente automatizadas, la mano de obra puede representar del orden de un 20-30 % de los costes operativos (no materiales), pero bastante menos del coste total por vatio cuando se incluyen materias primas. La localización geográfica y el nivel de automatización son determinantes, debiendo analizarse que plantas intensivas en mano de obra son más sensibles al aumento de salarios.
- La logística aparece como coste en dos capítulos: la entrada de materiales (vidrio, marcos, células, cajas) y la salida de módulos hacia distribuidores o proyectos. Por volumen y fragilidad, el vidrio y los módulos terminados encarecen el transporte; por valor, las células y la electrónica asociada (si se integran optimizadores) concentran el riesgo de roturas o pérdidas. Además, retrasos logísticos y fluctuaciones en fletes marítimos pueden impactar puntualmente el coste de materiales importados, como se vio en los años de tensión en cadenas globales de suministro.
- A estos bloques se suman otros costes indirectos: amortización de maquinaria y edificio, mantenimiento, consumibles (productos químicos, gases, detergentes),



certificaciones, seguros y gastos generales. En plantas nuevas, la amortización del CAPEX puede pesar mucho en los primeros años, mientras que en plantas maduras el peso relativo de CAPEX baja y lo que domina es el coste de materiales y operación eficiente.

Los rangos siguientes son orientativos para un módulo de silicio cristalino producido en una planta moderna, con valores expresados como porcentaje del coste de fabricación del módulo (sin incluir márgenes comerciales ni instalación):

Bloque de coste / recurso	Elementos incluidos principales	Peso típico en coste de fabricación del módulo	Comentario sobre sensibilidad
Materias primas estructurales	Vidrio templado, marco de aluminio, encapsulantes EVA/POE, backsheet o vidrio trasero	30-40 %	Muy sensibles a precios de vidrio y aluminio; el diseño vidrio-vidrio puede reducir aluminio pero subir vidrio.
Materias primas funcionales	Células de silicio, ribbons y cables de cobre, pastas de plata, conectores y cajas de unión	30-35 %	Las células y el silicio pueden representar 20-30 % del coste total del panel; volatilidad alta en silicio
Otros materiales y consumibles	Adhesivos, sellantes, etiquetas, embalaje, químicos de limpieza, gases	5-10 %	Suben con requisitos de calidad y certificación; relativamente menos sensibles que vidrio/silicio.
Energía (electricidad, gas, climatización)	Consumos de línea de laminación, hornos, compresores, HVAC, iluminación	3-7 % (ensamblaje módulo; más si integra células)	Depende fuertemente del precio local de electricidad y gas; impacta también en el coste de materias intensivas en consumo de energía.
Agua (proceso y servicios auxiliares)	Agua de proceso, refrigeración, tratamiento de efluentes	<1-2 % del coste directo en módulo	Más relevante por huella hídrica y regulación que por coste monetario, salvo en zonas de agua muy cara.
Logística y embalaje	Transporte de materias primas a planta, embalaje de módulos, envío a clientes	3-8 %	Muy sensible a costes de combustible, fletes y distancia a proveedores/mercados.
Personal (operación y soporte directo)	Operarios, técnicos de mantenimiento, calidad, logística interna	10-20 % del coste de fabricación solar	Depende de salarios locales y automatización; mejora de productividad reduce su peso relativo.
Costes generales y amortización	Amortización de equipos, edificio, seguros,	10-20 %	Alto al inicio de la planta, decreciente por unidad a medida que sube el volumen producido.



Bloque de coste / recurso	Elementos incluidos principales	Peso típico en coste de fabricación del módulo	Comentario sobre sensibilidad
	certificaciones, administración, I+D		

Tabla 3. Rangos orientativos de coste de algunos factores de producción de módulos fotovoltaicos.

### 1.1.2 LA CURVA DE APRENDIZAJE EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN.

Los estudios sitúan la tasa de aprendizaje<sup>3</sup> de módulos de silicio cristalino en torno al 20-24 %. Es decir, al duplicar la producción el coste se ha reducido en ese porcentaje. Ese descenso no se debe solo a “aprender a fabricar”, sino a varios factores: plantas más grandes, mejores rendimientos de proceso, aumento de eficiencia de las células, abaratamiento del silicio y mejor gestión de materiales y logística. La experiencia muestra que, una vez alcanzados volúmenes altos y tecnologías relativamente maduras, la curva puede aplanarse si no hay saltos tecnológicos (por ejemplo, pasar de PERC a TOPCon o HJT).

Para Asturias esto también tiene implicaciones, de cara a orientar una futura capacidad de producción industrial. Se parte de una desventaja frente a Asia, puesto que el coste actual de fabricar módulos en Europa se sitúa por encima del coste en China por la combinación de CAPEX más caro, energía, mano de obra y materiales más caros. Algunos informes estiman un sobre coste de varios céntimos de euro, atribuibles a equipos (+40 %), edificios (+110 %), mano de obra (+280 %) y materiales (+50 %).

Sin embargo, existe un potencial de reducción de costes a medida que se escala y madura, ganando en competitividad. Si las fábricas europeas alcanzaran capacidades de producción unitarias de 3-5 GW anuales y acumulan experiencia, podrían reducir la brecha de coste con la fabricación de China a menos del 10 %, pero para ello debe contarse con un entorno industrial.

En este entorno de mejora los proveedores también jugarán un papel clave: proveedores de vidrio, marcos, electrónica y logística en el entorno también deberán afrontar su propia curva, reduciendo costes y mejorando calidad con el tiempo.

Para la región serán claves factores como:

- Tamaño y carga de trabajo de la fábrica. Cuanto antes se alcance un volumen alto (GW/año) y una utilización elevada de la capacidad, más rápido se recorre la curva y se diluyen costes fijos y fallos de arranque.
- Elección tecnológica y flexibilidad. Arrancar ya en tecnologías alineadas con el “estado del arte” (p.ej. TOPCon, HJT, bifacial, vidrio-vidrio) evita tener que amortizar equipos

<sup>3</sup> En fabricación fotovoltaica, la “curva de aprendizaje” significa que cada vez que se duplica la producción acumulada, el coste por vatio baja un porcentaje más o menos constante gracias a experiencia, escala y mejoras tecnológicas.



que queden obsoletos rápidamente y permite capturar parte de la curva de aprendizaje asociada a las nuevas arquitecturas.

- Energía y logística. La intensidad energética de la producción del silicio, del vidrio y del aluminio significa que el coste de electricidad en Asturias y la posibilidad de contratos a largo plazo con renovables influyen directamente en la pendiente de la curva local. La proximidad a puertos y a clientes europeos reduce costes logísticos y tiempos de entrega, lo que mejora la competitividad pese a arrancar con costes unitarios más altos.
- Capital humano y ecosistema. La formación de personal especializado, la estabilidad de los equipos y la interacción con centros tecnológicos determinan la velocidad del “learning by doing”: menos rechazos, menos paradas, mejor OEE<sup>4</sup> y, por tanto, caída más rápida del coste por vatio.

### 1.1.3 ¿QUÉ ENTENDEMOS POR “FOTOVOLTAICA DE NUEVA GENERACIÓN”?

Se engloban para este texto con esta denominación un conjunto de tecnologías que se caracterizan por varias tendencias comunes:

- mayores eficiencias (módulos comerciales acercándose al 24-25 % y células tándem en laboratorio por encima del 30 %),
- formatos de panel más potentes (700-750 W en el mercado) y
- una clara orientación a aplicaciones específicas, como integración arquitectónica, espacios limitados o grandes plantas con seguidores e inteligencia artificial.

Además, se integran cada vez más con sistemas de seguimiento, almacenamiento y gestión digital (IA, gemelos digitales, mantenimiento predictivo), de manera que el “módulo” pasa a entenderse como parte de un sistema inteligente más amplio.

Analizar esta fotovoltaica de nueva generación desde Asturias tiene pleno sentido a raíz de los anuncios industriales recientes: la futura planta de obleas y lingotes de silicio y la fábrica de ensamblaje de módulos posicionan a la región dentro de la cadena de valor europea precisamente en los eslabones donde se va a materializar este cambio tecnológico. No se trata solo de producir paneles convencionales, sino de preguntarse qué tipos de células y formatos de módulo podrán fabricar estas plantas a medio plazo: cómo prepararse para integrar células TOPCon o HJT, para suministrar vidrio-vidrio bifacial, para adaptarse a BIPV o incluso para servir de base a futuras líneas tándem perovskita-silicio.

Desde la perspectiva regional, la fotovoltaica de nueva generación es relevante por tres motivos principales:

- Primero, porque fija el nivel tecnológico de los empleos industriales que se crearán: no es lo mismo ensamblar productos maduros y de bajo margen que participar en la fabricación de módulos de alta eficiencia y valor añadido.

---

<sup>4</sup> Overall Equipment Effectiveness, en español “Eficacia Global de los Equipos” o “Efectividad Global del Equipo”. mide qué porcentaje del tiempo de producción planificado es realmente productivo.



- Segundo, porque condiciona qué empresas auxiliares pueden desarrollarse en Asturias (vidrio técnico, marcos especiales, electrónica de potencia, soluciones BIPV, robótica de mantenimiento), conectando la nueva industria solar con sectores ya existentes.
- Y tercero, porque la elección de tecnologías influye directamente en huella de carbono, uso de materiales críticos y resiliencia de la cadena de suministro, aspectos que son centrales en cualquier estrategia de reindustrialización verde en Europa.

## 2. MEJORA DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA CONVENCIONAL.

Las soluciones de “nueva generación” son soluciones que ya están en mercado y marcarán el estándar en los próximos años. En general se trata de mejoras tecnológicas que permiten más potencia en la misma superficie, factor clave en cubiertas industriales o residenciales. Aportan mejor rendimiento con radiación difusa y temperaturas variables; aumentan la producción anual sin necesidad de más superficie ocupada y reducen el coste nivelado de energía (LCOE). Veamos en qué se basan y sus principales características.

### 2.1 EVOLUCIÓN DE LAS CÉLULAS: PERC, TOPCON, HJT, IBC.

#### 2.1.1 PERC.

PERC significa *Passivated Emitter and Rear Cell* (célula con emisor y parte trasera pasivados). Ha sido la tecnología dominante en la última década y representa la evolución directa de la célula estándar de silicio cristalino (Al-BSF). La mejora clave respecto a la célula convencional es la incorporación de una capa de pasivación dieléctrica en la parte posterior de la célula.

Esta estructura:

- Reduce la recombinación de electrones.
- Refleja parte de la luz no absorbida hacia el interior del silicio (mejor aprovechamiento).
- Mejora la eficiencia sin modificar radicalmente la arquitectura básica.

La eficiencia se sitúa en el 21–22%, aunque teóricamente podría llegar al 23% como máximo.

Entre sus ventajas están:

- Tecnología muy madura y optimizada.
- Coste de fabricación bajo.
- Altísima fiabilidad y conocimiento operativo.
- Compatible con líneas industriales ya amortizadas.

Entre las limitaciones de la tecnología están:

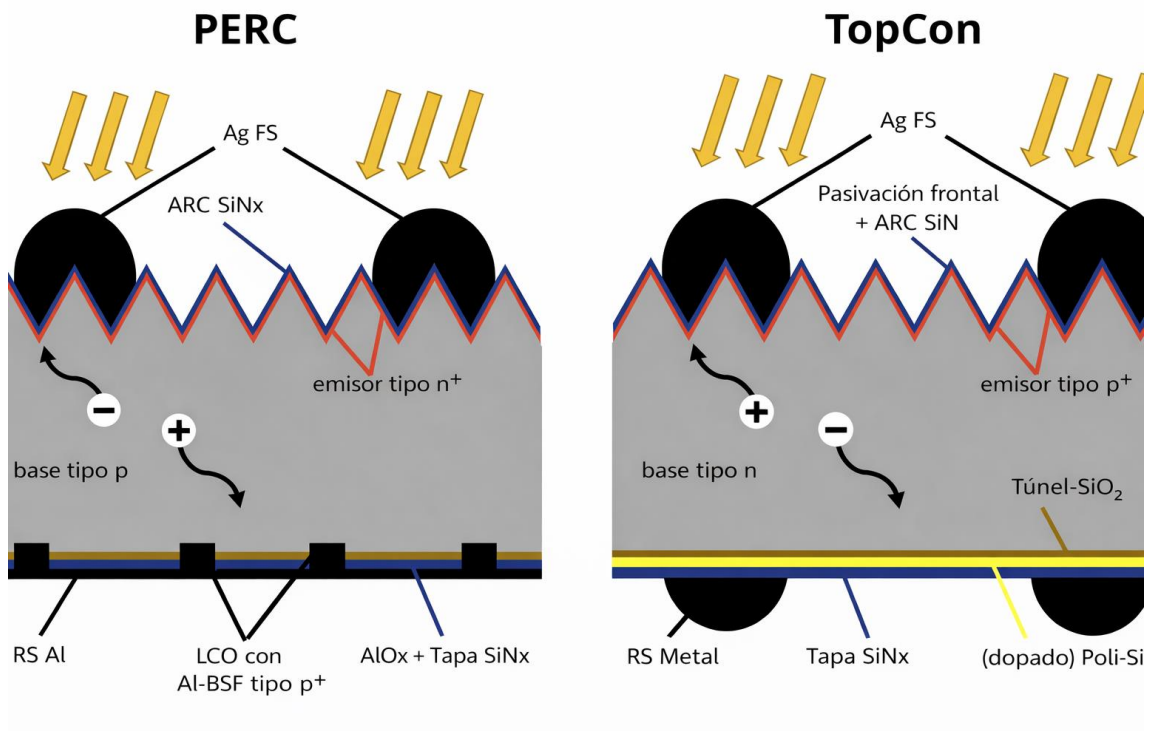
- Mayor degradación inducida por luz y temperatura.



- Mayor sensibilidad a altas temperaturas que otras tecnologías.
- Eficiencia cercana al límite tecnológico.

### 2.1.2 TOPCON.

El significado del acrónimo es *Tunnel Oxide Passivated Contact* (contacto pasivado por óxido túnel). Introduce una capa ultrafina de óxido de silicio y una capa adicional de silicio dopado en la parte posterior de la célula.



Comparativa de tecnologías PERC – TopCon<sup>5</sup>.

Esta estructura:

- Reduce la recombinación de electrones (menos pérdidas).
- Mejora la pasivación de la superficie.
- Aumenta la tensión de circuito abierto.
- Permite mayores eficiencias.

La eficiencia que alcanza esta tecnología está en un 22,5–23,5% en célula, y su potencial comercial llegará en breve a 24% o más.

Las principales ventajas son:

- Alta eficiencia.

<sup>5</sup> Fuente: <https://eco-greenenergy.com/es/descubriendo-la-futura-tecnologia-de-celdas-solares-topcon-2-2/>



- Buena compatibilidad con procesos industriales existentes.
- Mejor comportamiento térmico que PERC.
- Baja degradación.
- Situación de mercado

Es actualmente una de las tecnologías con mayor crecimiento industrial a nivel mundial y está sustituyendo progresivamente a PERC en nuevas fábricas.

### 2.1.3 HJT.

HJT significa *Heterojunction Technology* (tecnología de heterounión).

Combina un sustrato de silicio cristalino y capas muy finas de silicio amorfo depositadas en ambas caras. La “heterounión” se produce entre materiales con distinta estructura cristalina, lo que mejora el comportamiento eléctrico de la interfaz.

Con esta tecnología se consigue:

- Una pasivación excelente.
- Muy baja recombinación.
- Alta tensión de salida.
- Mejor rendimiento con altas temperaturas.

Se alcanza una eficiencia de entre el 23–24%, con expectativas de alcanzar el 25% en próximos años.

Como principales ventajas ofrece:

- Mayor eficiencia que PERC.
- Mejor coeficiente de temperatura (interesante en instalaciones expuestas a calor).
- Muy buena compatibilidad con diseño bifacial.

Aunque presenta también algunos inconvenientes que será necesario minimizar o eliminar:

- Procesos de fabricación más costosos.
- Mayor consumo de materias primas (plata).
- Requiere procesos industriales nuevos y más específicos.

### 2.1.4 IBC.

IBC significa *Interdigitated Back Contact* (contacto posterior interdigitado). Es una tecnología conceptualmente distinta. Mientras en una célula convencional (PERC, TOPCon), los contactos metálicos están parcialmente en la cara frontal, lo que genera pequeñas sombras, en una célula IBC los contactos eléctricos están situados en la parte trasera. Los contactos traseros se entrelazan, alternando polos positivo y negativo.

Esta tecnología consigue:

- Mayor captación de luz.
- Menores pérdidas resistivas.
- Mayor eficiencia potencial.
- Mejor comportamiento en baja irradiación.

La eficiencia alcanza el 22–24%, con límites en laboratorio del 26%. Es una de las arquitecturas más eficientes en silicio cristalino.

Como ventajas ofrece:

- Máxima eficiencia dentro del silicio convencional.
- Estética superior (interesante para BIPV).
- Mejor rendimiento con baja irradiación.
- Alta durabilidad.

Sin embargo, tiene algunos inconvenientes:

- Proceso de fabricación complejo.
- Mayor coste industrial.
- Menor implantación masiva frente a alternativas como la tecnología TOPCon.

### 2.1.5 RESUMEN COMPARATIVO.

A continuación, y a modo de resumen, se realiza una comparativas de las características por tecnología, junto con una valoración del coste y tendencias de aplicaciones en mercados en el futuro.

Tecnología	Nivel de madurez	Eficiencia	Coste actual	Tendencia
PERC	Muy madura	21–22%	Bajo	Sustitución progresiva por otras tecnologías
TOPCon	Alta	22,5–24%	Medio	Expansión rápida
HJT	Media–alta	23–25%	Medio–alto	Crecimiento progresivo
IBC	Alto	22-24%	Medio-alto	Expansión en el segmento premium de instalaciones

Tabla 4. Resumen comparativo de características de las tecnologías fotovoltaicas.

## 2.2 AUMENTO DE EFICIENCIAS Y REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN LA FABRICACIÓN DE MÓDULOS.

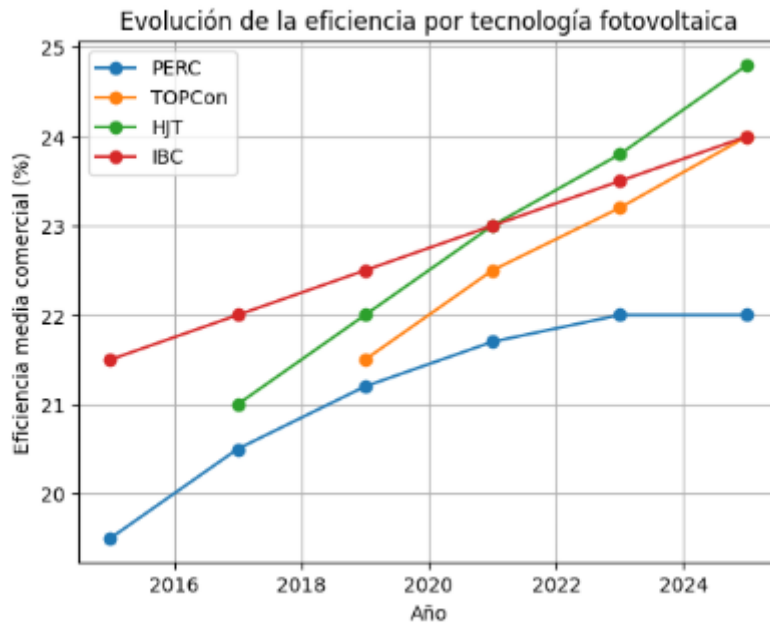
La mejora progresiva de la eficiencia y la reducción de pérdidas responden a la combinación de varios factores tecnológicos e industriales. Entre ellos está la mejora en la pasivación de superficies internas de las células solares, que ha reducido de forma significativa la

recombinación de portadores, incrementando la tensión de circuito abierto y, por tanto, la eficiencia global. Es decir, se pierde menos energía en el proceso de generación eléctrica al reducir la cantidad de carga eléctrica que se “desaprovecha” dentro del propio material. Como resultado, aumenta la capacidad de la célula para generar electricidad y, en conjunto, mejora su rendimiento.

Otro factor de mejora es la transición hacia silicio tipo n, que ha disminuido la sensibilidad a degradaciones iniciales y ha mejorado la estabilidad a largo plazo. Es decir, pierden menos rendimiento al principio y lo mantienen mejor a lo largo de los años. Esto es así porque en el silicio tipo n se incorporan átomos (normalmente fósforo) que aportan electrones adicionales. Esto hace que el material tenga más cargas negativas disponibles para moverse cuando recibe luz solar. Esos electrones son precisamente los que se transforman en corriente eléctrica al moverse.

También es elemento clave en esta mejora de eficiencia la optimización de contactos eléctricos, reduciendo resistencias internas. En tecnologías como IBC, la propia configuración de la célula elimina el sombreado frontal y mejora el aprovechamiento óptico; en TOPCon y HJT, la mejora de interfaces y capas ultrafinas permite extraer más corriente útil con menores pérdidas energéticas. Además, el perfeccionamiento de los procesos de fabricación —control de impurezas, uniformidad de capas, tratamientos térmicos optimizados— ha reducido fenómenos de degradación temprana.

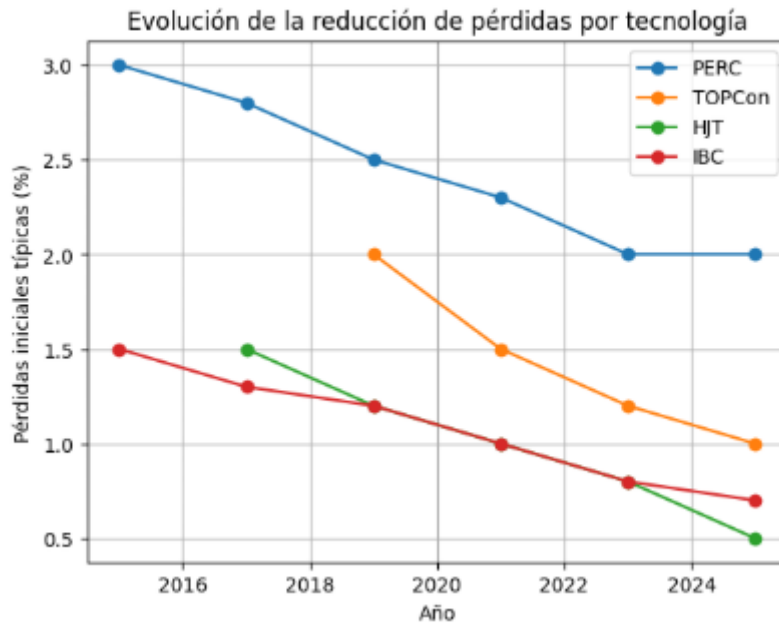
Finalmente, la evolución industrial ha permitido aumentar la calidad y homogeneidad del producto a gran escala, reduciendo la variabilidad entre módulos y mejorando el rendimiento real en campo. El resultado combinado es una mayor producción específica (kWh/kWp), una menor diferencia entre potencia nominal y potencia efectiva en operación y una reducción progresiva del coste nivelado de la energía, incluso sin incrementos significativos en la superficie instalada.



*Ilustración 1. Evolución de la eficiencia por tecnología fotovoltaica.*

Entre 2015 y 2020, la mejora de eficiencia estuvo liderada por la optimización progresiva de PERC, que alcanzó rápidamente su madurez industrial. A partir de 2020 se observa una aceleración asociada a la entrada de tecnologías TOPCon y HJT, que amplían el margen de mejora. IBC, aunque estaba presente anteriormente en segmentos específicos, mantiene una evolución más estable vinculada a aplicaciones de alto rendimiento.

En términos de eficiencia media comercial, el salto desde valores próximos al 19–20% hasta rangos de 23–25% en menos de una década supone un incremento muy significativo en potencia por unidad de superficie. Este avance tiene implicaciones directas en entornos donde el espacio disponible es limitado, ya que permite aumentar la producción sin incrementar ocupación de suelo o cubierta.



*Ilustración 2. Evolución de la reducción de pérdidas en la célula por tecnología.*

La reducción progresiva de las pérdidas iniciales y de degradación asociadas a la estructura de la célula también ha sido continua. Mientras que PERC partía de niveles más elevados de pérdidas inducidas por luz y temperatura, las arquitecturas más recientes muestran una mejora clara en estabilidad operativa. La combinación de mejor control de materiales, transición hacia silicio tipo n y optimización de contactos eléctricos se traduce en menores desviaciones entre potencia nominal y potencia efectiva en operación.

Desde una perspectiva de sistema energético, la convergencia entre mayor eficiencia y menor degradación implica tres efectos relevantes:

- aumento de la producción anual específica (kWh/kWp),
- mejora de la bancabilidad de los proyectos y
- reducción del coste nivelado de la energía.

En consecuencia, la evolución tecnológica incrementa el rendimiento técnico del módulo y mejora la competitividad estructural de la fotovoltaica dentro del mix energético.

### **2.3 MÓDULOS BIFACIALES Y OPTIMIZACIÓN DE LA CAPTACIÓN DEL ALBEDO.**

Una de las mejoras más relevantes del sector es la generalización de los módulos bifaciales, capaces de captar radiación solar por ambas caras. A diferencia de los paneles tradicionales — que solo aprovechan la luz directa e indirecta que incide en su parte delantera— los bifaciales también convierten en electricidad la radiación reflejada por el suelo o por superficies próximas.

Superficies claras como gravas blancas, cubiertas industriales claras, hormigón, nieve o determinadas láminas reflectantes presentan mayor albedo que terrenos oscuros o vegetación densa. Cuanto mayor es el albedo, mayor es la cantidad de radiación que llega a la cara posterior del módulo y, por tanto, mayor la producción eléctrica.

### Estructura de un Módulo Bifacial



Ilustración 3. Estructura básica de módulo bifacial.

Estos módulos bifaciales incorporan:

- Células activas en ambas caras.
- Encapsulados con vidrio doble o materiales transparentes posteriores.
- Diseños de estructura que permiten el paso de la luz hacia la parte trasera.

En condiciones adecuadas de instalación, el incremento de producción puede estar entre un 5% y un 15%.

Por otro lado, la optimización de la captación del albedo no implica necesariamente intervenciones complejas. Puede lograrse mediante:

- Selección adecuada del tipo de superficie bajo los módulos.
- Diseño de la altura y geometría de la estructura.
- Gestión del terreno en plantas en suelo.
- Integración en cubiertas industriales con materiales reflectantes.

En términos estratégicos, los módulos bifaciales representan una mejora tecnológica que permite aumentar la producción sin incrementar la potencia nominal instalada ni la superficie

ocupada. Esto contribuye a reducir el coste por kWh generado y mejora la rentabilidad de los proyectos. En territorios con climatología variable y elevada proporción de radiación difusa, como Asturias, la captación adicional por la cara posterior puede ayudar a estabilizar la producción anual.

## 2.4 REDUCCIÓN DE DEGRADACIÓN (LID<sup>6</sup>, PID<sup>7</sup>) Y MAYOR VIDA ÚTIL.

La mejora de la tecnología fotovoltaica convencional se ha producido en términos de eficiencia inicial y estabilidad del rendimiento a largo plazo. La consecuencia directa es la mejora significativa la calidad técnica y financiera de los proyectos.

La mitigación de la degradación inicial debido a fenómenos derivados de la luz (LID) ha permitido que la diferencia entre la potencia nominal de fábrica y la potencia real en operación sea cada vez menor. Esto significa que los módulos actuales:

- Mantienen más fielmente la potencia nominal.
- Reducen la incertidumbre a partir de los primeros meses de explotación.
- Mejoran la previsibilidad de ingresos en proyectos de autoconsumo y generación.

La introducción de silicio tipo n y la optimización de procesos de fabricación han sido determinantes para reducir este efecto, mejorando la estabilidad desde el primer año.

La reducción del efecto denominado PID (*Potential Induced Degradation*) evita pérdidas acumulativas. Se obtienen mejoras gracias al uso de soluciones del tipo:

- Encapsulantes con mayor resistencia eléctrica.
- Vidrios y láminas posteriores mejoradas.
- Diseños de célula menos sensibles a corrientes parásitas.
- Mejores prácticas de puesta a tierra e ingeniería de sistema.

El aumento de la vida útil efectiva es otro logro relevante de la tecnología fotovoltaica. Se ha pasado de degradaciones lineales de los módulos a degradaciones anuales inferiores al 0,4–0,5% tras el primer año con garantía a 30 años.

---

<sup>6</sup> LID: Light Induced Degradation. Pérdida de rendimiento que puede producirse en algunos paneles solares durante las primeras horas o días tras su puesta en funcionamiento, cuando empiezan a estar expuestos a la radiación solar. Cuando la luz incide por primera vez sobre ciertas células de silicio (especialmente las de tipo p), se activan pequeños defectos internos en el material. Estos defectos hacen que una parte de la electricidad generada se “pierda” dentro de la célula en lugar de salir al circuito externo.

<sup>7</sup> PID: Potential Induced Degradation. Reducción de la potencia de un módulo fotovoltaico durante su operación, especialmente en instalaciones de gran tamaño, debido a sobretensiones o a condiciones de humedad elevada que alterna un funcionamiento normal. Cuando hay diferencias de voltaje entre el módulo y la estructura metálica o el suelo, se pueden formar corrientes parásitas que afectan al material de la célula. Esto provoca una pérdida de rendimiento progresiva que se acumula con el tiempo.



Combinando los efectos descritos, el resultado final para una instalación moderna es una curva de producción más estable y prolongada en el tiempo, lo que se traduce en:

- Mayor seguridad en los cálculos de generación futura.
- Mejor retorno de la inversión.
- Incremento de la sostenibilidad al alargar la vida útil del activo.
- Menor huella ambiental por kWh generado, al amortizar el impacto de fabricación durante más años de producción.

## **2.5 OPTIMIZACIÓN DE FABRICACIÓN: REDUCCIÓN DE PLATA, OBLEAS MÁS FINAS, AUTOMATIZACIÓN**

La evolución reciente de la fotovoltaica no se explica únicamente por mejoras en la arquitectura de la célula, sino también por una profunda transformación de los procesos industriales. La optimización de la fabricación ha permitido reducir costes, disminuir la dependencia de materiales críticos y aumentar la capacidad productiva global, reforzando la competitividad del sector.

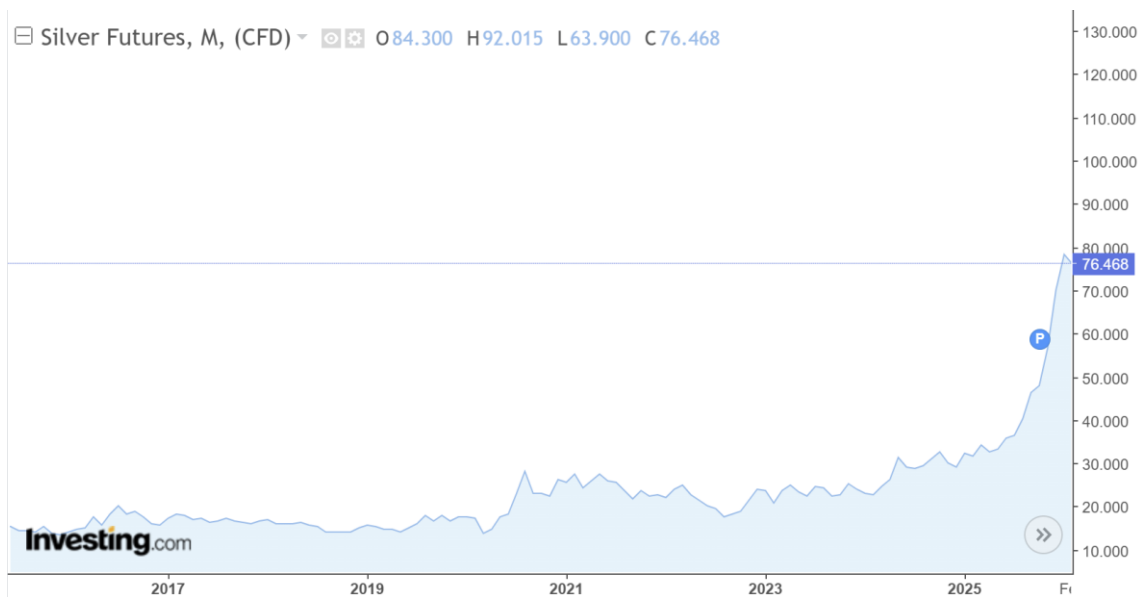
### **2.5.1 REDUCCIÓN DEL USO DE PLATA.**

La plata se utiliza principalmente en las pastas metálicas que forman los contactos eléctricos de las células. Aunque su cantidad por módulo es pequeña, su elevado precio y su carácter estratégico convierten su consumo en un factor relevante.

En los últimos años se han producido avances significativos:

- Reducción del grosor de las líneas de metalización.
- Mejora en las técnicas de serigrafía y deposición.
- Sustitución parcial por cobre o aleaciones alternativas.
- Optimización del diseño de contactos para usar menos material sin aumentar pérdidas.

La consecuencia directa es una menor exposición a la volatilidad de precios de materias primas y una reducción del coste por vatio producido. Además, disminuye el impacto ambiental asociado a la extracción de metales preciosos.



La fuerte tendencia al alza del valor de la plata, así como el del oro u otras materias primas, está marcado por una situación geopolítica de gran inestabilidad en la que estas materias se han convertido en “valores refugio” para los inversores. Esto puede ser un condicionante al desarrollo de inversiones en este sector, especialmente si no se consigue desarrollar soluciones tecnológicas sustitutivas de la plata como materia prima esencial en la fabricación.

Ha de tenerse en cuenta que:

- El mercado de la plata es altamente sensible a los ciclos de mercados financieros.
- La oferta no es controlable fácilmente, al estar ligada la plata a la extracción de otros metales.
- Las propias características de la plata como material la hacen sustituible en algunos procesos por otros metales más abundantes y baratos.
- La concentración de productores y el número de operadores facilitan un mejor acceso a la plata dentro de los mercados internacionales.

### 2.5.2 OBLEAS MÁS FINAS

El silicio representa una parte relevante del coste del módulo. La reducción progresiva del espesor de las obleas —manteniendo su resistencia mecánica y calidad eléctrica— ha sido una línea estratégica clave.

Fabricar obleas más finas permite:

- Disminuir el consumo de materia prima.
- Reducir energía incorporada en la fabricación.
- Aumentar el número de células obtenidas por lingote.

Este avance exige unas mayores exigencias en los procesos industriales y avances significativos en la curva de aprendizaje de la tecnología, ya que las obleas más delgadas son más frágiles. Por

ello, su implantación ha ido acompañada de mejoras en maquinaria, control de calidad y diseño estructural del módulo.

Desde una perspectiva ambiental, esta optimización contribuye a reducir la huella de carbono por unidad de potencia instalada.

Todo el proceso de fabricación de obleas es energéticamente muy intensivo, con necesidades térmicas y eléctricas elevadas, tanto para la reducción del SiO<sub>2</sub> con C, la purificación utilizando H<sub>2</sub> de materiales intermedios (HSiCl<sub>3</sub>), o el corte de obleas, tanto si se hace con hilos diamantados como en las técnicas más innovadoras que utilizan láseres.

En general, la capacidad de fabricación de módulos fotovoltaicos se asienta sobre la obtención de polisilicio ultrapuro, que es el cuello de botella tecnológico. Si bien las tecnologías utilizadas en todo el proceso son conocidas, puesto que incorporan reactores, equipos de purificación, de trituración o de suministro y gestión eléctrica, la situación del mercado internacional muestra una concentración de la capacidad de producción en China (75-80% de la capacidad de producción mundial), con Alemania, USA o Malasia aglutinando parte del resto de capacidad. Dicha concentración favorece el desarrollo en su entorno de actividades industriales, lo que permite generar clústeres o cadenas integrales de producción. Esto debe ser visto desde el punto de vista de la competitividad y de la soberanía industrial y energética como aspectos críticos. Este análisis es especialmente significativo en el caso de la producción industrial china, que integra verticalmente el proceso polisilicio, lingotes, obleas, células, módulos.

### **2.5.3 AUTOMATIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN INDUSTRIAL.**

La expansión global de la capacidad productiva ha ido de la mano de una automatización avanzada de las fábricas. Las nuevas líneas de producción incorporan:

- Sistemas robotizados de manipulación.
- Control óptico en tiempo real.
- Trazabilidad digital de cada célula y módulo.
- Inteligencia artificial para detección temprana de defectos.

La automatización mejora la homogeneidad del producto, reduce desperdicios y aumenta el rendimiento por línea de fabricación. Además, permite escalar producción con mayor rapidez ante aumentos de demanda. De especial relevancia son estas soluciones en el corte de obleas, puesto que el espesor micrométrico sólo es abordable con este tipo de tecnologías.

En términos económicos, la combinación de automatización y economías de escala ha contribuido a mantener la curva descendente de costes, incluso en un contexto de incremento temporal de precios energéticos o logísticos.

### **2.5.4 IMPACTO ESTRATÉGICO.**

Estas mejoras industriales refuerzan tres dimensiones clave de la fotovoltaica:



- Competitividad económica, al reducir costes estructurales.
- Seguridad de suministro, al disminuir dependencia de materiales críticos.
- Sostenibilidad, al optimizar el uso de recursos y energía en fabricación.

En conjunto, la optimización de procesos productivos ha sido un factor tan determinante como la innovación en diseño de células, consolidando la madurez industrial de la tecnología y facilitando su despliegue masivo en los próximos años.

## **2.6 CÉLULAS TÁNDEM: EL SALTO EN EFICIENCIA.**

El continuo proceso de evolución de la tecnología fotovoltaica lleva al siguiente paso: las células tándem. Son dispositivos fotovoltaicos que combinan dos (o más) materiales semiconductores con diferentes bandas prohibidas en una misma estructura, con el objetivo de aprovechar mejor el espectro solar y superar los límites de eficiencia de una célula convencional de una sola unión. El desarrollo de esta solución tiene por objetivo mejorar una tecnología cuyo límite máximo está en el 33%, valor que se superaría con esta nueva configuración de células.

### **2.6.1 CONCEPTO Y FUNDAMENTOS FÍSICOS.**

Conceptualmente este tipo de células están formadas por dos materiales distintos colocados uno encima del otro, diseñados para captar diferentes haces de la luz solar.

En el plano de los fundamentos físicos, cada material semiconductor tiene una propiedad llamada energía de banda prohibida (bandgap).

Veamos qué pasa en una célula convencional. Si la energía de la luz solar que llega a la célula es menor que el bandgap, no se absorbe. Si es mayor, se absorbe y genera electricidad. Y si es mucho mayor, el exceso se pierde en forma de calor. Esto limita la eficiencia de la célula.

¿Qué hace una célula tándem?. Utiliza dos materiales con bandgaps distintos, de forma que en la capa superior absorbe la parte del haz de alta energía (azul, ultravioleta) y no captura la parte del haz de menor energía, dejándola pasar. Esta parte del haz llega a la capa inferior, que absorbe los fotones que atraviesan la capa superior (rojo, infrarrojo), logrando de esta forma aprovechar mejor el espectro solar completo. En conjunto se mejora la eficiencia porque se evitan pérdidas por transmisión (fotones no absorbidos) y se reducen las pérdidas térmicas (exceso de energía convertido en calor).

Las tándem de dos uniones pueden superar rendimientos teóricos del 40 %. En teoría, también cuantas más uniones (multiunión), mayor potencial de captación, aunque también mayor complejidad en la fabricación.

### **2.6.2 SILICIO + PEROVSKITA (ESTADO ACTUAL Y RETOS).**

La combinación silicio + perovskita es hoy la arquitectura tándem con mayor potencial industrial.

La capa inferior es silicio cristalino (tecnologías como TOPCon o HJT). La capa superior es una perovskita de haluro metálico. El objetivo es claro: aprovechar mejor el espectro solar sin abandonar la infraestructura industrial del silicio, que ya está plenamente desplegada a escala mundial.

En laboratorio se han superado eficiencias del 33 %, se ha demostrado viabilidad de integración, mientras en fase preindustrial existen líneas piloto en marcha y módulos demostradores. Presentan la ventaja de aumentar eficiencia sin duplicar superficie, reducir coste por vatio y mejorar competitividad frente a módulos convencionales. La sensibilidad a humedad y oxígeno y la degradación térmica condicionan la perspectiva de durabilidad temporal de este tipo de células. Un riesgo ambiental es la presencia de plomo en la perovskita. En regiones con apuesta industrial fuerte la tecnología tandem silicio-perovskita se considera una oportunidad para recuperar liderazgo tecnológico, diferenciarse frente a producción masiva convencional y reducir LCOE en entornos de disponibilidad de suelo limitada.

## **2.7 NUEVOS MATERIALES Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES.**

### **2.7.1 PEROVSKITAS PURAS.**

El desarrollo de soluciones basadas en perovskitas puras representa una de las líneas más disruptivas en fotovoltaica a día de hoy, por su capacidad de alcanzar altas eficiencias y el uso de procesos de fabricación potencialmente más simples y de menor temperatura que el silicio cristalino. Su principal ventaja es que los materiales pueden depositarse mediante técnicas de capa fina, lo que abre la puerta a producción de módulos ligeros, flexibles o semitransparentes. Esto amplía los mercados a los que puede llegar la tecnología y revolucionar los ya existentes, como son las aplicaciones en integración arquitectónica (BIPV), fachadas activas y superficies donde el peso es una limitación.

Desde el punto de vista industrial, su potencial reside en menores inversiones en hornos de alta temperatura y en cadenas de suministro menos intensivas en energía. Sin embargo, requieren entornos de fabricación con control muy estricto de humedad y atmósfera, sistemas avanzados de encapsulación y control de defectos a escala nanométrica. También es clave estabilizar la composición química para garantizar durabilidad a largo plazo (superar los 20–25 años).

La gestión ambiental, especialmente debido a la presencia de plomo, exige protocolos ambientales, de reciclaje y de contención específicos y rigurosos.

Si se superan estos retos, podrían configurar una industria fotovoltaica más flexible, modular y con menores barreras de entrada en el desarrollo de soluciones de generación eléctrica.

### **2.7.2 FOTVOLTAICA ORGÁNICA.**

La fotovoltaica orgánica (OPV) se basa en materiales semiconductores orgánicos (polímeros o pequeñas moléculas orgánicas) capaces de absorber luz y generar carga eléctrica mediante heterouniones.



Su principal atractivo es la posibilidad de fabricación mediante técnicas de impresión (roll-to-roll, serigrafía, inkjet) a baja temperatura, lo que reduce el consumo energético del proceso y permite producir módulos ultraligeros, flexibles y semitransparentes, como en el caso de la perovskita. Esto abre aplicaciones diferenciadas: integración en fachadas y cubiertas ligeras, dispositivos portátiles, agricultura protegida o electrónica integrada.

Industrialmente, el potencial de desarrollo radica en la posibilidad de crear líneas continuas de alta velocidad similares a las de la industria gráfica, con menores inversiones en equipos de alta temperatura respecto a la tecnología de silicio. Sin embargo, presentan retos relevantes: eficiencia todavía inferior a la del silicio, degradación frente a oxígeno, humedad y radiación UV, y necesidad de encapsulados de alta calidad. Además, la estabilidad a largo plazo y la estandarización de materiales siguen siendo áreas críticas de desarrollo.

Si se consolidan mejoras en durabilidad y eficiencia, la OPV puede posicionarse como tecnología complementaria en nichos donde la ligereza, flexibilidad o transparencia aporten valor diferencial.

### **2.7.3 TINTES FOTOVOLTAICOS.**

Un tinte, tinta o pintura fotovoltaica es una tecnología avanzada que utiliza materiales semiconductores líquidos o en aerosol (como perovskitas) para captar la luz solar y convertirla en electricidad, permitiendo "pintar" o imprimir paneles solares sobre diversas superficies. Esta tecnología busca convertir fachadas, ventanas y techos en generadores de energía limpia.

Utiliza materiales semiconductores, tintes y resinas que se aplican en capas muy delgadas (aprox. 1 micrómetro), mucho más finas que el silicio tradicional. Su aplicación es mediante spray o impresión de inyección de tinta sobre vidrio, plástico u otras superficies, siendo ideal para la integración arquitectónica.

No requieren estructuras adicionales, mantienen función de cerramiento de elementos sobre el que se aplica y permiten soluciones estéticas personalizadas (colores, niveles de transparencia, etc.). Por otro lado, son muy sensibles a la humedad y presentan degradación apreciable por radiación ultravioleta.

Las eficiencias actuales son claramente inferiores a las de los módulos convencionales, ya que parte del recurso no se puede aprovechar (una parte de la luz debe atravesar el vidrio) y los materiales orgánicos tienen menor rendimiento que el silicio. En general, el coste por kWh generado es superior al de la fotovoltaica convencional. Su aplicación, actualmente de nicho, puede entrar en competencia con soluciones arquitectónicas integradas (BIPV).

### **2.7.4 CÉLULAS DE PUNTOS CUÁNTICOS.**

Las células de puntos cuánticos (QDSC, Quantum Dot Solar Cells) utilizan nanopartículas semiconductoras de tamaño controlado (puntos cuánticos) que permiten optimizar la absorción de distintas longitudes de onda de la luz. Esto ofrece un alto potencial de eficiencia teórica,

especialmente en configuraciones tándem, y la posibilidad de aprovechar fotones de baja energía que se desperdician en tecnologías convencionales.

Industrialmente, los puntos cuánticos pueden procesarse en soluciones líquidas y depositarse mediante técnicas de impresión, lo que abre la puerta a su uso en el desarrollo de módulos flexibles, ligeros y semitransparentes, adecuados para integración arquitectónica o dispositivos portátiles.

Sin embargo, los retos técnicos son aún muy elevados: estabilidad limitada frente a humedad, oxígeno y radiación; necesidad de encapsulados avanzados; control estricto del tamaño y la distribución de los puntos cuánticos; y optimización de interfaces para evitar pérdidas de carga. Además, algunos de los materiales de desarrollo contienen sustancias tóxicas como cadmio.

Actualmente se encuentran en fase de investigación y prototipos piloto, con eficiencias de laboratorio en torno al 16–18 % en células de una sola unión, y el potencial de superar el 30 % en tándem.

### **2.7.5 CIGS Y TECNOLOGÍAS DE CAPA FINA AVANZADAS.**

Las tecnologías CIGS (cobre–indio–galio–selenio) y otras capas finas avanzadas se basan en la deposición de materiales semiconductores directamente sobre sustratos (vidrio, metal o polímeros), evitando el uso de obleas de silicio. En el caso del CIGS, mediante el ajuste de la proporción de galio, se puede optimizar la absorción solar y alcanzar eficiencias competitivas. Su principal ventaja industrial es el menor consumo de material activo y la posibilidad de fabricación mediante procesos continuos, lo que reduce el espesor del material a pocas micras. Además, ofrecen buen comportamiento en condiciones de baja irradiancia y altas temperaturas, lo que amplía su atractivo en ciertos climas.

Desde el punto de vista industrial, permiten líneas de producción integradas y potencialmente automatizadas, con menor intensidad energética que el silicio cristalino. También facilitan el desarrollo de módulos flexibles o integrados arquitectónicamente. No obstante, presentan retos significativos: dependencia de materias primas críticas como indio y galio, control complejo de la estequiometría durante la deposición y necesidad de asegurar homogeneidad en grandes superficies. En tecnologías de capa fina avanzadas, el desafío adicional es equilibrar eficiencia, estabilidad y disponibilidad de materiales.

Si se consolidan cadenas de suministro estables y mejoras en escalado industrial, estas tecnologías pueden desempeñar un papel estratégico en aplicaciones específicas.

## **3. INNOVACIONES EN DISEÑO Y APLICACIONES**

### **3.1 FOTOVOLTAICA INTEGRADA EN EDIFICIOS (BIPV).**

La integración requiere adaptación a formas, dimensiones y estética, lo que demanda flexibilidad en el diseño y fabricación de módulos. El diseño debe considerar que el acceso



limitado para limpieza y mantenimiento, especialmente en fachadas verticales o vidrios semitransparentes.

El CAPEX de este tipo de soluciones es superior a módulos convencionales, al requerir personalización, adaptación y certificación específica. Aunque el LCOE es ligeramente superior, se compensa por la sustitución de materiales de construcción y la mejora estética conseguida. Económicamente los incentivos (directos y fiscales) pueden mejorar significativamente la rentabilidad de la inversión. Además se abre la posibilidad de desarrollo de nuevos modelos de negocio: alquiler de cubiertas, contratos de PPA urbanos o autoconsumo.

Para la fabricación convencional basada en silicio, se abren oportunidades como el posicionamiento industrial en productos de valor añadido, diferenciados frente a módulos convencionales de gran volumen; la posibilidad de fomentar industria local próxima a la fabricación de módulos, si se combinan adecuadamente las líneas de producción y las aplicaciones a BIPV; y la posibilidad de apoyar y aprovechar la transición energética en entornos urbanos. Por contra, aparecen también riesgos tecnológicos asociados a la rápida evolución de tecnologías avanzadas (tándem, perovskita, orgánicos), que podría hacer obsoletos los módulos tradicionales de silicio si no se invierte en I+D; la fuerte competencia de productores asiáticos con costes muy bajos; y la necesidad de una diferenciación constante como clave de desarrollo.

En definitiva:

- La fotovoltaica integrada en edificios es una oportunidad de impulso de la diferenciación industrial y tecnológica frente a la fotovoltaica masiva de bajo coste.
- Su éxito industrial depende de adaptación tecnológica, flexibilidad de producción, soporte técnico local y calidad certificada, más que de volumen de venta.
- La evolución de tecnologías avanzadas y la competencia internacional obliga a combinar producción de módulos con I+D, innovación en integración arquitectónica y nuevos modelos de negocio.

### **3.2 AGROVOLTAICA Y SINERGIAS SUELO-ENERGÍA.**

La agrovoltaica combina producción agrícola con generación fotovoltaica sobre la misma superficie de terreno. Los módulos se instalan en estructuras elevadas o sobre cultivos, permitiendo sombra parcial que protege ciertos cultivos y reduce estrés hídrico del terreno. Requiere estructuras especiales, con altura suficiente para maquinaria agrícola, orientación optimizada, y separación entre filas para no afectar demasiado la radiación solar en el suelo. Dichas estructuras deben resistir viento y carga mecánica. El mantenimiento es más complejo que parques fotovoltaicos convencionales: limpieza, revisión de estructuras y compatibilidad con maquinaria agrícola.

El CAPEX de este tipo de soluciones es superior a un parque convencional, mientras el LCOE puede ser competitivo si se optimiza la densidad de módulos y se combina con producción agrícola rentable. No obstante, la rentabilidad depende de factores como la densidad de módulos, el tipo de cultivo, la radiación solar del emplazamiento y la eficiencia de los módulos.

En general es una solución más interesante para cultivos de alto valor o superficies extensas donde el suelo es limitado o caro.

Los riesgos asociados más relevantes son los de mercado, entre los que está la competencia de productores chinos con módulos baratos de silicio cristalino, la escalabilidad limitada si la agrovoltaica no se implanta ampliamente en España o Europa y la dependencia de la legislación y posibles ayudas para mejorar la viabilidad económica de cada proyecto.

En resumen,

- La diferenciación industrial debe orientarse a productos de valor añadido, adaptados a las necesidades de clientes.
- Es necesario mantener una gran flexibilidad tecnológica para no quedarse obsoleto.
- El mayor riesgo competitivo viene de los productores de módulos estándar de silicio; frente a los que es esencial aprovechar la ventaja local basada en personalización, soporte técnico y certificación.
- La legislación ambiental y agrícola puede ser un factor diferenciador.

### **3.3 FOTVOLTAICA FLOTANTE.**

La fotovoltaica flotante consiste en instalar módulos solares sobre estructuras flotantes sobre láminas de agua interiores libres. Este tipo de soluciones mejora el rendimiento térmico, debido al efecto de refrigeración del agua y la reducción de la temperatura de los módulos. Por otro lado, al cubrir parcialmente la lámina de agua y reducir el aporte energético, tiene como efecto una menor evaporación de agua. Además evita el problema de la ocupación de suelo y se establece una posible sinergia con otras instalaciones de generación próximas si existen. Las instalaciones se enfrentan a diferente tipo de problemas que requieren soluciones específicas: corrosión por humedad constante, resistencia a cargas dinámicas (viento, oleaje), diseño de anclajes y sistemas flotantes robustos, mantenimiento más complejo y mayor exigencia en estanqueidad eléctrica y protección IP de todos los componentes.

El CAPEX superior al de instalaciones en suelo, pero se rentabiliza gracias a mayor producción anual (mejor rendimiento térmico) y opcionalmente al aprovechamiento de infraestructuras hidroeléctricas existentes y la reducción de conflictos por el uso del suelo.

El LCOE de este tipo de instalaciones alcanza competitividad con parques convencionales si se optimiza el tamaño de la instalación y muy especialmente si se aprovecha infraestructura de evacuación eléctrica existente.

Este modelo de instalación abre algunas oportunidades para la fabricación especial de módulos, orientados a uso en ambientes húmedos, al desarrollo de soluciones completas (módulo + estructura) o a la diferenciación por resistencia y durabilidad certificada. Por contra introduce riesgos como la necesidad de inversión en desarrollo para garantizar productos libres de corrosión y con sellado de alta calidad; la posibilidad de una evolución tecnológica rápida de tecnologías competidoras como las células tándem, que podría desplazar silicio convencional; o



la competencia de productores internacionales (especialmente China) que por volumen y precio pueden distorsionar el mercado, especialmente si el de ámbito local escala mucho en tamaño.

### 3.4 INTEGRACIÓN EN INFRAESTRUCTURAS (CARRETERAS, MOBILIARIO URBANO).

La integración de generación fotovoltaica en infraestructuras existentes representa una evolución hacia un modelo energético más distribuido y multifuncional, en el que además de reducir el uso de suelo adicional para la generación eléctrica, pueden aprovecharse dichas infraestructuras: carreteras, pantallas acústicas, marquesinas, aparcamientos, mobiliario urbano, etc. Las implicaciones de este tipo de soluciones son, además de energéticas, urbanísticas, económicas y estratégicas.

Aunque se pueden presentar limitaciones técnicas como la resistencia estructural (viento, vibraciones,...), la seguridad vial, la conexión a la red eléctrica; limitaciones de carácter económico, como un CAPEX mayor o una rentabilidad dependiente del aprovechamiento energético que se haga; existen también beneficios. Entre ellos están la optimización del uso del suelo, una generación distribuida próxima al punto de consumo, el valor demostrativo y las posibilidades de innovación y la revalorización de activos públicos.

No representa el mejor modelo desde el punto de vista de aprovechamiento energético, pero aporta Valor estratégico en su desarrollo a las instalaciones fotovoltaicas. Especialmente en el caso de la visibilidad de integración de este tipo de soluciones en infraestructuras, la perspectiva de un cambio de modelo energético se hace más amable y cercana a la ciudadanía.



La empresa lituana Solitek ha instalado recientemente barreras acústicas fotovoltaicas en Italia.  
Imagen: Solitek



Ilustración 4. Imágenes<sup>8</sup> de proyectos fotovoltaicos desarrollados en carreteras en Italia y Alemania.

<sup>8</sup> Fuente: <https://www.pv-magazine.es/2026/03/05/fotovoltaica-en-carreteras-anuncios-de-alemania-e-italia/>



## 4. DIGITALIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO.

Más allá de la evolución en materiales y de las soluciones que con las que se realiza el diseño de las instalaciones, la nueva generación fotovoltaica se apoya de forma creciente en la digitalización y en la optimización inteligente de la operación. La mejora del rendimiento ya no depende únicamente de la eficiencia de la célula, sino también de la capacidad para gestionar mejor la energía producida, reducir pérdidas en tiempo real y anticipar incidencias. La incorporación de electrónica avanzada, sistemas de monitorización continua y herramientas de análisis de datos permite maximizar la producción efectiva, alargar la vida útil de las instalaciones y mejorar la integración en el sistema eléctrico, especialmente con el almacenamiento y la gestión de la demanda. En este contexto, la digitalización se convierte en un elemento estructural para consolidar la competitividad y fiabilidad de la fotovoltaica.

### 4.1 ELECTRÓNICA DE POTENCIA AVANZADA (MICROINVERSORES, OPTIMIZADORES).

Una parte creciente de la mejora del rendimiento global proviene de la electrónica de potencia, que gestiona cómo se convierte y se extrae la energía generada por cada panel. En este ámbito, los microinversores y los optimizadores representan un cambio relevante frente al esquema tradicional de inversor central o *string*<sup>9</sup>.

En sistemas tradicionales, varios módulos se conectan en serie formando *strings* que dependen de un único inversor. El rendimiento del conjunto queda condicionado por el módulo con menor producción. Gracias a la electrónica avanzada, se introducen variantes con dos enfoques, que permiten que cada panel funcione de manera independiente:

- Uso de microinversores: cada módulo dispone de su propio inversor y entrega directamente corriente alterna.
- Uso de optimizadores de potencia: cada módulo incorpora un dispositivo que maximiza su punto de operación antes de enviar energía a un inversor central. Son dispositivos de corriente continua (DC/DC).

Las principales mejoras de resultados se producen en aquellos tipos de instalaciones en los que la operación de los módulos es compleja, como por ejemplo:

- Instalaciones con sombras parciales.
- Cubiertas con diferentes orientaciones.
- Entornos urbanos con obstáculos.
- Sistemas con suciedad o envejecimiento desigual.

---

<sup>9</sup> También denominada cadena fotovoltaica, es un conjunto de paneles solares conectados en serie para sumar sus voltajes individuales, formando una unidad funcional que se conecta al inversor. Suelen agrupar entre 2 y 15 módulos con la misma orientación para maximizar la producción energética y optimizar la tensión de entrada al inversor.



Por otro lado, está la seguridad y las posibilidades de monitorización que ofrecen estas soluciones, aumentando la capacidad de diagnóstico:

- Monitorización individual por módulo.
- Detección temprana de fallos.
- Desconexión rápida en caso de emergencia.
- Mayor control frente a riesgos eléctricos en corriente continua.

Todo esto tiene unas consecuencias económicas relevantes. Respecto de la inversión inicial, el CAPEX suele ser superior al de un sistema convencional diseñado con *strings* e inversor, debido al mayor número de componentes electrónicos, una Instalación eléctrica más compleja, y un coste mayor del módulo al incorporar electrónica distribuida por cada uno de ellos. No obstante, este sobrecoste puede compensarse en determinadas configuraciones. A cambio se obtiene un incremento de producción. En cubiertas con sombras o múltiples orientaciones, la producción anual puede incrementarse de forma apreciable respecto a sistemas convencionales. Esto mejora el autoconsumo efectivo, el retorno de inversión o la estabilidad de la producción a lo largo del año. Desde el punto de vista del mantenimiento y la vida útil de los equipos, hay una mayor capacidad de diagnóstico, que reduce tiempos de intervención y se abre la posibilidad de una sustitución rápida localizada en caso de fallo. Por el contrario, el mayor número de componentes implica mayor complejidad y la fiabilidad de la electrónica se convierte en un factor clave en el análisis coste-beneficio.

En general estas soluciones permiten incorporar el autoconsumo en entornos más complejos y optimizar la operación de comunidades energéticas fotovoltaicas. La mayor y mejor compatibilidad con baterías y la capacidad de gestión ofrece alternativas más flexibles a la demanda. Otro aspecto positivo está en la supresión de un punto crítico en el fallo de la red, como es el inversor, que en el caso de microinversores se ve sustituido por un conjunto de ellos.

Característica	Inversor central	Inversor string	Optimizadores + inversor	Microinversores
Escala típica	Grandes plantas (>1 MW)	Comercial / industrial / residencial	Residencial y comercial	Residencial y pequeña escala
Nivel de conversión	Un único equipo para toda la planta	Un inversor por conjunto de módulos (string)	Optimización por módulo + inversor común	Un inversor por módulo
Gestión individual por módulo	No	No	Sí (en continua)	Sí (en alterna)
Sensibilidad a sombras	Alta	Media	Baja	Muy baja
Rendimiento en cubiertas complejas	Bajo	Medio	Alto	Muy alto



Característica	Inversor central	Inversor string	Optimizadores + inversor	Microinversores
Coste inicial (€/kWp)	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio-alto
Complejidad técnica	Baja	Media	Media-alta	Alta
Monitorización detallada	Limitada	Media	Avanzada	Muy avanzada
Mantenimiento	Centralizado	Relativamente sencillo	Localizable por módulo	Localizable por módulo
Resiliencia ante fallo	Baja (punto único crítico)	Media	Alta	Muy alta
Adecuación a autoconsumo urbano	Baja	Media	Alta	Muy alta

Tabla 5. Comparativa de arquitecturas de conversión en sistemas fotovoltaicos.

## 4.2 MONITORIZACIÓN INTELIGENTE Y MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

La monitorización inteligente y el mantenimiento predictivo permiten evolucionar las acciones en este campo hacia un modelo preventivo con mayores niveles de optimización. En este campo, el análisis continuo de datos mejora el rendimiento global y reduce incertidumbre operativa.

Los sistemas actuales ya permiten recopilar datos de producción por inversor o por módulo, parámetros operativos como tensión y corriente en cada *string*, temperatura de módulos, irradiación y condiciones ambientales, estado de protecciones eléctricas, etc. Toda esta información lleva a la necesaria digitalización, lo que permite comparar la producción real con la esperada según condiciones meteorológicas, detectando desviaciones de forma temprana. En este campo, la modelización o los gemelos digitales juegan un papel esencial, así como la inteligencia artificial para el procesamiento de datos.

Otra de las áreas de aplicación de soluciones de digitalización a la monitorización es la detección temprana de fallos. La posibilidad de detección de patrones anómalos permite anticipar soluciones a problemas como suciedad excesiva, fallos de conexión, degradación acelerada de componentes, sombras no previstas o problemas térmicos. Esto reduce el tiempo de detección de incidencias, con un impacto directo sobre la rentabilidad de la instalación.

Gracias a estas técnicas se facilita el aprendizaje automático sobre el mantenimiento predictivo, anticipando fallos en inversores, intervenciones en elementos críticos, optimizar limpieza o priorizar la conservación de activos críticos para la inversión.

En el apartado económico, el incremento de generación, la reducción de costes (menos intervenciones, optimización de desplazamientos, o reducción de sustitución prematura de

equipos) y la mejora de la rentabilidad y por tanto de la bancabilidad de proyectos, son determinantes en la aplicación de esta solución.

Aspecto	Operación convencional	Monitorización avanzada	Impacto
Detección de fallos	Reactiva (tras avería)	Predictiva (análisis de tendencias)	Reducción de indisponibilidad
Gestión de pérdidas	Análisis agregado mensual	Seguimiento por <i>string</i> / módulo	Identificación temprana de degradación
Intervenciones O&M	Programadas por calendario	Basadas en condición real	Optimización de recursos técnicos
Vida útil	Dependiente de mantenimiento correctivo	Extensión mediante actuación temprana	Mejora del LCOE
Producción energética	Pérdidas ocultas no detectadas	Recuperación de energía "invisible"	+1-3 % rendimiento anual típico
Gestión de activos	Estática	Dinámica con IA y analítica avanzada	Integración de todo el negocio

Tabla 6. Resumen de efectos de la digitalización aplicada a monitorización y mantenimiento.

### 4.3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA A LA OPERACIÓN.

La integración de inteligencia artificial (IA) en la operación de activos fotovoltaicos representa una evolución cualitativa respecto a la monitorización avanzada. No se limita a visualizar datos, sino que permite interpretar patrones complejos, anticipar comportamientos y optimizar decisiones operativas en tiempo real.

La base de su funcionamiento es el cruce continuo entre multitud de variables, entre las que se pueden citar: datos eléctricos (curvas de intensidad de corriente y voltaje, tensión, corriente, potencia); variables ambientales (irradiancia, temperatura módulo, viento); históricos de incidencias y de fallos; datos de mercado (curvas continuas de precios de mercado, previsión de demanda, restricciones técnicas,...).

El resultado es una predicción avanzada de producción (estimaciones en condiciones de nubosidad variable, radiación difusa o inestabilidad meteorológica); la detección de anomalías (fallos intermitentes, degradación incipiente, suciedad o pérdidas por temperatura); o la optimización dinámica de activos (ajustes de operación en tiempo real, priorización de funcionamiento de módulos o *strings* determinados, integración de demanda/almacenamiento,..).

El incremento de la producción puede llegar a alcanzar valores del 4%, lo que junto con reducción de costes y alargamiento de la vida de los equipos desemboca en mayor rentabilidad global del proyecto.

Desde el ámbito del empleo, la IA introduce una nueva necesidad de especialización: analistas de datos energéticos, ingenieros de modelos predictivos, o integradores de sistemas digitales.



#### 4.4 INTEGRACIÓN CON ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE LA DEMANDA.

La integración de almacenamiento energético y gestión activa de la demanda supone un paso adicional en la evolución de la fotovoltaica: de generación optimizada y bajo coste a generación flexible y gestionable. Aunque este tipo de soluciones es ampliamente conocido, cualquier avance en este campo es clave para maximizar el valor económico de la energía producida y reforzar la estabilidad del sistema eléctrico, garantizando la competitividad del suministro eléctrico.

Podemos decir que la integración debe alcanzar a:

- Sistemas de almacenamiento.
- Sistemas de gestión energética (EMS) que coordinan generación, consumo y almacenamiento.
- Algoritmos de optimización e inteligencia artificial que determinan cuándo almacenar, cuándo inyectar y cuándo consumir.

La combinación de estos elementos permite desacoplar parcialmente la generación fotovoltaica de la curva de carga sin provocar la inestabilidad del sistema.

### 5. SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR EN MÓDULOS.

#### 5.1 REDUCCIÓN DE MATERIALES CRÍTICOS Y ESTRATÉGICOS.

La reducción de uso en materiales críticos constituye uno de los vectores clave para reforzar la sostenibilidad de la fotovoltaica. No se trata únicamente de disminuir costes, sino de reducir vulnerabilidades relacionadas con el entorno geopolítico, dependencia exterior y riesgos ambientales en la extracción y procesado de determinados recursos.

La evolución de fabricación de células comentada en (apartados 2.1 y 2.5.1), ha permitido una evolución del uso de materiales críticos y estratégicos:

- Plata, de la que se busca una sustitución parcial por cobre o aleaciones híbridas, como ya se comentó anteriormente.
- Cobre, cuyo uso se reduce mejorando las interconexiones entre celdas y el uso de técnicas avanzadas de metalización (galvanoplastia).
- Materiales poliméricos específicos (encapsulantes, *backsheets*), gracias al uso de tecnologías que permitan el desarrollo de capas más finas y técnicas que faciliten la reutilización de componentes.

Por otro lado, la evolución tecnológica de fabricación (apartados 2.5.2, 2.6, y 3) impulsa la reducción de otros materiales:

- Aluminio, a través del rediseño de marcos (incluso eliminación en módulos vidrio-vidrio) y uso de estructuras soporte de acero.

- Silicio ultrapuro, en el que, contando con material abundante, el coste energético de producción es clave.

El desarrollo de tecnologías de células TOPCon se apoya en una mayor utilización de cobre y níquel en las metalizaciones, así como en soldaduras a base de estaño y, en algunos casos, plomo. Aunque el silicio no figura como material crítico por abundancia geológica, su cadena de valor es altamente estratégica, de modo que la expansión de TOPCon traslada parte de la presión desde la plata hacia metales como el cobre y el níquel y hacia insumos químicos de alta pureza.

En HJT, la doble metalización en ambas caras y el uso intensivo de óxido de indio-estaño como contacto transparente desplazan la demanda de materia prima desde la plata hacia el indio y el estaño, añadiendo nuevos riesgos de suministro frente a las arquitecturas PERC o TOPCon.

Las células IBC concentran una metalización de alta precisión en la cara posterior, apoyada en obleas de silicio de gran pureza y en contactos de plata finamente estructurados, de modo que reducen el sombreado óptico pero mantienen una dependencia elevada de silicio de alta gama y plata conductora.

Las perovskitas actuales trasladan la criticidad desde la plata hacia el plomo y determinados halógenos; las líneas de investigación en perovskitas basadas en estaño o germanio reducen la toxicidad derivada del uso del plomo, pero introducen una dependencia mayor de metales como el estaño y el germanio, con mercados todavía limitados.

En tecnologías emergentes como la fotovoltaica orgánica, de tintes o de puntos cuánticos, el riesgo se desplaza desde grandes volúmenes de metales hacia cadenas de suministro muy especializadas de polímeros, pigmentos y semiconductores nanoestructurados, que en algunos casos incorporan cadmio o plomo en cantidades reducidas, con el consiguiente problema ambiental.

Tecnología de célula / módulo	Materiales críticos clave	Tipo de riesgo principal
TOPCon (n-type)	Plata, cobre, níquel, estaño/plomo en soldaduras; silicio de grado solar	Riesgo alto por suministro de plata, presión creciente sobre cobre y níquel, cadena de silicio muy concentrada
HJT	Plata, indio, estaño, silicio de alta calidad	Elevada dependencia de indio (metal crítico), uso muy intensivo de plata y estaño
IBC ( <i>back-contact</i> )	Plata de alta pureza, silicio <i>n-type</i> de muy alta calidad	Dependencia de plata fina y obleas premium, con menos proveedores
PERC (p-type)	Plata, estaño/plomo en soldaduras, aluminio	Riesgo clásico por plata
Perovskita (single y tándem)	Plomo, halógenos (I, Br); alternativas con estaño y germanio	Toxicidad del plomo, mercados pequeños de Sn y Ge; dependencia de químicos de alta pureza



Fotovoltaica orgánica (OPV) y tintes	Polímeros y pigmentos especializados; posibles complejos metálicos (a veces tierras raras)	Cadenas de síntesis muy concentradas y sensibles a regulación, más que un metal concreto
Puntos cuánticos	Cadmio, plomo en algunas formulaciones	Toxicidad elevada y condicionantes regulatorios

Tabla 7. Materiales y riesgos en cada tecnología de fabricación de células y módulos fotovoltaicos.

## 5.2 HUELLA DE CARBONO DEL MÓDULO.

La reducción de la huella de carbono del módulo constituye un elemento central en la consolidación de la fotovoltaica como tecnología plenamente sostenible, toda vez que ha sido durante mucho tiempo una de las controversias en relación con su desarrollo, simplificado en la afirmación falsa de que “consume más energía en la fabricación de la que producía a lo largo de su vida”. Si bien la generación solar presenta emisiones operativas prácticamente nulas, el impacto ambiental se concentra en las fases de extracción de materiales, procesado del silicio y fabricación de componentes. La mejora tecnológica reciente ha permitido disminuir de forma significativa las emisiones asociadas por unidad de potencia instalada.

La huella de carbono de un módulo se evalúa mediante análisis de ciclo de vida (LCA), considerando las diferentes fases de su vida:

- Extracción y refinado de materias primas.
  - Obleas más finas implica menor consumo de silicio por Wp.
  - Reducción significativa de plata en la metalización.
  - Optimización de aluminio en marcos y estructuras.
  - Optimización energética en fundición y refinado.
  - Mayor electrificación de procesos, hecha con energías renovables.
  - Uso de aluminio reciclado con menor huella que el primario.
  - Recuperación progresiva de vidrio y metales en flujos industriales.
- Producción de polisilicio y obleas.
  - Optimización del funcionamiento de reactores.
  - Reducción del consumo eléctrico por kg de polisilicio.
  - Recuperación y reutilización de subproductos.
  - Uso de tecnologías de corte con hilo diamantado.
  - Menor pérdida de material (*kerf loss*) al usar técnicas de corte más finas.
- Fabricación de células.
  - Mejor control de hornos de difusión.
  - Procesos más rápidos y eficientes.
  - Reducción de tiempos de ciclo.
- Ensamblaje del módulo.
  - Procesos más precisos gracias a automatización, con menor tasa de rechazo y reducción de desperdicio de materiales.



- Optimización del diseño, con aplicaciones de módulos vidrio–vidrio sin marco y reducción de aluminio estructural.
  - Simplificación de componentes.
- Transporte.
  - Mayor densidad de empaquetado.
  - Reducción de embalajes.
  - Mejora en planificación de rutas.
  - Buques más eficientes.
  - Electrificación progresiva del transporte terrestre.
- Fin de vida.
  - Recuperación de vidrio.
  - Separación y recuperación de aluminio.
  - Recuperación de silicio y metales conductores.
  - Eliminación de componentes difíciles de separar.
  - Reincorporación de materiales recuperados en nuevas cadenas de producción.

### 5.3 RECICLAJE Y RECUPERACIÓN DE MATERIALES.

El reciclaje de módulos fotovoltaicos constituye un elemento esencial para consolidar la sostenibilidad integral del sector. A medida que las primeras generaciones de instalaciones alcanzan el final de su vida útil y el volumen de potencia instalada continúa creciendo, la gestión eficiente de residuos se convierte en una cuestión estratégica, no solo ambiental sino también industrial, ya que constituye una actividad industrial en sí misma y permite la reintroducción de materiales en las cadenas productivas.

Un módulo fotovoltaico convencional está compuesto mayoritariamente por:

- Vidrio ( $\approx 70\text{--}75\%$  en peso).
- Aluminio (marco).
- Silicio.
- Cobre.
- Plata (en pequeñas cantidades).
- Materiales poliméricos (encapsulantes y láminas posteriores).

Entre los procesos de reciclaje están:

- Reciclaje mecánico básico:
  - Separación de marco de aluminio.
  - Trituración del módulo.
  - Recuperación del vidrio como material secundario.



- Procesos avanzados de separación:
  - Deslaminado térmico o químico para separar encapsulantes.
  - Recuperación más pura de vidrio.
  - Separación de células intactas.
  - Extracción de metales valiosos (plata y cobre).

Entre los procesos de evolución del diseño (ecodiseño) que afectarán al reciclaje están:

- Simplificación de materiales.
- Eliminación de compuestos complejos.
- Estructuras vidrio-vidrio más fácilmente separables.
- Reducción de adhesivos difíciles de tratar.

El reciclaje genera actividad industrial especializada, empleo técnico especializado y servicios logísticos y de tratamiento. A medio plazo, el crecimiento del volumen de módulos retirados convierte esta actividad en un segmento industrial propio.

#### **5.4 ECODISEÑO Y NUEVAS NORMATIVAS EUROPEAS.**

El ecodiseño aplica el principio de “impacto mínimo a lo largo del ciclo de vida”, integrando criterios como:

- Reducción de intensidad material.
- Mayor durabilidad.
- Reparabilidad.
- Facilidad de desmontaje.
- Reciclabilidad.
- Reducción de sustancias peligrosas.
- Trazabilidad de materiales.

En el ámbito fotovoltaico, esto afecta desde el diseño de célula al ensamblaje del módulo o su integración en sistemas.

Más concretamente, la Unión Europea ha impulsado el Reglamento de Ecodiseño para Productos Sostenibles, que amplía el alcance tradicional (antes centrado en eficiencia energética) hacia:

- Durabilidad mínima.
- Contenido reciclado.
- Huella de carbono.
- Pasaporte digital de producto.
- Información obligatoria sobre composición y fin de vida.

No es la única normativa que afecta a la fabricación de módulos, ya que el Reglamento de Baterías y Economía Circular introduce principios aplicables al sector, como la declaración de huella de carbono, los requisitos de contenido de materiales reciclados o la responsabilidad



ampliada del productor. La Directiva RAEE (WEEE) incluye los módulos fotovoltaicos en la normativa de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos obligando a contar con sistemas organizados de recogida, financiación de reciclaje y trazabilidad en fin de vida. A esto se han de añadir medidas con el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM), que no siendo específico de aplicación a módulos fotovoltaicos, introduce una señal clara: los productos intensivos en carbono pueden perder competitividad en el mercado europeo por la introducción de mecanismos del tipo arancel.

Todo esto se traduce en factores determinantes en la fabricación:

- Módulos más duraderos (garantías extendidas).
- Reducción de mezclas complejas de polímeros.
- Identificación y trazabilidad de materiales.
- Eliminación progresiva de sustancias problemáticas.
- Atención especial al uso de materiales críticos.
- Complejidad administrativa creciente.
- Necesidad de armonización técnica a nivel europeo.
- Posible incremento temporal de costes frente a competidores extracomunitarios.
- Riesgo de sobrerregulación si no se acompaña de incentivos adecuados.

## 6. IMPACTO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO

La fotovoltaica de nueva generación está contribuyendo a una transición desde un modelo basado en generación centralizada e inflexible hacia un sistema eléctrico más distribuido, digitalizado y gestionable. El análisis de sus efectos debe, por tanto, abordarse no solo desde la óptica de potencia instalada, sino desde su capacidad para transformar la arquitectura técnica, económica y regulatoria del sistema eléctrico.

Las aplicaciones de nueva generación —caracterizadas por mayor densidad energética por superficie, integración con almacenamiento, hibridación tecnológica, digitalización avanzada y capacidad de interacción con la demanda— están modificando de forma estructural el funcionamiento del sistema eléctrico.

El incremento de potencia instalada por unidad de superficie permite optimizar el uso del territorio y de las infraestructuras de evacuación existentes.

La incorporación de almacenamiento ofrece la flexibilidad imprescindible para un sistema con alta penetración renovable (desplazamiento aporte energía a la red, suavización de rampas, participación en servicios de ajuste y reducción de vertidos).

La digitalización, la monitorización avanzada y la gestión activa de la demanda permiten una interacción bidireccional entre generación y consumo, favoreciendo el autoconsumo colectivo, las comunidades energéticas y una mayor resiliencia del sistema.



La evolución regulatoria —tanto en materia de acceso y conexión como en sostenibilidad, almacenamiento, agregación de demanda y mercados de flexibilidad— está creando un marco que incentiva proyectos más complejos, concebidos como infraestructuras energéticas multifuncionales, integradas en el sistema eléctrico y en el territorio, aportando valor más allá de la propia energía.

## 6.1 MAYOR DENSIDAD ENERGÉTICA POR SUPERFICIE.

El incremento continuo de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos ha permitido aumentar la potencia instalada por unidad de superficie ocupada. Esta evolución tecnológica tiene implicaciones estructurales en el desarrollo del sector eléctrico español, especialmente en un contexto de expansión acelerada de renovables y creciente problema con la licencia social de proyectos.

Desde un punto de vista técnico, la evolución tecnológica hace evolucionar el mercado hacia soluciones que cumplan con los siguientes condicionantes:

- Mayor potencia por hectárea, que se traduce en el aumento de eficiencia (mayor  $Wp/m^2$ ):
  - Reduce superficie necesaria para una misma potencia instalada.
  - Permite mayor capacidad en emplazamientos con limitación de suelo.
  - Mejora la viabilidad de cubiertas industriales y urbanas.
  - Repotenciar suelos ya aprovechados con incrementos de potencia.
- Mejor integración en la red eléctrica:
  - Aprovechando mejor los nodos de conexión.
  - Incrementando potencia instalada en infraestructuras existentes.
  - Reduciendo necesidad de nuevas líneas.
- Optimización en autoconsumo:
  - Más potencia por cubierta y otras superficies disponibles.
  - Mayor autosuficiencia energética.

Desde un punto de vista económico, el impacto es muy diverso.

- Reducción del coste por kWh generado:
  - Menor coste de estructura y cimentación por Wp.
  - Menor coste de terreno por MW.
  - Optimización de infraestructuras eléctricas (centros de transformación, cableado).
- Mayor rentabilidad en suelos de alto valor:
  - La mayor producción por hectárea mejora rentabilidad.
  - Se reducen tensiones entre uso agrícola y energético.
  - Esto adquiere relevancia en comunidades con fuerte presión sobre el suelo.
- Optimización de activos existentes:
  - Incrementar potencia sin ampliar superficie.
  - Mejorar rendimiento sin nuevos procesos administrativos complejos.

- Maximizar infraestructuras ya amortizadas.

Desde el punto de vista del impacto ambiental, se producen efectos muy diversos.

- Reducción de ocupación territorial relativa:
  - Mayor densidad energética significa:
  - Menor superficie ocupada por unidad de energía generada.
  - Menor fragmentación de hábitats por MWh producido.
  - Reducción del impacto visual relativo.
- Mejor balance uso suelo–energía:
  - Energía generada.
  - Impacto territorial.
- Facilitación de integración en entornos antropizados.

El impacto social también juega un papel relevante.

- Mejora de aceptación pública:
  - Disminuye conflictos territoriales.
  - Reduce percepción de “industrialización masiva” del paisaje.
  - Favorece integración en zonas ya transformadas.
- Compatibilidad con usos productivos:
  - Menor superficie por instalación.
  - Mayor facilidad para compatibilizar con usos agrícolas (agrovoltaica).
  - Reducción de tensiones con comunidades locales.
- Impulso al autoconsumo colectivo:
  - Comunidades energéticas urbanas.
  - Participación ciudadana.
  - Democratización del acceso a generación renovable.

## 6.2 FLEXIBILIDAD, ALMACENAMIENTO E HIBRIDACIÓN.

La evolución de la fotovoltaica hacia tecnologías de mayor eficiencia, electrónica avanzada, digitalización e integración con almacenamiento representa un activo con creciente capacidad de adaptación operativa y valor para el sistema eléctrico, con numerosos efectos.

### 6.2.1 IMPACTO TÉCNICO.

Ámbito	Elementos clave	Aplicación
Evolución del modelo de generación	Sistemas de almacenamiento en CC o CA Inversores híbridos avanzados Algoritmos de gestión energética Control centralizado en plantas utility-scale	Paso de generación no gestionable a generación parcialmente flexible



Ámbito	Elementos clave	Aplicación
Desplazamiento temporal de energía	Suavización de curvas de carga Limitación voluntaria de vertidos Ajuste dinámico a señales de mercado	Mejora de integración en red y adaptación a condiciones operativas
Integración con almacenamiento	Gestión de excedentes solares Inyección en horas de mayor precio/demanda Servicios auxiliares (regulación primaria y secundaria, control de frecuencia) Reducción de congestiones locales	Mayor eficiencia operativa y valor sistémico
Hibridación tecnológica	Con almacenamiento de cualquier tecnología Con eólica Con hidráulica Con generación gestionable existente Con producción de hidrógeno	Optimización del recurso y complementariedad tecnológica
Perspectiva de red	Optimización del punto de conexión Mejora del factor de utilización de infraestructuras	Mayor eficiencia en infraestructuras eléctricas existentes

### 6.2.2 IMPACTO ECONÓMICO.

Ámbito	Elementos clave	Beneficio económico
Generación de ingresos	Participación en mercados de ajuste Reducción de penalizaciones por desvíos Optimización en mercados horarios	Incremento de ingresos potenciales
Optimización de infraestructuras	Reducción de nuevas líneas Mayor factor de carga en subestaciones Disminución de inversiones redundantes	Menor CAPEX sistémico
Estabilidad financiera	Gestión activa de producción Menor exposición a volatilidad de precios Mejora del perfil de ingresos Mayor bancabilidad de proyectos	Reducción del riesgo financiero



### 6.2.3 IMPACTO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO.

Ámbito	Elementos clave	Impacto en el sistema
Reducción de vertidos y congestiones	Menor energía no evacuada Reducción de restricciones técnicas Optimización de red existente	Mayor eficiencia del sistema
Estabilidad y seguridad de suministro	Control de frecuencia Regulación de tensión Esquemas de respuesta rápida	Refuerzo de estabilidad operativa
Generación distribuida	Autoconsumo con almacenamiento Suavización de perfiles de carga Mayor resiliencia ante interrupciones	Sistema más flexible y robusto
Impacto ambiental	Reducción de vertidos Mejor uso de infraestructuras existentes Menor ocupación territorial Mayor integración renovable sin respaldo fósil Contribución indirecta a la descarbonización	Mejora ambiental estructural

### 6.2.4 IMPLICACIONES REGULATORIAS.

Objetivo regulatorio	Desarrollo necesario
Reconocer el valor de la flexibilidad	Marco normativo específico
Permitir agregación de recursos distribuidos	Regulación habilitadora
Facilitar hibridación sin duplicidades administrativas	Simplificación de procedimientos
Integrar almacenamiento en mercados eléctricos	Reglas claras y estables

## 6.3 REDES INTELIGENTES Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA.

### 6.3.1 IMPACTO TÉCNICO.

Ámbito	Elementos clave	Aplicación
Digitalización de instalaciones	Inversores inteligentes, monitorización en tiempo real, comunicaciones bidireccionales	Conversión de cada planta distribuida en nodo activo con capacidad de control remoto y envío de datos a distribuidoras y agregadores
Gestión de tensión y frecuencia	Regulación de factor de potencia, control dinámico de potencia, limitación de vertidos	Mayor estabilidad en redes de baja y media tensión con alta penetración de autoconsumo
Flujo bidireccional en distribución	Integración de generación en BT y MT	Adaptación operativa de redes diseñadas originalmente para flujo unidireccional



Integración con almacenamiento	Baterías domésticas e industriales, EMS (Energy Management Systems)	Desplazamiento de excedentes solares a horas punta y reducción de congestiones locales
Agregación digital	Plataformas de gestión coordinada de múltiples instalaciones	Participación conjunta en servicios de ajuste y mercados de flexibilidad
Ciberseguridad y protección de datos	Protocolos seguros de comunicación	Protección de infraestructuras críticas ante creciente digitalización
Automatización de red	Sensórica, contadores inteligentes, sistemas ADMS	Supervisión avanzada y gestión activa en redes de distribución

### 6.3.2 IMPACTO ECONÓMICO.

Ámbito	Elementos clave	Aplicación
Reducción de pérdidas	Generación cercana al consumo	Menor coste sistémico por transporte y distribución de energía
Optimización de inversiones en red	Menor necesidad de refuerzos en transporte	Reorientación de inversión hacia digitalización de distribución
Nuevos modelos de negocio	Autoconsumo colectivo, comunidades energéticas, agregadores independientes	Desarrollo de ecosistema empresarial local vinculado a energía distribuida
Estabilidad de costes para consumidores	Autogeneración y almacenamiento	Reducción de exposición a volatilidad del mercado mayorista
Servicios de flexibilidad	Gestión de demanda y almacenamiento distribuido	Nuevas fuentes de ingresos para prosumidores y operadores agregados
Economías locales	Instalaciones en cubiertas urbanas e industriales	Retención de valor económico en territorio frente a grandes proyectos centralizados

### 6.3.3 IMPACTO EN EL SISTEMA ELÉCTRICO.

Ámbito	Elementos clave	Aplicación
Descentralización del modelo	Crecimiento del autoconsumo y generación distribuida	Transición desde modelo centralizado hacia arquitectura más mallada
Resiliencia del sistema	Microredes y capacidad de gestión local	Mayor robustez ante fallos, eventos climáticos extremos o crisis energéticas
Participación ciudadana	Comunidades energéticas y prosumidores	Democratización de la transición energética
Equilibrio territorial	Generación distribuida en zonas urbanas y rurales	Mayor cohesión energética y reducción de dependencia externa



Integración sectorial	Electrificación coordinada (movilidad eléctrica, climatización)	Mejor alineación entre generación renovable y nuevos consumos eléctricos
-----------------------	---	--

## 7. CONCLUSIONES DE APLICACIÓN PARA ASTURIAS.

Partimos del escenario internacional que se prevé para los próximos años. Apuntan a una fabricación fotovoltaica mucho mayor que la actual, con un mix tecnológico dominado por silicio de alta eficiencia (TOPCon, HJT, back-contact) y con una producción todavía muy concentrada en Asia, pero con polos industriales relevantes en Europa, Estados Unidos e India.

Podría superarse 1 TW/año de capacidad anual de fabricación de módulos hacia 2030, con escenarios acelerados que hablan de 1,3 TW/año o más. La Agencia Internacional de la Energía y SolarPower Europe estiman que la capacidad instalada de FV acumulada puede superar los 7 TW en 2030. Se requerirán medidas de apoyo muy fuertes para captar parte del crecimiento, que de otra forma se concentrará en China, incluyendo obleas, células y buena parte de los módulos.

Respecto de las tecnologías que previsiblemente prevalecerán, serán:

- En células de silicio cristalino, los escenarios tecnológicos apuntan a una transición desde PERC (dominante hoy) hacia TOPCon como estándar de volumen, con HJT y arquitecturas back-contact (BC/IBC, HPBC, tándem sobre silicio) ganando cuota en segmentos de alta eficiencia.
- Para 2030, los estudios que combinan las previsiones de demanda de plata y cuotas de mercado de tecnologías asumen ya una fracción minoritaria de PERC frente a TOPCon y HJT, con estas dos últimas ocupando la mayor parte de la nueva capacidad de fabricación de células.
- En el horizonte 2040, se espera que los tándem (perovskita-silicio u otras combinaciones) empiecen a tener presencia comercial significativa, con eficiencias de módulo por encima del 30 %, particularmente en aplicaciones donde el espacio es caro (cubiertas, BIPV, plantas de alta densidad).

Las fábricas de lingotes/oblas y de ensamblaje de módulos se insertan en este contexto para captar una parte de la fabricación que hoy está casi totalmente en Asia. Para ser competitivas en 2030-2040, estas plantas deberán:

- Diseñarse desde el inicio para trabajar con obleas y células TOPCon y, preferiblemente, con capacidad de adaptación a HJT/back-contact y futuras configuraciones tándem.
- Operar a escala de gigavatios por año y con altos factores de utilización, para situarse en la curva de aprendizaje global y reducir el diferencial de costes frente a Asia.
- Integrar suministros de vidrio, marcos, encapsulantes y electrónica de potencia en un entorno logístico eficiente (puerto, red europea), ya que los escenarios de 2030



muestran que la competencia será no solo en coste por Wp, sino en huella de carbono, trazabilidad y seguridad de suministro.

## 7.1 CLAVES ESTRATÉGICAS PARA LA REGIÓN.

Los factores económicos serán claves en el desarrollo de actividades. La competencia es fuerte, especialmente de fabricantes chinos, condicionados por su demanda interna y los márgenes se ajustan con tecnologías y producciones cada vez más maduras.

En tecnologías, TopCon absorbe cerca del 95% de pedidos de los principales fabricantes, desplazando por completo la tecnología PERC.

En mercados, la guerra en Irán va a tener un impacto directo sobre los precios de la energía, lo que supondrá, de prolongarse el conflicto, como ha sucedido con la guerra en Ucrania, un impacto directo sobre la demanda de instalaciones fotovoltaicas. Esto puede modificar significativamente la previsión para los mercados a corto plazo.

Otro factor clave está en los costes de producción y demanda de materias primas. En este sentido, *“los diez principales fabricantes, todos verticalmente integrados, afrontan fuertes presiones por elevados costes fijos y compromisos de capital en un contexto de márgenes reducidos. El reciente repunte de precios responde principalmente al encarecimiento de la plata y no a una recuperación estructural de la demanda, mientras que en China se prevé una caída de nuevas instalaciones: según las previsiones de InfoLink, la nueva capacidad instalada en el país en 2026 podría descender desde los 316,57 GW de 2025 hasta entre 180 y 210 GW, lo que supone una caída interanual del 34–43 %”*<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Fuente: <https://www.pv-magazine.es/2026/03/05/infolink-preve-demanda-a-la-baja-y-margenes-mas-comprimidos-para-los-fabricantes-de-modulos-fotovoltaicos-en-2026/>

### 2025 Global module shipment ranking

Rank	Company
1	Jinko / LONGi
3	Trina / JA Solar
5	Tongwei
6	Astronergy
7	GCL
8	DMEGC / Canadian Solar
10	TCL Solar / Yingli / DAS Solar

Source: InfoLink Database

\*InfoLink values the comprehensiveness and completion of statistics. In case of any discrepancies, the company's official figures shall prevail.

\*This ranking is based on manufacturers' external sales volume of self-branded modules. Statistics include manufacturers with shipments of 100 MW and above. For manufacturers with shipments of 30 GW and above, joint rankings are applied where the difference in total shipments does not exceed 5%. For manufacturers with shipments below 30 GW, joint rankings are applied where the shipment difference does not exceed 1 GW.

Ilustración 5. Principales productores<sup>11</sup> de módulos fotovoltaicos a nivel internacional.

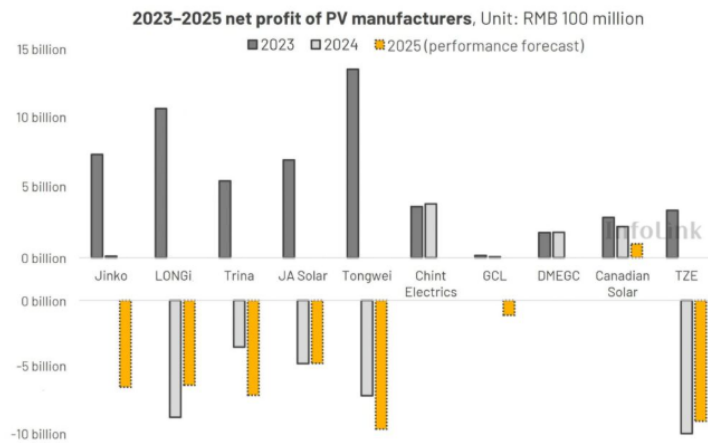


Imagen: Infolink

Ilustración 6. Evolución<sup>12</sup> de márgenes de los productores de módulos fotovoltaicos.

Otro factor esencial para Asturias es el impacto del desarrollo de la Ley de Aceleración Industrial promovida por la Comisión Europea, cuyos objetivos son el refuerzo de la industria y la creación de empleo en Europa. La ley pretende impulsar la fabricación de productos “Made in EU”, especialmente en elementos estratégicos como son las baterías, los vehículos eléctricos, la energía fotovoltaica y las materias primas fundamentales. A ello ha de añadirse el impulso de una fabricación sostenible, en la que se aúnen industria con cadenas o agrupaciones de proyectos de fabricación limpia, esenciales en infraestructuras energéticas.

<sup>11</sup> Fuente: <https://www.pv-magazine.es/2026/03/05/infolink-preve-demanda-a-la-baja-y-margenes-mas-comprimidos-para-los-fabricantes-de-modulos-fotovoltaicos-en-2026/>

<sup>12</sup> Fuente: <https://www.pv-magazine.es/2026/03/05/infolink-preve-demanda-a-la-baja-y-margenes-mas-comprimidos-para-los-fabricantes-de-modulos-fotovoltaicos-en-2026/>



Factor	Producción de Células Fotovoltaicas	Producción de Módulos Fotovoltaicos	Implicaciones para Asturias
Materias primas	Silicio ultrapuro o silicio y reductores como carbón, plata/pastas conductoras, gases (fosfina, SiH <sub>4</sub> ), ácidos (HF, HNO <sub>3</sub> ), dopantes (boro, fósforo), níquel/cobre en células TOPCon/HJT	Células (40-50%), vidrio templado (70% peso), aluminio marcos, EVA/POE, backsheet TPT, ribbons Cu/Sn	Se abren nuevas oportunidades industriales. Se necesita importar materias primas, algunas de ellas críticas o estratégicas, por lo que es necesario contar con un suministro asegurado. Puede ser necesario reforzar actividades aparentemente cerradas como el uso del carbón o el aluminio. La economía circular juega un papel clave en el desarrollo de actividad.
Energía	Muy intensiva (50-150 kWh/kg Si): difusión (>800°C), PECVD, metalización. TOPCon/HJT +20-30%	Moderada (3-7% OPEX): laminación (150-180°C). 2.500-4.000 kWh/kWp total incorporado	Se requiere de un suministro seguro y precios competitivos, que se podrían obtener con más facilidad sin los peajes de acceso, lo que exige instalaciones generadoras de energía en proximidad a la industria. Los PPA serán herramientas clave para dar cobertura y estabilidad de precios a largo plazo.
Agua	Alta (20-50 l/m <sup>2</sup> ): limpiezas químicas, texturizado, efluentes ácidos.	Baja (<2 l/m <sup>2</sup> ): lavado vidrio, refrigeración. Huella indirecta vía silicio/vidrio iea-pvps+1	El tratamiento de aguas residuales es clave para la sostenibilidad de la actividad, especialmente en el caso de producción de células.



Factor	Producción de Células Fotovoltaicas	Producción de Módulos Fotovoltaicos	Implicaciones para Asturias
Suelo	Necesidades específicas de construcción de salas limpias clase 100-1000 (1-2 m <sup>2</sup> /MW). Control ambiental estricto para una producción de calidad.	5-10 m <sup>2</sup> /MW. Buena compatibilidad de los requerimientos con la disponibilidad de suelo industrial.	Debería contarse con accesos que facilitasen una logística adecuada a las necesidades exportadoras, especialmente en el caso de módulos. En el caso de fabricación de células debe mantenerse vigilancia sobre posibles vertidos y sus efectos.
Medios productivos	Línea 1 GW: 150-250 M€ CAPEX (corte diamantado, PECVD, serigrafía, testeadores,..)	Línea 500 MW: 30-50 M€ CAPEX (stringers, laminadoras, framers, flashers)	La fabricación de módulos tiene retornos más rápidos que los de producción de células, básicamente por el valor añadido de la producción obtenida. La producción de células y material para su fabricación son estratégicas para la UE. Ambas industrias posicionan al territorio en el que se implantan como clave para dar soporte a la descarbonización y avanzar en la electrificación de la economía.
Financiación pública	PERTE, NextGen EU, FICYT/IDEPA, NET ZERO Industry Act. Ley de Aceleración Industrial Europea.	PERTE, NextGen EU, FICYT/IDEPA, NET ZERO Industry Act. Ley de Aceleración Industrial Europea.	Las ayudas públicas a nivel EUROPEO Y nacional pueden alcanzar un volumen suficiente para la toma de decisiones de inversión. La agilización de permisos y el impulso a estas inversiones forman parte del impulso legislativo.



<b>Factor</b>	<b>Producción de Células Fotovoltaicas</b>	<b>Producción de Módulos Fotovoltaicos</b>	<b>Implicaciones para Asturias</b>
Financiación privada	Necesidad de soluciones específicas para inversiones de este volumen	Bancos que financien proyectos industriales, fondos ESG o inversores privados pueden ofrecer soluciones a proyectos de menor volumen	La escasez de centros de decisión próximos al territorio condiciona el desarrollo de este tipo de inversiones por agentes regionales
Mercado	China controla más del 95%, el mercado con precios 0,05-0,08 €/Wp	Europa importa casi el 90% de los módulos que instala a precios 0,10-0,15 €/Wp. La UE se ha fijado un objetivo de producción propia de 40 GWp para 2030.	La demanda europea creciente no marca el precio internacional por la fuerte demanda en otras regiones del mundo, especialmente en China.
Personas	Se demandan personal en todas las especialidades industriales y a todos los niveles.	Se demandan personal en todas las especialidades industriales y a todos los niveles.	Son necesarias profesiones tradicionales para el desarrollo de actividades industriales.

