pol·en
Transiciones Justas

Sol con marca colombiana:

Oportunidades de desarrollo de la cadena de valor solar en Colombia



Sol con marca colombiana: oportunidades de desarrollo de la cadena de valor solar en Colombia

Corporación para el Desarrollo de Políticas Energéticas para las Transiciones Justas, Polen Transiciones Justas

Bogotá, Colombia, octubre de 2026

www.polentj.org

Autores:

Leonardo Rojas Rodríguez
leonardo.rojas@polentj.org

Camilo Andrés Alfonso Díaz
camilo.alfonso@polentj.org

Juan Manuel García
investigador@polentj.org

Diseño, diagramación y portada:

Cristian Porte Ocampo

Con apoyo de:

HEINRICH BÖLL STIFTUNG
BOGOTÁ
Colombia

Cítese como:

Polen Transiciones Justas. (2026). *Sol con marca colombiana: oportunidades de desarrollo de la cadena de valor solar en Colombia.*

Esta es una obra de acceso abierto distribuida bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es). Los usuarios pueden reproducir, distribuir, adaptar y desarrollar el contenido de la obra original, conforme a los términos de la licencia mencionada.

Polen Transiciones Justas debe ser claramente reconocido como titular de la obra original. Los usuarios no están autorizados a reproducir el logo de Polen Transiciones Justas en sus obras.

Sol con marca colombiana:
oportunidades de desarrollo de la cadena de valor solar en Colombia

pol·en
Transiciones Justas

Tabla de contenido

1. *Introducción* 5

2. *Metodología y alcance* 7

3. *Capacidades, brechas y oportunidades por macroeslabónes* 8
   - 3.1 Extracción de minerales 9
   - 3.2 Procesamiento de materiales 10
   - 3.3 Manufactura 10
   - 3.3.1 Módulos fotovoltaicos 10
   - 3.3.2 Vidrio solar 11
   - 3.3.3 Electrónica de potencia 12
   - 3.3.4 Batería de litio-ferrofosfato 13
   - 3.4 EPC e instalación 13
   - 3.5 Operación y mantenimiento 14
   - 3.6 Economía circular 15

4. *Cuellos de botella transversales* 17

5. *Recomendaciones de política* 20
   - 5.1 Demanda y contenido nacional 20
   - 5.2 Infraestructura de calidad, certificación y conocimiento 20
   - 5.3 Escalamiento productivo 21
   - 5.4 Condiciones habilitantes 22
   - 5.5 Secuencia 23

6. *Consideraciones finales* 24

7. *Anexos* 25

8. *Referencias* 26

1. Introducción

La matriz eléctrica de Colombia es una de las menos intensivas en carbono de América Latina, debido al peso de la generación hidroeléctrica, que representa cerca del 56 % de la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional (UPME, 2026a), Plan 6GW+. Sin embargo, esta conformación presenta dos vulnerabilidades: la exposición a la variabilidad climática, evidenciada en los episodios de El Niño y una matriz energética primaria donde petróleo, gas natural y carbón pesan más del 78 % (UPME, 2025). La diversificación mediante fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) es, por tanto, una necesidad de seguridad y democracia energética, y la solar fotovoltaica ha sido su principal vehículo pasando de 342 MW en diciembre de 2021 a cerca de 4.350 MW en julio de 2026, alrededor del 18 % de la capacidad instalada (UPME, 2026a), impulsada por un abaratamiento de los costos cercano al 89 % entre 2010 y 2025 (IRENA, 2026), los beneficios asociados a los incentivos de la Ley 1715 de 2014 y la eliminación de barreras para la generación a pequeña escala tanto individual como colectiva.

La expansión solar ha creado una demanda interna creciente que, por ahora, se atiende sobre todo con productos importados. Colombia no fabrica módulos a una escala que permita atender esa demanda, no produce silicio de grado solar ni electrónica de potencia, y su industria de materiales complementarios, como el vidrio solar, es todavía limitada. Los módulos, que representan entre el 25 % y el 40 % del costo total de una planta (Freire, 2025), provienen mayoritariamente de China, que concentra cerca del 80 % de la capacidad global de manufactura de módulos y el 95 % de la de obleas (IEA, 2024a). Los inversores llegan principalmente de fabricantes chinos, y el almacenamiento depende de una industria que concentra más del 75 % de la manufactura global de celdas de ion-litio (BloombergNEF, 2023). Esa demanda en aceleración no es solo una fuente de importaciones, es el mercado sobre el cual el país puede construir capacidades productivas propias, si la política lo orienta.

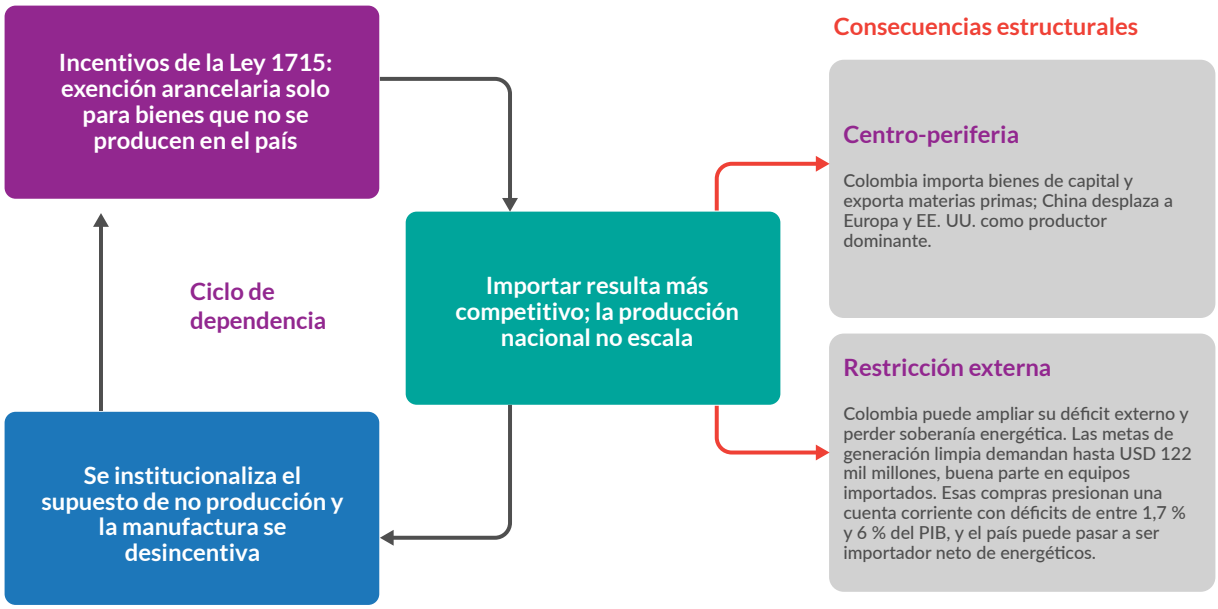
El despliegue se ha acompañado de un régimen de incentivos diseñado para importar. Por un lado, la Ley 1715 de 2014, ampliada por la Ley 2099 de 2021, ofrece a los proyectos certificados por la UPME deducción de renta de hasta el 50 % de la inversión, exclusión de IVA sobre bienes y servicios del proyecto, exención arancelaria para maquinaria y equipos, y depreciación acelerada con vigencia de treinta años desde julio de 2021. Esto ha llevado a que las solicitudes de certificación pasaran de 2.864 en 2023 (Ministerio de Minas y Energía, 2025) a más de 10.000 en 2025 (UPME, 2026b). Estos instrumentos son coherentes con la política de despliegue, pero contraproducentes para el desarrollo productivo local, ya que al limitar la exención arancelaria a bienes que no se producen en el país, institucionalizan el supuesto de la no producción nacional y refuerzan por vía fiscal la dependencia importadora.

Durante la realización de esta investigación se llevaron a cabo 11 entrevistas en profundidad a CEOs y trabajadores de empresas del sector, así como a funcionarios de las autoridades vinculadas, y se aplicó un formulario con el que se recolectó información de 42 organizaciones. Los datos relevados muestran que el patrón ya orienta decisiones empresariales, un importador abandonó su capacidad de fabricación nacional porque importar resultaba más competitivo (E5), y una empresa nacional diseña y patenta su producto en Colombia, pero lo fabrica en China (E6).

Esta condición genera y aumenta condiciones de dependencia tecnológica, el productor de la tecnología define precios, tiempo y escala de las entregas; y fortalece una situación en la que el productor exporta un bien manufacturado con alto contenido tecnológico, mientras que el país consumidor se supedita a producir un bien primario como puede ser la energía u otro, para acceder a los recursos necesarios para adquirir los bienes manufacturados reforzando la persistencia de condiciones comerciales desfavorables y una cuenta corriente deficitaria (Banco de la República, 2023).

Sin diversificación productiva e impulso de nuevas actividades económicas con mayor contenido tecnológico, el aumento de la generación y uso de energías renovables puede convertirse en una doble presión sobre el sector externo y las finanzas públicas.

Gráfico 1. Ciclo de dependencia del régimen de incentivos y sus consecuencias estructurales



Fuente: elaboración propia con base en la Ley 1715 de 2014, la Ley 2099 de 2021, Prebisch (1949), Nahm (2017), Banco de la República (2023), World Economic Forum (2024) y UPME (2023).

El gráfico muestra un círculo que se alimenta a sí mismo. La Ley solo libera de aranceles a los equipos que no se fabrican en Colombia, y eso hace que importar sea más barato que producir internamente. Como casi nadie produce, los equipos siguen contando como "no fabricados en el país" y el beneficio para el importador se mantiene. El resultado es doble: el país compra afuera la tecnología y vende materias primas (relación centro–periferia), y cada equipo importado presiona sus cuentas externas (restricción externa).

La literatura colombiana sobre energía solar se ha concentrado en el recurso y la viabilidad de proyectos, y los estudios sobre la cadena de valor operan a nivel agregado: estimaciones de valor doméstico y empleo por tecnología (UPME, 2015), análisis por eslabones de la cadena global y multiplicadores por gigavatio (Hernández y Quintero, 2025), modelos de dinámica de sistemas (Becerra-Fernández et al., 2023), análisis centrados en la extracción de minerales (Villazón, 2022) o comparaciones regionales (Parés Olguín y Busch, 2024). Ninguno desciende al insumo, la subpartida arancelaria, la empresa nacional o el departamento. Este documento cierra ese vacío con un mapeo de 565 insumos cruzado con 497 empresas nacionales y su distribución territorial.

El hallazgo central es una cadena de cobertura amplia y profundidad escasa, en la que el 98 % de los insumos tiene al menos un actor nacional asociado, pero solo el 22,5 % cuenta con un fabricante nacional directo, el 21,7 % con fabricante potencial, 1,8 % sin actor y el 54 % está cubierto únicamente por importadores y comercializadores. En los cuatro procesos de mayor complejidad tecnológica, ninguno de los insumos que se fabrican en el país corresponde al bien final. A ello se suman una proveeduría concentrada en el eje industrial andino y un mercado laboral masculinizado (los hombres ocupaban el 76,4 % de los empleos del sector minero-energético en 2020, y en el subsector de energía eléctrica las mujeres representan entre el 29 % y el 33 % de los empleos directos; (Ministerio de Minas y Energía, 2020, 2026), brechas que el escalamiento puede reproducir si no las aborda de forma explícita.

A partir de este diagnóstico, el documento responde cuatro preguntas: cómo está estructurada la cadena, qué capacidades productivas y tecnológicas existen, qué cuellos de botella impiden su profundización y qué oportunidades diferenciadas de escalamiento ofrece cada macroeslabón. Las secciones siguientes presentan la metodología, el análisis por macroeslabón, los cuellos de botella transversales, las recomendaciones de política con su secuencia y las consideraciones finales.

2. Metodología y alcance

La caracterización sigue el enfoque de cadenas globales de valor de Gereffi, Humphrey y Sturgeon (2005), complementado con los encadenamientos de Hirschman (1958). Se construyó en cinco pasos (Gráfico 2). La distinción entre fabricante directo, fabricante potencial y actor comercial separa la existencia de un mercado de la existencia de una base productiva; los resultados del sondeo se usan con alcance descriptivo.

Gráfico 2. Metodología del mapeo de la cadena de valor

1	**Matriz de insumos**	565 insumos en 6 macroeslabones: extracción, procesamiento, manufactura (módulo, vidrio solar, tres tipos de inversor y batería LFP), EPC e instalación, O&M y economía circular
2	**Clasificación**	Actividad CIIU rev. 4 de cada proceso y 293 subpartidas arancelarias verificadas a 10 dígitos (DIAN)
3	**Cruce con empresas**	497 empresas y 1.566 vínculos: fabricante directo (produce hoy el bien), potencial (domina un proceso equivalente) o actor comercial (importa o comercializa)
4	**Orígenes**	País con mayor valor importado en cada subpartida (DANE, 2025)
5	**Validación primaria**	Sondeo con 42 respuestas (38 de micro y pequeñas empresas) y 11 entrevistas semiestructuradas

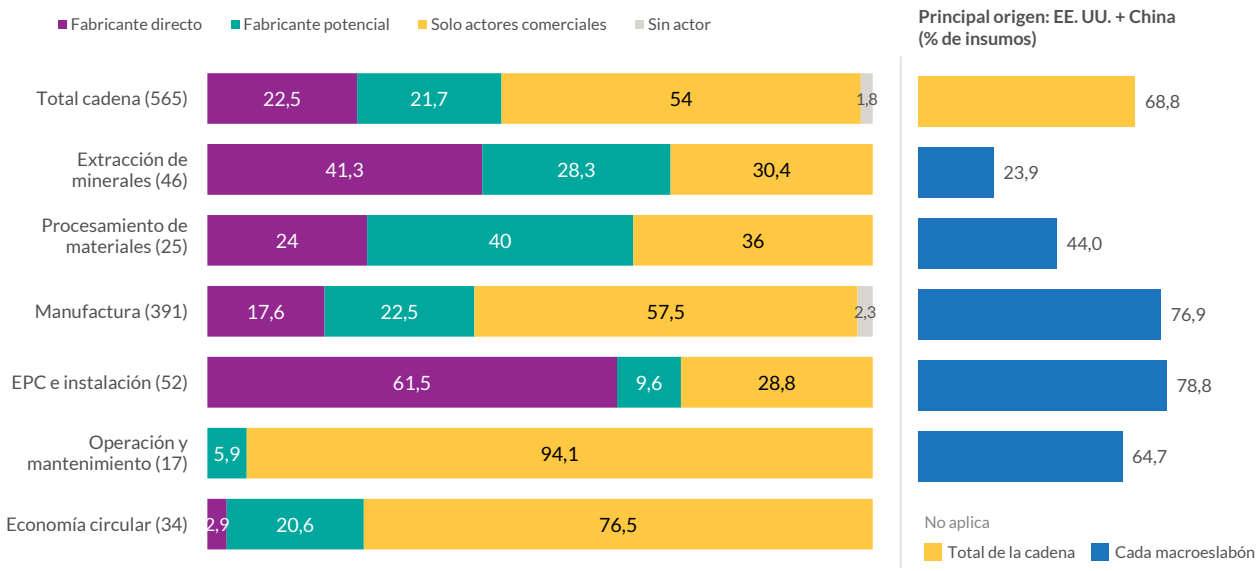
Fuente: elaboración propia con base en Gereffi, Humphrey y Sturgeon (2005), Hirschman (1958), DIAN y DANE (2026)[1].

[1]Los orígenes provienen de las importaciones registradas por el DANE durante 2025, en la que a cada insumo se le asignó el país con mayor valor importado en su subpartida. Esa asignación tiene dos limitaciones: el país de origen se registra por subpartida y no por insumo, de modo que bienes tecnológicamente distintos comparten posición arancelaria, y las cifras corresponden a las importaciones totales de cada subpartida, incluidos usos ajenos a la industria solar. Por esta razón, el peso de Estados Unidos puede estar sobrerrepresentado en subpartidas de uso general, aun cuando el componente solar específico provenga mayoritariamente de China.

3. Capacidades, brechas y oportunidades por macroeslabón

El mapeo de los 565 insumos muestra una inserción apoyada en 31 países, en la que Estados Unidos y China son el principal origen del 68,8 % de los insumos, con roles complementarios: el primero en bienes de capital, semiconductores de potencia y componentes de alta especificación; el segundo en celdas, módulos y baterías producidos a escala. Doce países de América Latina aportan el 8 % (Gráfico 3).

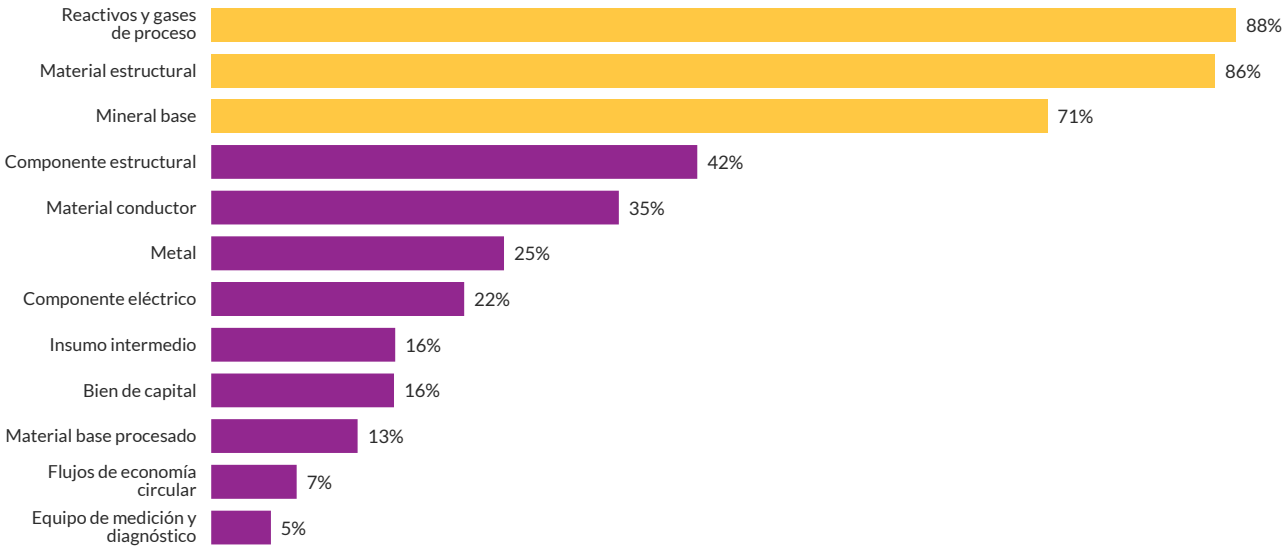
Gráfico 3. Cobertura productiva nacional y principal origen de los insumos por macroeslabón (% de insumos)



Fuente: elaboración propia a partir del mapeo de 565 insumos y 497 empresas, y de las importaciones del DANE (2026).
Fabricante potencial: domina un proceso técnicamente equivalente.

La profundidad productiva cae a medida que aumenta la intensidad tecnológica: es mayor en EPC e instalación y en extracción, menor en procesamiento y manufactura y casi nula en operación y mantenimiento y en economía circular, aunque en estos dos casos la cifra refleja también el sesgo de una matriz construida sobre bienes y no sobre servicios. Por tipo de bien, la fabricación nacional se concentra en gases y reactivos de proceso, materiales estructurales y minerales base, y es mínima en bienes de capital y equipos de medición (Gráfico 4). Las empresas que hoy fabrican estos insumos no nacieron para la industria solar: son químicas, metalúrgicas y metalmecánicas que abastecen a la construcción, la minería y otras industrias. Justamente porque ya producen, señalan dónde el país podría exigir contenido nacional en el corto plazo sin esperar nuevas inversiones: gases industriales, estructuras de soporte, gabinetes, conductores eléctricos y obras civiles.

Gráfico 4. Porcentaje de insumos con al menos un fabricante nacional directo, por tipo de bien



Fuente: elaboración propia.

La brecha es más aguda en el núcleo tecnológico, los cuatro procesos de mayor complejidad requieren 341 insumos y solo 63 se fabrican en el país: 6 de 25 en la purificación de polisilicio, 24 de 102 en celdas y paneles, 33 de 188 en electrónica de potencia y ninguno de los 26 de la química de baterías. En la producción nacional se encuentran algunos insumos secundarios, como gases, químicos de proceso, estructuras, gabinetes y cableado, mientras el polisilicio de grado solar, los dopantes, las pastas de plata, los semiconductores de potencia y los materiales activos de la celda LFP (litio-ferrofosfato) solo tienen actores comerciales.

3.1 Extracción de minerales

Este macroeslabón agrupa minerales base como cuarzo metalúrgico, arena sílica y cuarcita y minerales dopantes de boro, fósforo y galio, bienes de capital mineros y los polímeros base de los encapsulantes (EVA y POE). Es la parte de la cadena con mayor proporción de insumos sin registro de importación, 19 de 46 (41,3 %), de los cuales 8 tienen fabricante nacional directo, y la de orígenes más dispersos, en el que siete países latinoamericanos aportan el 19,6 % de los insumos. Esto se debe a que el comercio de los minerales depende principalmente de condiciones geológicas y capacidades de extracción.

El país cuenta con una base minera, siderúrgica y de explosivos industriales, y con empresas como Conalmin, Prosilice y Silicol asociadas al cuarzo y la arena sílica. Sin embargo, la política minera se ha orientado históricamente al carbón, el oro, el níquel y los materiales de construcción. La Resolución 1006 de 2023 incluyó las arenas silíceas y el cuarzo industrial entre los minerales estratégicos (ANM, 2023), pero no el cuarzo de alta pureza, insumo del que depende toda la cadena global del silicio y los semiconductores.

El principal cuello de botella se encuentra en que, de los 59 títulos de arenas silíceas con instrumento técnico aprobado, a marzo de 2025 solo ocho habían reportado recursos y reservas, con 45,28 millones de metros cúbicos de reservas probadas, principalmente sedimentos, y el propio diagnóstico oficial advierte que faltan caracterizaciones fisicoquímicas para establecer si cumplen las especificaciones de la industria fotovoltaica y del silicio metalúrgico (ANM et al., 2025). La información geoquímica del Servicio Geológico Colombiano describe la distribución regional del SiO_2, pero no está orientada a los niveles de impurezas que exige el silicio de alta pureza. La oportunidad más cercana es, por tanto, la caracterización y el beneficio del cuarzo de alta pureza.

Si llegan a darse procesos de extracción minera para la producción de bienes vinculados a la cadena de valor fotovoltaica, estos deberían incorporar desde su diseño criterios de formalización, protección laboral y participación de las mujeres, que representan el 8,8 % del empleo en la minería industrial pero más del 70 % en la pequeña minería y la minería artesanal (Ministerio de Minas y Energía, 2020, 2026), actividades con mayor informalidad y vulnerabilidad laboral.

3.2 Procesamiento de materiales

Este macroeslabón comprende la producción de silicio solar, desde la reducción carbotérmica del cuarzo, que produce silicio metalúrgico, hasta la purificación que produce silicio de grado solar. Más de un tercio (36 %) de sus insumos son bienes de capital, como hornos de arco eléctrico, intercambiadores de calor y electrodos de grafito. La concentración global en China responde a su política industrial y al acceso a electricidad barata en un proceso intensivo en energía y en escala, las plantas de polisilicio por debajo de 50.000 toneladas anuales difícilmente alcanzan los umbrales de eficiencia energética que exige la regulación china (ARENA, 2026). Además, el mercado se encuentra en sobrecapacidad, rondando los 3,4 millones de toneladas anuales en 2024 frente a una producción de aproximadamente 2,0 millones (HKUST Li & Fung Supply Chain Institute, 2025), que deprime los precios.

A nivel nacional se mantiene un alto potencial, pues el 40 % de los insumos de este macroeslabón tiene un fabricante potencial, la proporción más alta entre los macroeslabones de la cadena, frente al 24 % con fabricante directo. Existen capacidades en gases industriales (Linde y Messer), hornos y equipos térmicos (CM Ingeniería Térmica y Strotech) y siderurgia eléctrica, aunque ninguna empresa tiene experiencia en silicio de grado solar. La capacidad potencial más relevante es el silicio metalúrgico, donde Colombia reúne el recurso natural, el proceso y una industria análoga en operación.

Si el país logra producir silicio metalúrgico, el paso siguiente no tendría que ser la ruta química del polisilicio, altamente intensiva en capital y energía. Existe una ruta alternativa por medio del silicio metalúrgico mejorado que ha demostrado ser viable en comparación con el polisilicio en costo y calidad. Su uso reduce en más del 20 % las emisiones asociadas a la electricidad fotovoltaica (Méndez et al., 2021) y las celdas PERC multicristalinas fabricadas con este material alcanzan una eficiencia promedio de 20,1 %, frente a 20,41 % con polisilicio (Forniés et al., 2019).

Finalmente, tres cuellos de botella condicionan esta apuesta. El primero es energético, la reducción carbotérmica consume entre 11 y 13 MWh y emite entre 4,7 y 5 toneladas de CO_2 por tonelada de silicio metalúrgico (Hoover et al., 2024), una demanda que choca con un sistema eléctrico sensible al clima y a la volatilidad de los combustibles, lo que hace que se dificulte el surgimiento de este tipo de proyectos electrointensivos que necesitan precio y firmeza claros a largo plazo. El segundo es la escala que determina la rentabilidad, aunque el silicio metalúrgico tiene una escala mínima eficiente menor que la del polisilicio y mercados distintos del fotovoltaico. El tercero es la escasez de personal calificado en estos segmentos, esto es crucial ya que las empresas tienen menos probabilidades de sobrevivir cuando el conocimiento clave es complejo y se basa en la experiencia, como ocurre en la refinación de silicio (Hipp y Binz, 2020).

3.3 Manufactura

La manufactura reúne 391 insumos en seis eslabones de producto y concentra la mayor intensidad tecnológica de la cadena, el 42 % de sus insumos son componentes eléctricos y solo el 17,6 % tiene fabricante nacional directo. Dentro del duopolio, China domina la maquinaria de proceso que transforma físicamente el material (47 % de los bienes de capital), mientras Estados Unidos domina los instrumentos de ensayo y los sensores de precisión (81 % de los insumos de medición).

3.3.1 Módulos fotovoltaicos

El eslabón abarca desde el crecimiento del lingote y el corte de obleas hasta la fabricación de celdas, su interconexión, la laminación y el enmarcado del módulo. La fabricación nacional asociada no corresponde a módulos ni a celdas, sino a gases de proceso, hornos y químicos auxiliares. Para Colombia, la dependencia tiene dos caras: frente a China, una competencia de costos y de ecosistema productivo; frente a Estados Unidos, una dependencia de bienes de capital que no se resuelve por vía arancelaria, porque no hay industria nacional que los produzca.

Sin embargo, existen capacidades parciales y dispersas a lo largo del proceso, se evidencia extrusión y anodizado de aluminio con calidad suficiente para marcos de módulo (Alúmina), conductores de cobre (Procables y Centelsa) y una base metalmecánica de perfilería y estructuras (Gonvarri Solar Steel Colombia) respaldada por la siderurgia nacional, gabinetes (Atielec Industrial e Industrias Rebra). En encapsulantes y respaldo posterior hay empresas de transformación de polímeros y películas multicapa, como Poliway en EVA y Plastilene en PET, que atienden otros mercados y podrían adaptarse para atender el fotovoltaico. La entrevista E4 ilustra que parte de esta capacidad no se activa por falta de información, un caso particular nos mostraba cómo una empresa de construcción de cubiertas y soluciones en aluminio compuesto, con más de quince años en el mercado, desconocía si sus materiales servían para componentes fotovoltaicos, aunque manifestaba estar interesada en ingresar si identificaba una oportunidad comercial clara.

En la estructura de costos de un módulo la celda tiene una participación de alrededor del 45 %, el vidrio frontal un 19 %, el marco de aluminio un 14 %, encapsulantes el 7 %, cintas e interconexión un 6 % y la caja de conexiones y la lámina posterior un 5 % y 4 %, respectivamente (PVKnowhow, 2023). Si Colombia produjera vidrio, marco, cableado, caja de conexiones y empaque, e importara celda, encapsulante y respaldo posterior, el contenido nacional rondaría el 40-45 % del costo de materiales del módulo. Con la reconversión de la industria de películas podría acercarse al 55-60 % y la celda quedaría como el único componente sin sustituir.

El ensamblaje enfrenta cuatro restricciones. La primera es la escala, dado que el volumen necesario para competir con los módulos importados va de 800 MW anuales en Indonesia a 3,2 GW en Alemania, según las condiciones laborales, energéticas, logísticas y productivas de cada país (Dehghanimadvar et al., 2022). Con una demanda cercana a 1,9 GW anuales, según estimaciones propias, en un escenario de transición energética justa, el ensamblaje nacional sería evaluable, pero su sostenibilidad dependería de una demanda previsible y de una estrategia exportadora hacia América Latina y el Caribe. La segunda es el precio, la sobreoferta china redujo los precios de los módulos a menos de la mitad desde comienzos de 2023, llevándolos a mínimos históricos, con márgenes netos negativos para los fabricantes (IEA, 2024b), de modo que el país entraría tarde a una industria con rendimientos crecientes ya capturados (Reinert, 2007). La tercera es que los 35 equipos de proceso identificados no tienen sustituto nacional ni regional y concentran gran parte del flujo inicial de la inversión. La cuarta es una infraestructura de calidad que cubre solo parcialmente los ensayos de las normas IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) exigidas por el RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas) (sección 4).

En conclusión, la oportunidad está en las etapas posteriores a la celda (laminación, enmarcado, cableado, pruebas y empaque), mediante una estrategia de ensamblaje orientada al mercado regional, con compromisos graduales de contenido nacional y apoyos estatales condicionados a desempeños verificables. La Alianza Solar Internacional (2023) identifica el ensamblaje de módulos e inversores como un punto de entrada viable para países que parten de una posición de dependencia tecnológica y productiva.

3.3.2 Vidrio solar

El vidrio solar es el eslabón de manufactura con menor concentración de orígenes en Estados Unidos y China (57,1 %) y con mayor peso de la capacidad potencial, de sus 50 vínculos empresa-insumo, 28 corresponden a fabricantes potenciales, entre ellos productores de vidrio arquitectónico y de envases, de minerales industriales, de pigmentos y aditivos cerámicos y de hornos industriales. Su distribución territorial, además, rompe el patrón bogotano, con Antioquia, Cundinamarca y Bogotá empatadas en nueve empresas cada una.

La dispersión de proveedores responde en parte a las características físicas del producto, ya que este representa alrededor del 70 % del peso de un panel (Tamal et al., 2025) y por su volumen y fragilidad, tiene una baja relación valor-peso que encarece el transporte a larga distancia y crea una protección natural frente a proveedores lejanos, a diferencia de lo que ocurre con componentes electrónicos con mayor valor por unidad de peso. Sin embargo, el vidrio solar exige un bajo contenido de hierro para reducir la absorción óptica (Toledo Engineering Co., 2026), un templado especial y recubrimiento antirreflectante (Greentec Glass Co. Ltd., 2026). La barrera principal no es la ausencia de industria, sino el desarrollo de las especificaciones de proceso y del control de calidad necesarios para alcanzarlas.

Colombia tiene industria de vidrio plano con firmas de escala continental como Tecnoglass y Vidrio Andino, disponibilidad doméstica de arena sílica y caliza, y capacidad de templado térmico instalada para vidrio arquitectónico y automotriz. Por eso el vidrio solar es uno de los candidatos más sólidos para una estrategia de contenido nacional, considerando que representa entre el 10 % y el 25 % del costo total de un módulo (Allsopp et al., 2020) y su producción local reduciría tiempos y costos de transporte.

Dentro de los cuellos de botella se identifican: primero, la capacidad de fabricar recubrimientos antirreflectantes, para la cual se identificó un solo fabricante potencial. El segundo es un problema clásico de complementariedad, en el que una línea de vidrio flotado necesita un mercado de módulos que hoy no existe, porque el único ensamblador nacional identificado opera a escala reducida, y el ensamblador necesita a su vez un proveedor de vidrio. Es la falla de coordinación que Hirschman (1958) identificó como justificación de la intervención estatal y que ningún incentivo individual resuelve. El tercero es la incertidumbre, dado que la capacidad instalada de vidrio plano atiende mercados consolidados como la construcción y la industria automotriz, de modo que destinar nueva capacidad al vidrio solar exige señales de demanda claras y confiables.

3.3.3 Electrónica de potencia

Los tres tipos de inversor comparten núcleo tecnológico, pero con márgenes distintos de participación nacional. El string y el microinversor son los eslabones más cerrados de la cadena, sus insumos son sobre todo componentes eléctricos, como semiconductores de potencia, procesadores digitales de señal, condensadores y transformadores de alta frecuencia, de los cuales, ninguno proviene de América Latina y el país no tiene industria de semiconductores, diseño de electrónica de potencia a escala comercial ni ensamblaje de inversores string. Una de las causas es la concentración global del sector, donde China reunía en 2025 cerca del 80 % de la capacidad mundial de fabricación de inversores (IEA, 2026), con el conocimiento concentrado en las firmas con larga trayectoria, lo que explica las bajas tasas de entrada desde países periféricos (Hipp y Binz, 2020), y la arquitectura sellada del producto limita la desagregación geográfica de su producción.

No obstante, existe una base de manufactura electrónica, con fabricantes de circuitos impresos y tarjetas como Microcircuitos y Colcircuitos y firmas de diseño, ensamble y pruebas funcionales, aunque los componentes que se montan en la tarjeta (semiconductores, circuitos integrados de control y procesadores de señal) son importados. Hay también capacidad de servicio en diagnóstico, reparación, gestión de garantías y actualización de firmware, con empresas fuera del triángulo Bogotá-Medellín-Cali, como NESolar en Barrancabermeja y Visoluciones en Tunja. Para un país que no fabrica el equipo, el valor de este eslabón está en el servicio, pero enfrenta un cuello de botella contractual: en muchos casos el fabricante controla las herramientas de diagnóstico, los códigos de configuración, la documentación técnica y los repuestos.

El inversor central tiene una dinámica distinta: se integra en estaciones de potencia de cientos de kilovatios a varios megavatios que incorporan transformador, equipos de media tensión y protecciones, por lo que pesan más los componentes electromecánicos y sus orígenes se distribuyen entre diez países, frente a cuatro en el string. Gabinetes, bastidores, barras colectoras, bandejas portacables y puesta a tierra son bienes metalmecánicos estandarizados que ya se fabrican en el país, y la firma con más vínculos en el eslabón es la filial colombiana de una multinacional de equipamiento eléctrico con producción local de tableros y celdas. Existe además una industria de tableros y gabinetes metálicos (Proeléctricos Soluciones, Atielec Industrial, Industrias Rebra) con trayectoria en subestaciones. La oportunidad es la integración local, importando el núcleo electrónico y ensamblándolo con gabinetes, cableado, barras, puesta a tierra e interfaces de media tensión de fabricación nacional.

Esa apuesta enfrenta cuatro restricciones, la primera es el modelo de suministro de los fabricantes, que no deja espacio para desagregar el producto salvo que un incentivo o una exigencia regulatoria lo obligue. La segunda es la garantía, porque un ensamblador nacional debe responder por el equipo integrado, lo que genera resistencia de desarrolladores y financiadores. La tercera es la escala, ya que el número de inversores centrales instalados cada año no justifica por sí solo una línea de integración sin orientación al mercado regional. La cuarta es la validación regulatoria, las Resoluciones CREG 060 de 2019, 148 de 2021 y 101 011 de 2022 exigen modelos de simulación para

el Centro Nacional de Despacho (CND), y el Acuerdo CNO 1954 de 2025 exige validarlos contrastando simulaciones con pruebas en planta. Esa información la suele proveer el fabricante y aunque el país tiene capacidad académica de simulación, carece de infraestructura de ensayos a escala de potencia articulada con esa validación.

Finalmente, la cadena magnética ofrece un punto de entrada transversal, se identifica que los transformadores flyback de alta frecuencia, uno de los componentes de mayor valor después de los semiconductores, tienen producción nacional (Magnetrón), y el transformador de aislamiento de salida cuenta con dos fabricantes directos y dos potenciales. Como transformadores e inductores son demandados por los tres formatos de inversor y por los sistemas de almacenamiento, esta convergencia permite articular varios segmentos de la cadena a la vez.

3.3.4 Batería de litio-ferrofosfato

La batería LFP se organiza en cuatro subprocesos de naturaleza muy distinta: la celda, el sistema de gestión (BMS), la carcasa y los conectores. Aunque China aparece como origen del 23,3 % de los insumos, la celda, que concentra la mayor parte del valor del sistema, se fabrica mayoritariamente allí; el país asiático reúne cerca del 85 % de una capacidad mundial de fabricación de celdas que en 2024 superó los 3 TWh, unas tres veces la demanda global (IEA, 2025). Colombia no produce grafito de grado batería, precursores ni materiales activos catódicos, ni celdas de ion-litio y la información geológica disponible no identifica recursos de litio explotables (Servicio Geológico Colombiano, 2023), por lo tanto, la fabricación de celdas está fuera del horizonte de corto plazo.

Las oportunidades están en el resto del sistema, que reúne 47 de los 73 insumos del eslabón, es decir, gestión electrónica, gestión térmica, cableado, conectores y carcasa. Existen fabricantes nacionales de gabinetes (Atielec Industrial, Industrias Rebra), la cubierta de aluminio (Alúmina), el sellado (Sika Colombia), la tornillería (Procolpartes y Forjas Bolívar) y las terminales de cobre estañado (Procables). La base electrónica descrita en la sección 3.3.3 podría sostener módulos de sensado para el BMS, y TRONEX tiene experiencia directa en baterías $LiFePO_4$.

En ensamblaje y segunda vida operan Favelca, que fabrica baterías con celdas importadas, y BATx, que diseña y ensambla paquetes con celdas recuperadas. En la química del precursor hay fabricantes potenciales como Fosfatos del Huila y Cabot Colombiana, que además son dos de los pocos puntos de la manufactura fuera del triángulo Bogotá-Medellín-Cali, aunque la distancia entre el grado industrial y el grado batería (pureza, control de contaminantes, tamaño de partícula y estabilidad química) debe verificarse antes de plantear cualquier política. La trayectoria propuesta se enfoca en profundizar los procesos de ensamblaje nacional de los packs, incorporando progresivamente gabinete, estructura, cableado, gestión térmica, BMS y monitoreo, para avanzar después hacia el diseño propio de BMS y posteriormente, hacia la adaptación de materiales nacionales a especificación de grado batería.

Se identifican tres cuellos de botella, el primero es la certificación, el RETIE exige para las baterías de almacenamiento ensayos basados en normas como IEC 62619 y UL 9540, pero la única acreditación nacional identificada, la de TRONEX, cubre pilas primarias de zinc-carbón y alcalinas y el directorio de ONAC no registra laboratorios acreditados para baterías de ion-litio, lo que obliga a recurrir a ensayos en el exterior. El segundo es la escala, la Resolución CREG 101 113 de 2026 estableció mecanismos para incorporar y remunerar el almacenamiento en el SIN, pero la demanda nacional es incipiente frente a una oferta internacional en sobrecapacidad. Según los actores entrevistados (E8), esa demanda dependerá de que la regulación reconozca el aporte de las baterías a la confiabilidad del sistema y aproveche grandes bancos de baterías para dar estabilidad a la red, en lugar de equipos costosos como los compensadores síncronos. El tercero es la competitividad, según el sondeo, la base metalmecánica que fabricaría gabinetes, estructuras y terminales tiene desventajas de calidad y precio frente a los componentes importados.

3.4 EPC e instalación

Este macroeslabón reúne el balance de sistema eléctrico, que concentra dos tercios de sus insumos, las obras civiles, la instalación y las estructuras de soporte. Es el de mayor cobertura productiva de la cadena, con el 61,5 % de sus insumos con fabricante nacional directo, pero también el de orígenes más concentrados, donde

Estados Unidos y China son el principal origen, representando el 78,8 % de sus insumos, por encima de la manufactura. La frontera entre producción nacional e importación la definen el peso, el volumen y la complejidad tecnológica de los bienes, los insumos genéricos y de alta intensidad logística, como cemento, acero de refuerzo, estructuras galvanizadas y cables de cobre y aluminio, cuentan con producción nacional (Centelsa, Procables, Cementos Argos, Gerdau Diaco), mientras los bienes livianos, especializados o sujetos a certificación se importan. Además, por medio de la entrevista (E6), se identifica que algunas empresas nacionales diseñan y patentan, pero contratan con proveedores internacionales que los producen con mejor calidad y menor costo.

El sondeo confirma este patrón desde la demanda: de las 27 organizaciones de EPC e instalación que participaron en el levantamiento de información, 24 contratan localmente la mano de obra de instalación, 20 el cableado y los componentes eléctricos, 18 las estructuras metálicas y 17 las obras civiles y la ingeniería, mientras 15 se abastecen de los equipos principales de forma mayoritaria o totalmente internacional y 22 identifican a China como el origen principal de sus importaciones. Los importadores entrevistados coinciden en que los productos de mayor demanda (paneles, inversores, controladores y baterías) se importan, aunque algunos podrían fabricarse en el país (E5), por tanto, el límite está en la ausencia de oferta nacional competitiva en los componentes de mayor valor.

La mayor oportunidad se encuentra en las estructuras de montaje fijas y de seguimiento, apoyadas en la base metalmecánica existente, con cuatro restricciones identificadas. La primera es la certificación, dado que componentes que el país ya fabrica, como el cable solar, deben cumplir normas específicas cuyo ensayo y certificación encarecen y demoran la entrada de nuevos fabricantes. La segunda es territorial, Bogotá reúne 119 de las 253 empresas del macroeslabón, mientras los proyectos de generación a gran escala se instalan en La Guajira, Cesar, Atlántico, Córdoba y Tolima. La tercera y la cuarta, señaladas por el sondeo, son el acceso a financiamiento, coherente con una estructura dominada por micro y pequeñas empresas y los trámites de conexión ante los operadores de red (sección 4). Adicionalmente, existe un importante espacio para el fortalecimiento del ecosistema solar, algunos actores perciben que las empresas trabajan de manera aislada, sin espacios que les permitan asociarse para asumir proyectos de mayor escala, como granjas solares (E9).

3.5 Operación y mantenimiento

Es el macroeslabón más pequeño de la cadena en términos de insumos asociados, dado que su valor está en los servicios relacionados, su composición está dominada por la inspección, el diagnóstico, la limpieza y la analítica de desempeño. Es también donde se concentra el empleo, del total de jornadas laborales que demanda una planta de 50 MW a lo largo de su vida útil, el 56 % corresponde a operación y mantenimiento, frente al 22 % de manufactura y aprovisionamiento y el 17 % de instalación y conexión (IRENA, 2017).

Los servicios digitales asociados a la operación (sistemas SCADA, plataformas de monitoreo, adquisición de datos, analítica de desempeño y gestión del mantenimiento) no dependen exclusivamente de soluciones importadas, en Colombia existen empresas que desarrollan e integran sistemas SCADA y plataformas propias de monitoreo, y en el sondeo algunas reportan software propio y otras adaptan herramientas de terceros, con la exportación de servicios avanzados a América Latina como horizonte.

La oportunidad de desarrollo nacional se encuentra en profundizar las capacidades locales de integración, analítica, gestión de activos, mantenimiento predictivo y desarrollo de plataformas digitales, aumentando la captura nacional de valor en los servicios asociados a la operación. Además, existen capacidades latentes en detección de anomalías, modelamiento de degradación y protocolos de limpieza adaptados al clima tropical, intensivas en conocimiento y poco dependientes de bienes de capital importados. Sin embargo, de las 26 empresas identificadas solo cinco se dedican exclusivamente a este servicio, con oferta de termografía con drones, software de supervisión, robots de limpieza y corte de vegetación; para las restantes, el mantenimiento es una línea más del negocio de EPC, de modo que aún no se consolida como actividad autónoma.

Los principales cuellos de botella son la dependencia tecnológica, el acceso a repuestos y la disponibilidad de personal especializado. La dependencia tecnológica se manifiesta en la supeditación al software propietario y al firmware de los fabricantes, que no restringe la

disponibilidad (fue la limitación menos reportada en el sondeo), pero genera pagos recurrentes al exterior. A esto se suma el acceso a repuestos, entre las principales restricciones del eslabón, que refleja el control de los fabricantes sobre la posventa descrito en la sección 3.3.3.

El tercer desafío se relaciona con el desarrollo de capacidades laborales especializadas de O&M de plantas fotovoltaicas, particularmente en mantenimiento predictivo, termografía, analítica de datos, operación de drones, almacenamiento y calidad de energía. Aunque Colombia cuenta con programas de formación en instalación y mantenimiento de sistemas solares fotovoltaicos, es necesario evaluar si la oferta actual responde a los requerimientos técnicos de las plantas de mayor escala y si existen brechas en la certificación de competencias laborales específicas para su operación y mantenimiento especializado.

3.6 Economía circular

Este macroeslabón registra los flujos de materiales al final de la vida útil de módulos y baterías. Las empresas más conectadas son distribuidoras y exportadoras de chatarra metálica ubicadas en los puertos, y la cadena nacional se concentra en la recolección, el almacenamiento, el desensamble y la recuperación de materiales de aparatos eléctricos y electrónicos, mientras las fracciones de mayor valor o que requieren procesos especializados se exportan para completar su valorización.

En este macroeslabón se hace evidente el intercambio desigual ya que el país importa los bienes de mayor contenido tecnológico y las etapas de mayor valor agregado del reciclaje se desarrollan fuera del país, mientras conserva los materiales de mayor peso y menor valor unitario, mostrando además el espacio hacia el cual podría impulsarse la capacidad productiva nueva y existente.

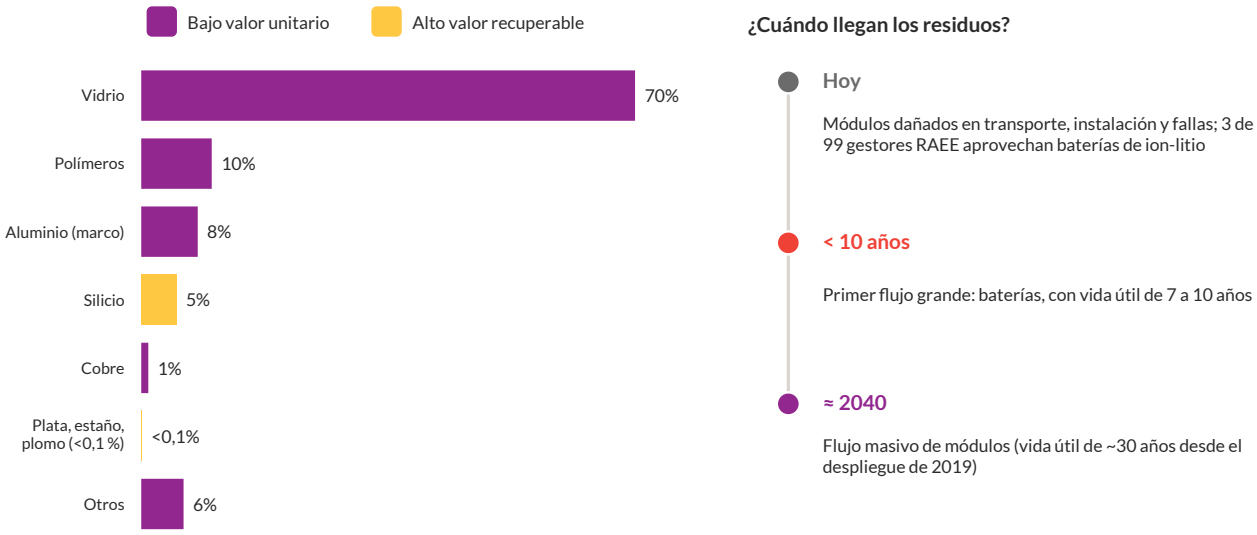
El flujo masivo de residuos de módulos fotovoltaicos se espera hacia la década de 2040, considerando que el despliegue a gran escala en Colombia comenzó en 2019 y que su vida útil de diseño ronda los treinta años (IRENA e IEA-PVPS, 2016). No obstante, ya se generan residuos por daños durante el transporte y la instalación, fallas técnicas y reemplazos anticipados. Desde las organizaciones de recicladores se advierte la importancia de desarrollar, desde ahora, capacidades nacionales para procesar estos materiales (E11). Asimismo, señalan que cada vez más organizaciones de recicladores buscan convertirse en gestores de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) (E11), lo que representa una oportunidad para vincular a esta población al macroeslabón de reciclaje y aprovechamiento. En contraste, los sistemas de almacenamiento asociados a la generación fotovoltaica tienen una vida útil estimada de siete a diez años (Smith et al., 2017), por lo que los residuos de baterías podrían constituir el primer flujo significativo de desechos tecnológicos de la transición energética, en un horizonte inferior a una década.

Adicionalmente, Colombia cuenta con un marco regulatorio de gestión posconsumo basado en el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), desarrollado desde la Ley 1672 de 2013 y el Decreto 284 de 2018, que se extendió a las baterías de ion-litio con la Resolución 851 de 2022, pero no a las celdas, ni a los módulos solares. Aun para las baterías, la capacidad de gestión es limitada, dado que, de 99 gestores licenciados de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, solo tres aprovechan baterías de ion-litio provenientes de la movilidad eléctrica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y GIZ, 2025), lo que deja a los ensambladores nacionales con obligaciones de posconsumo y pocos gestores especializados para atender las baterías estacionarias. En los módulos, la experiencia internacional muestra que la inversión llega con la obligación y no con el residuo, en Europa los paneles ya están sujetos a responsabilidad extendida, y Chile anunció en 2025 su primera planta industrial de reciclaje de paneles antes de que se fijaran las metas del decreto previsto por la Ley 20.920 (País Circular, 2025).

El diseño de las metas de reciclaje determina qué materiales resulta rentable recuperar. Considerando que entre el 80 % y el 85 % del peso de un módulo corresponde a vidrio, aluminio, cables y caja de conexiones, materiales de bajo valor unitario, mientras el silicio y la plata representan una fracción pequeña de la masa, pero una parte significativa del valor recuperable (Sachdeva, 2023). Una meta definida por peso puede cumplirse con desmantelamiento mecánico y trituración, sin desarrollar las rutas de delaminación e hidrometalurgia que exigen esos materiales, por eso conviene fijar metas por material o por valor recuperado.

Además, el vidrio enfrenta una barrera propia, que crecerá con los módulos bifaciales, donde alcanza cerca del 83 % del peso (Electric Power Research Institute, 2021), su contenido variable de antimonio, no siempre trazable, dificulta reincorporarlo a los hornos de vidrio plano, razón por la cual la industria fotovoltaica europea recomendó exigir la declaración de la composición del vidrio (European Solar Photovoltaic Industry Alliance, 2023).

Gráfico 5. Composición en masa de un módulo de silicio cristalino y horizonte de llegada de los residuos



Fuente: elaboración propia con base en IRENA e IEA-PVPS (2016), Sachdeva (2023), Smith et al. (2017) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y GIZ (2025).

El país cuenta con una cadena de recuperación de metales no ferrosos de escala relevante orientada a la exportación, con entre 70.000 y 76.000 toneladas anuales de chatarra no ferrosa exportadas en 2018 y 2019 según el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (2020) y con una red de gestores de residuos electrónicos con capacidades de recolección, clasificación y desmontaje, pero con brechas en transformación secundaria, recuperación de materiales de alto valor y logística inversa especializada. El sondeo identifica la logística y el transporte como el principal obstáculo y una demanda de materiales recuperados concentrada en uno o pocos compradores, que limita la formación de precios y desincentiva nuevas inversiones. Para los metales ferrosos, la industria siderúrgica fija el precio del material reciclado a partir del precio internacional de la materia prima menos un diferencial que se amplía cuando abunda la oferta local, de modo que el material recuperado se paga por debajo del virgen sin reconocer los costos ambientales evitados (E11). En cambio, el aluminio y el cobre, relevantes para el marco y el cableado de los módulos, se transan al precio internacional.

La oportunidad más clara se encuentra en las rutas hidrometalúrgicas para recuperar materiales de alto valor, particularmente plata, apoyada en las capacidades químicas y metalúrgicas, aunque estas no se han aplicado a residuos fotovoltaicos. Capacidades específicas como la delaminación selectiva y la recuperación de obleas siguen poco desarrolladas, y la literatura identifica precisamente la recuperación de plata y de obleas como la condición para que el reciclaje de módulos de silicio que hoy es poco atractivo económicamente resulte viable (Deng et al., 2019). Asimismo, este macroeslabón es una vía de inclusión, dado que cada vez más organizaciones de recicladores buscan convertirse en gestores reconocidos por la autoridad ambiental (E11), lo que permitiría vincular a esta población al crecimiento del flujo de residuos fotovoltaicos.

4. Cuellos de botella transversales

Del recorrido por los eslabones se identificaron nueve restricciones que se repiten a lo largo de la cadena. La Tabla 1 indica en qué macroeslabones aparecen y remite a las recomendaciones que responden a cada una.

Tabla 1. Cuellos de botella transversales por macroeslabón y recomendaciones que los atienden

Cuello de botella	Extracción	Procesa-miento	Manufac-tura	EPC e instalación	O&M	Economía circular	Recomen-daciones
Régimen de incentivos orientado a la importación y acceso a financiamiento	○	○	●	●	○	○	5.1
Conexión a la red			○	●			5.4
Escala, previsibilidad de la demanda y fallas de coordinación			●			●	5.1, 5.3, 5.4
Infraestructura de calidad parcial y fragmentada			●	●			5.2
Dependencia de bienes de capital y restricción externa	●	●	●				5.3
Información geológica insuficiente	●	●	○				5.2
Brechas de información técnica y débil articulación empresarial			●	●			5.3
Concentración territorial de la proveeduría	○	○	○	●	○	○	5.1
Capacidades laborales especializadas		●	●		●		5.2

● Identificado en el análisis del macroeslabón ○ Incidencia transversal

Fuente: elaboración propia a partir de las secciones 3 y 4, el sondeo y las entrevistas.

Parte de la evidencia proviene del trabajo de campo. En el sondeo, el acceso limitado a incentivos, subsidios o apoyo público fue la mayor limitación reportada, con restricciones financieras por encima de las tecnológicas en las microempresas, y los trámites ante los operadores de red fueron la mayor dificultad regulatoria: si los proyectos no se conectan, no se materializa la demanda que daría escala a la producción nacional. En calidad, CIDET y Luminotest tienen alcances acreditados de ensayo, y CIDET y QCERT de certificación, pero no cubren la calificación completa de módulos que exige el RETIE (IEC 61215, 61701 y 61730).

Estas restricciones se cruzan con dos brechas que el escalamiento puede reproducir (Gráfico 6). La primera es territorial: la proveeduría se concentra en el eje industrial andino, lejos de donde se instalan los proyectos a gran escala y de donde están las mayores necesidades energéticas; el desacople es de proveeduría y de servicios de mayor valor, no del empleo de instalación, que tiene arraigo local. La segunda es de género: la participación de las mujeres cae a medida que aumenta la exigencia técnica del cargo, una brecha que empieza en la formación (en la mayoría de las ingenierías la participación de las mujeres oscila entre el 7 % y el 18 %) y que el paso de tecnologías fósiles a limpias no ha modificado (Arias et al., 2022).

Gráfico 6. Brechas territoriales y de género en la cadena

Territorio: tres geografías que no coinciden

Proveeduría

80,5 %

de las empresas se encuentran en Bogotá, Antioquia, Cundinamarca y Valle del Cauca

Generación a escala

5

departamentos con los proyectos grandes: La Guajira, Cesar, Atlántico, Córdoba y Tolima

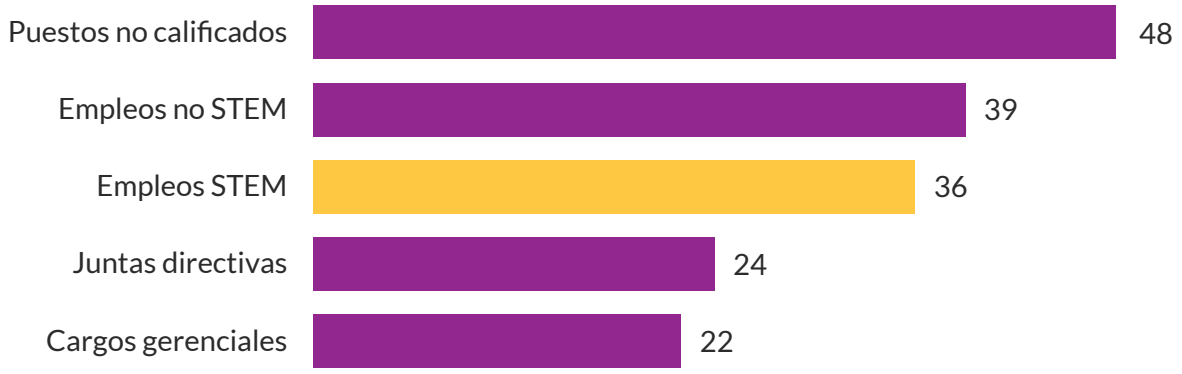
Necesidades insatisfechas

4

regiones con las mayores necesidades energéticas: Amazonía, Orinoquía y Pacífico.

Género: participación de las mujeres (%)

102 generadoras renovables de seis países de América Latina (Arias et al., 2022)



Colombia, sector minero-energético (MinEnergía, 2020)

76,4 %
del empleo del sector es masculino

15 %
de los roles técnicos y de campo los ocupan mujeres

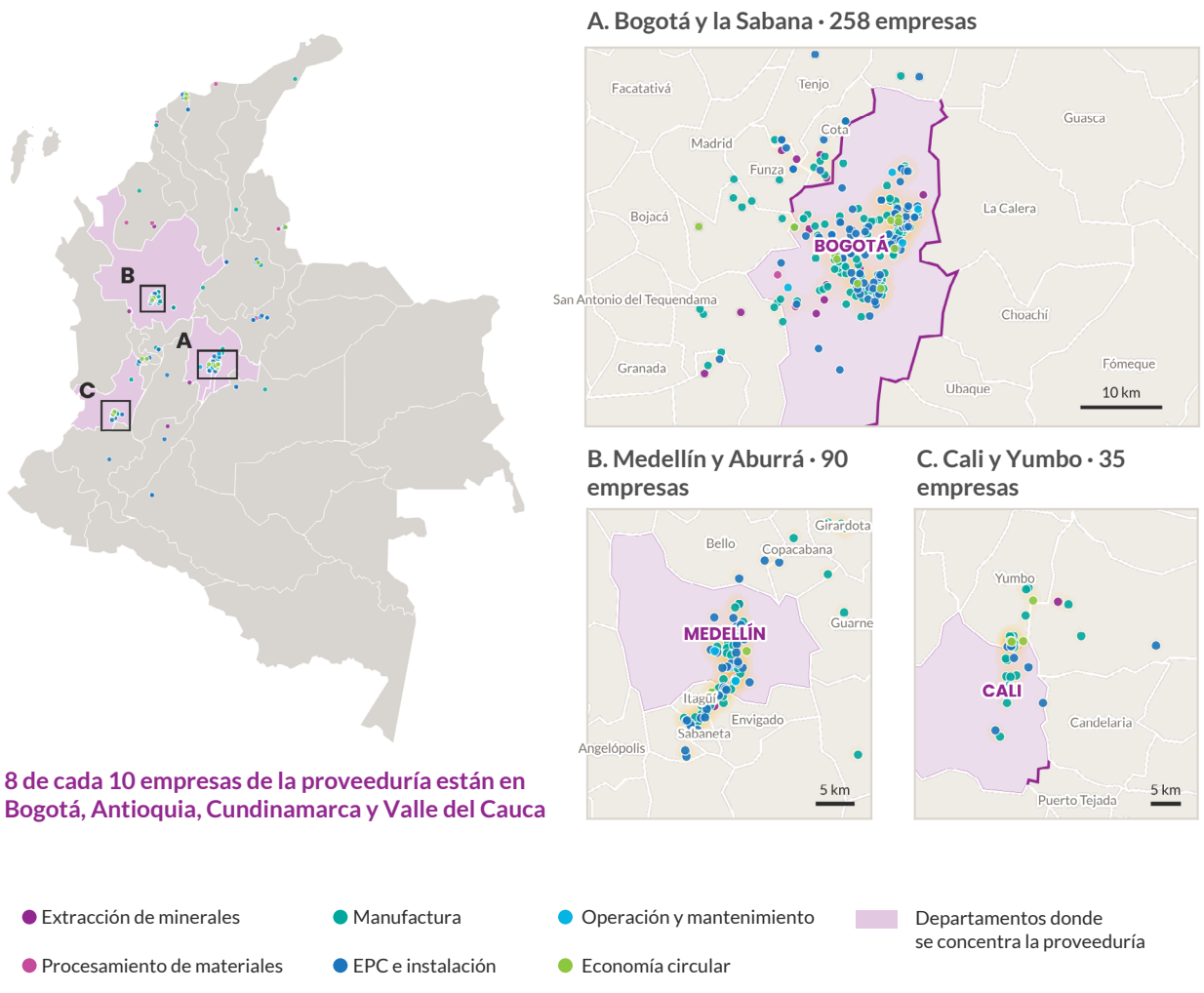
8,8 % vs. +70 %
mujeres en la minería industrial frente a la pequeña minería y la artesanal

16,9 %
de las empresas con medidas para proveedoras mujeres (4,5 % en energía; 4,2 % con metas)

Fuente: elaboración propia a partir del mapeo de 497 empresas; Ministerio de Minas y Energía (2020); Londoño Polo (2020)

El Gráfico 7 muestra la brecha territorial. Ocho de cada diez empresas de la proveeduría se ubican en Bogotá, Antioquia, Cundinamarca y Valle del Cauca, y dentro de ellos se agrupan tres polos principales: Bogotá y la Sabana, con 258 empresas; Medellín y el valle de Aburrá, con 90, y Cali y Yumbo con 35. En cambio, los cinco departamentos principales donde se instalan proyectos de generación a gran escala (La Guajira, Cesar, Atlántico, Córdoba y Tolima) reúnen solo 33 empresas, eso traduce el 6,6 % del total mapeado. Para los proyectos esto significa traer equipos, estructuras y servicios desde el interior del país.

Gráfico 7. Concentración territorial de la proveeduría de la cadena solar fotovoltaica



Fuente: elaboración propia a partir de SOLVERA (POLEN TJ, 2026), empresas georreferenciadas. Cada punto es una empresa, con el color de su macroeslabón principal.

Sin metas explícitas, el escalamiento puede generar empleo sin cambiar quién accede a los puestos de mayor calificación ni dónde se queda el valor; la Política Pública de Equidad de Género del Sector Minero-Energético, adoptada en 2026 con horizonte a 2035 (Ministerio de Minas y Energía, 2026), ofrece elementos que pueden ser incorporados como una medida para fortalecer el ecosistema y a la par reducir brechas.

5. Recomendaciones de política

Las recomendaciones se organizan en cuatro bloques que responden a los cuellos de botella de la Tabla 1: demanda y contenido nacional; infraestructura de calidad, certificación y conocimiento; escalamiento productivo; y condiciones habilitantes. Dos principios las atraviesan. El primero es que el apoyo público debe condicionarse a desempeños verificables, como en las experiencias exitosas de industrialización tardía (Amsden, 1989), y como enseña la sustitución de importaciones latinoamericana, donde la protección sin metas de desempeño se desvinculó del desarrollo de capacidades. El segundo es la credibilidad: la mitad de las organizaciones del sondeo proyecta que el país seguirá siendo importador, de modo que las reglas deben ser claras y estables.

5.1 Demanda y contenido nacional

- Armonizar los incentivos al despliegue con la política de desarrollo productivo. Establecer mecanismos de coordinación entre las entidades competentes en energía, comercio e industria para incorporar el mapeo de oferta nacional como insumo técnico para la determinación de la política arancelaria, conforme a las competencias y procedimientos vigentes. Paralelamente, evaluar, por la vía jurídica correspondiente, instrumentos específicos de apoyo a la fabricación nacional de componentes estratégicos para la transición energética, considerando las capacidades industriales identificadas y su potencial de escalamiento.
- Financiamiento para la producción. La banca comercial ya financia la instalación de sistemas solares, el reto es extender esa experiencia a quienes fabrican y proveen componentes. Para ello se propone diseñar, con Bancóldex y Findeter, una línea de redescuento que los bancos comerciales coloquen entre las micro y pequeñas empresas de la cadena, con capital de trabajo y crédito de inversión, respaldada por garantías del Fondo Nacional de Garantías para reducir el riesgo que perciben los bancos.
- Criterios de proveeduría regional y de género en la contratación pública. Incorporar en las licitaciones y procesos de contratación pública criterios verificables que ponderen la contratación de bienes y servicios con empresas del departamento donde se desarrolla el proyecto y con empresas y organizaciones con mayor presencia de mujeres, en articulación con los criterios diferenciales del régimen de compras públicas.
- Empleo local y participación de mujeres. Establecer metas verificables de empleo local y de participación femenina en las ocupaciones técnicas, de instalación, operación, mantenimiento y gestión de los proyectos, articuladas con procesos de formación y certificación para que la contratación local no se limite a las actividades de menor calificación. Los pliegos de las subastas de generación renovable deberían exigir el reporte del empleo desagregado por género y tipo de cargo, como línea base para hacer seguimiento a esas metas.

5.2 Infraestructura de calidad, certificación y conocimiento

- Completar la infraestructura de ensayo y certificación. Cofinanciar la ampliación y articulación de los alcances acreditados para cubrir progresivamente los ensayos de IEC 61215 e IEC 61730 en módulos y los requisitos de cables, conectores y protecciones de corriente continua. Adicionalmente, desarrollar capacidad acreditada de ensayo para baterías de ion-litio, y en el mediano plazo, infraestructura de ensayos a escala de potencia articulada con la validación de inversores que exige el CNO.
- Formación y certificación en operación, mantenimiento y servicio de inversores. Crear una línea formativa en mantenimiento predictivo, analítica de datos, termografía, drones, almacenamiento, calidad de energía y diagnóstico de inversores, articulada con las empresas que ya desarrollan estas capacidades y acompañada de una certificación laboral específica para O&M

fotovoltaica. La línea debe incluir metas de participación de mujeres y condiciones de acceso que consideren las responsabilidades de cuidado. En paralelo, exigir en los contratos de suministro de proyectos de gran escala la transferencia de capacidades de servicio a operadores nacionales.

- Investigación y desarrollo. Fortalecer posgrados, laboratorios y proyectos de I+D a partir de las capacidades de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad del Valle y la Universidad de los Andes así como las universidades, institutos técnicos y tecnológicos regionales de zonas priorizadas, en electrónica de potencia, almacenamiento, microrredes y gestión de energía, con mecanismos de cooperación con el sector empresarial y financiar protocolos de limpieza, mitigación de la suciedad y manejo de vegetación adaptados al clima tropical.

5.3 Escalamiento productivo

- Intervención conjunta en vidrio solar y ensamblaje de módulos. El vidrio solar debería ser la prioridad número uno de una política de contenido nacional en manufactura. Su primer paso es desarrollar la capacidad de recubrimiento antirreflectante. El segundo, estimar la posición de la estructura de costos colombiana para establecer si el ensamblaje local es competitivo. Si lo es, contratos de compra de largo plazo entre productores de vidrio y ensambladores, respaldados por garantías públicas y condicionados a estándares técnicos, metas de contenido nacional y competitividad de costos, permitirían que ambas inversiones se realicen a la vez. El ensamblaje debería dimensionarse para el mercado de América Latina y el Caribe, con contenido nacional creciente (marco, vidrio, cableado, caja de conexiones y empaque desde el inicio; encapsulante y respaldo posterior en una segunda fase) y un componente de transferencia tecnológica.
- Integración local del inversor central. Exigir que gabinete, bastidor, barras colectoras, cableado interno y puesta a tierra sean de fabricación e instalación colombiana, manteniendo el núcleo electrónico importado y negociar con los fabricantes esquemas de integración local que usen la previsibilidad de la demanda y el acceso a mercados regionales como incentivo para avanzar hacia componentes de mayor complejidad.
- Estudio y fortalecimiento de la cadena magnética. Caracterizar las capacidades técnicas, la estructura de mercado y los destinos de la producción nacional de transformadores e inductores.
- Desarrollo de proveedores metalmecánicos de precisión. Diagnosticar si las brechas de la metalmecánica nacional corresponden a precisión, escala, costos o certificación y acompañar a las empresas en su fortalecimiento, vinculándolas con compradores que garanticen demanda durante el escalamiento. Es un habilitador transversal para estructuras de montaje, gabinetes de inversores centrales y envolventes de almacenamiento y uno de los segmentos con mayor potencial según los actores de la cadena.
- Servicio de información técnica y articulación empresarial. A partir del mapeo de insumos, ofrecer fichas de requerimientos técnicos por componente y espacios de encuentro entre empresas de construcción, aluminio, polímeros, vidrio y química y los actores de la cadena, que faciliten también alianzas entre empresas de EPC para asumir proyectos de mayor escala.
- Ensamblaje de paquetes de baterías. Profundizar el ensamblaje nacional con celdas importadas, incorporando progresivamente gabinete, estructura, cableado, gestión térmica, BMS y monitoreo. Antes de cualquier política sobre materiales, verificar si los insumos químicos nacionales pueden alcanzar el grado batería.
- Silicio metalúrgico. Condicionar la prefactibilidad a los resultados de la caracterización del cuarzo y a la existencia de contratación eléctrica de largo plazo y si en una segunda fase se considera la purificación, evaluar la ruta del silicio metalúrgico mejorado por su menor intensidad energética y de emisiones.
- Bienes de capital. La dependencia de bienes de capital no se resuelve en el horizonte de esta agenda, por eso la secuencia prioriza los segmentos menos intensivos en ellos, y el financiamiento público de equipos importados para proyectos de la cadena debería condicionarse a la transferencia de capacidades de instalación, mantenimiento y operación a personal nacional.

5.4 Condiciones habilitantes

- Conexión a la red. Reducir y hacer previsibles los tiempos de conexión mediante la simplificación de los trámites de la Resolución CREG 174 de 2021 para los proyectos bajo su alcance y una mejor coordinación del proceso de asignación de capacidad de transporte de la Resolución CREG 075 de 2021 para los que requieren acceso al SIN.
- Contratación eléctrica de largo plazo para proyectos electrointensivos. Diseñar un esquema con precio y firmeza definidos para el silicio metalúrgico, la fusión de vidrio y los gases industriales, condición de viabilidad de estos proyectos.
- Responsabilidad extendida para módulos, con metas por material. Incorporar los módulos fotovoltaicos al régimen de la Resolución 851 de 2022, con umbral y sistema de recolección y fijar metas diferenciadas por material o valor recuperado (plata, cobre, aluminio y silicio en módulos y materiales activos en baterías), acompañadas de una revisión de los mecanismos de formación de precios del material reciclado.
- Trazabilidad y reciclaje de alto valor. Exigir en las licitaciones y la contratación pública la declaración del contenido de antimonio del vidrio y del tipo de lámina posterior de los módulos y cofinanciar pilotos de separación del laminado, caracterización del vidrio recuperado y recuperación hidrometalúrgica de plata que aprovechen las capacidades químicas y metalúrgicas nacionales.
- Segunda vida de baterías. Ampliar la capacidad de gestión de baterías de ion-litio y desarrollar un marco para su reutilización, reacondicionamiento y remanufactura, con criterios de diagnóstico, seguridad, recertificación, responsabilidad y garantía, de modo que las baterías retiradas de vehículos eléctricos puedan destinarse a almacenamiento estacionario antes del reciclaje.
- Inclusión de las organizaciones de recicladores. Acompañar con formación técnica y apoyo al licenciamiento su tránsito hacia la figura de gestores de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, con criterios de formalización laboral y participación de las mujeres, para que el crecimiento del flujo de residuos fotovoltaicos genere empleo formal.

5.5 Secuencia

Las medidas tienen horizontes de maduración distintos según su relación actual con la cadena (Tabla 2).

Tabla 2. Hoja de ruta de la agenda de política por horizonte y bloque de recomendaciones

Bloque	Inmediato	Corto plazo (2 a 3 años)	Mediano plazo (3 a 7 años)	Largo plazo (más de 7 años)
Demanda y contenido nacional (5.1)	• Armonizar incentivos con la política productiva • Contenido nacional en estructuras, conductores e insumos de proceso • Metas de empleo local y de mujeres; reporte por género en subastas	• Crédito y garantías para mipymes • Pilotos de compras públicas con proveeduría regional y de género		
Calidad, certificación y conocimiento (5.2)	• Transferencia de capacidades de servicio en contratos de suministro	• Alcances acreditados para módulos y componentes de corriente continua • Ensayo de baterías de ion-litio • Formación y certificación en O&M	• Ensayos a escala de potencia articulados con la validación del CNO	• Formación avanzada e I+D en electrónica de potencia
Escalamiento productivo (5.3)		• Estudio de la cadena magnética • Proveedores metalmecánicos de precisión • Servicio de información técnica • Transferencia de capacidades en la financiación de bienes de capital • Costos del ensamblaje de módulos	• Vidrio solar y ensamblaje de módulos con perspectiva regional • Integración local del inversor central • Ensamblaje de paquetes de baterías • Exportación de servicios avanzados de O&M	• Silicio metalúrgico condicionado • BMS propio y precursores en grado batería • Rutas de purificación de menor intensidad energética
Condiciones habilitantes (5.4)	• Plazos previsibles de conexión • Responsabilidad extendida para módulos con metas por material • Declaración de antimonio en compras públicas	• Marco de segunda vida de baterías • Inclusión de organizaciones de recicladores	• Contratación eléctrica de largo plazo para proyectos electrointensivos • Pilotos de reciclaje de alto valor	

Fuente: elaboración propia.

6. Consideraciones finales

La cadena de valor solar fotovoltaica en Colombia tiene cobertura amplia y profundidad escasa. Casi todos los insumos encuentran un actor nacional, pero la mayoría lo hace como intermediario, el núcleo tecnológico es importado y las capacidades productivas que la cadena moviliza no son fotovoltaicas: son capacidades químicas, metalúrgicas y metalmecánicas construidas para otros mercados, que la transición puede aprovechar sin haberlas generado.

Las diferencias entre macroeslabones permiten ordenar el espacio de lo posible en cuatro tipos de segmento, cada uno con una política distinta (Gráfico 7): contenido nacional exigible hoy, reconversión de industrias análogas con apoyo público condicionado, captura de valor en servicios y dependencia no sustituible en el horizonte de esta agenda. En este último, la política no debe intentar sustituir importaciones, sino evitar encarecer los equipos y negociar la transferencia de capacidades. Esta secuencia responde también a una restricción de economía política: la mayoría de los actores de la cadena son importadores e instaladores, para quienes la importación es la condición de su negocio.

Gráfico 8. Oportunidades por macroeslabón según el tipo de capacidad disponible



Fuente: elaboración propia.

Por último, la cadena se ha desarrollado en los territorios que ya concentraban el valor agregado nacional, desacoplada de aquellos donde se instalan los proyectos y donde la energía solar tiene su mayor potencial transformador. El empleo de instalación tiene arraigo local, pero es discontinuo y está atado al flujo de proyectos. Por eso, además de descarbonizar la matriz eléctrica, una transición energética justa debe contribuir a cerrar las brechas territoriales y de género mediante formación técnica, criterios de proveeduría regional y empleo local, y la formalización de los eslabones inicial y final de la cadena: la minería y el reciclaje.

7. Anexos

Durante la realización de este proyecto investigativo, se desarrollaron 11 entrevistas a diferentes actores relacionados con la cadena de valor de la energía solar fotovoltaica en Colombia. Cada entrevista se identifica por medio de un código (del E1 al E11); su descripción y principales hallazgos pueden consultarse a continuación:

Oportunidades de desarrollo de la cadena de valor solar en Colombia

Como parte de este proyecto investigativo se desarrolló SOLVERA Colombia, una plataforma interactiva que georreferencia a las empresas vinculadas con la cadena de valor de la energía solar fotovoltaica en el país. La plataforma reúne cerca de 500 empresas y más de 1.500 vínculos entre empresas e insumos, clasificados por macroeslabón y por tipo de actor (fabricante, importador o comercializador). Permite buscar empresas, filtrarlas por eslabón y ver su distribución por departamento. Puede consultarse en el siguiente enlace:

https://polentj.org/solvera-colombia/

8. Referencias

Agencia Nacional de Minería. (2023). *Resolución 1006 del 30 de noviembre de 2023, por la cual se determinan los minerales de interés estratégico para el país.*

Agencia Nacional de Minería, Ministerio de Minas y Energía y Unidad de Planeación Minero-Energética. (2025). *Cadenas productivas: arenas silíceas en la transición energética en Colombia, retos y oportunidades.* https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Documento_Arenas_siliceas_ANM_MME_UPME_16-4-2025.pdf

Alianza Solar Internacional. (2023). *Building resilient global solar PV supply chains.* International Solar Alliance.

Allsopp, B., Orman, R., Johnson, S., Baistow, I., Sanderson, G., Sundberg, P., Stålhandske, C., Grund, L., Andersson, A., Booth, J., Bingham, P. and Karlsson, S. (2020). Towards improved cover glasses for photovoltaic devices. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *28*(11), 1187-1206. https://doi.org/10.1002/pip.3334

Amsden, A. H. (1989). *Asia's next giant: South Korea and late industrialization*. Oxford University Press.

Arias, K., López, D., Camino, S., Weiss, M., Walsh, D., Gouvea Gomes, L. y Carvalho Metanias Hallack, M. (2022). Transición verde y sesgo de género: un análisis de las empresas generadoras de energía renovable en América Latina (Nota Técnica IDB-TN-2546). Banco Interamericano de Desarrollo.

Australian Renewable Energy Agency (ARENA). (2026). Australian Silicon (AusSi) Study – Knowledge Sharing Report.

Banco de la República. (2023). *Informe de política monetaria: cuentas externas de Colombia.*

Becerra-Fernández, M., Sarmiento, A. T. y Cárdenas, L. M. (2023). Sustainability assessment of the solar energy supply chain in Colombia. *Energy, 282*, 128350. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544223021291

BloombergNEF. (2023). *Global lithium-ion battery supply chain ranking 2023.*

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2019). *Resolución CREG 060 de 2019*. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0060_2019.htm

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2021a). *Resolución CREG 075 de 2021.*

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2021b). *Resolución CREG 148 de 2021.* https://gestornormativo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/400febffb3d0a8d105258783005471d6/$-FILE/Creg148-2021.pdf

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2021c). *Resolución CREG 174 de 2021.* https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0174_2021.htm

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2022). *Resolución CREG 101 011 de 2022.*

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2026). *Resolución CREG 101 113 de 2026, por la cual se definen los mecanismos para incorporar sistemas de almacenamiento de energía eléctrica con baterías (SAEB) en el Sistema Interconectado Nacional.* https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_101-113_2026.htm

Congreso de la República de Colombia. (2013). *Ley 1672 de 2013, por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.*

Congreso de la República de Colombia. (2014, 13 de mayo). *Ley 1715 de 2014, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Diario Oficial No. 49.150.*

Congreso de la República de Colombia. (2021, 10 de julio). *Ley 2099 de 2021, por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético y la reactivación económica del país.*

Congreso Nacional de Chile. (2016). *Ley 20.920 de 2016, que establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.*

Consejo Nacional de Operación. (2025). *Acuerdo 1954 de 2025.*

DANE. (2026). *Colombia - Estadísticas de Importaciones - IMPO - 2025 a 2026* [Conjunto de microdatos]. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Colombia - Estadísticas de Importaciones - IMPO - 2025 A 2026

Dehghanimadvar, M., Egan, R., and Chang, N. L. (2022). Economic assessment of local solar module assembly in a global market. *Cell Reports Physical Science, 3(2), 100747.* https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.100747

Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z. and Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 109, 532-550.*

Electric Power Research Institute. (2021). *Solar photovoltaics: End-of-life management infographic.*

European Solar Photovoltaic Industry Alliance. (2023). *Recommendation on addressing uncertain antimony content in solar glass for recycling.*

Forniés, E., Ceccaroli, B., Méndez, L., Souto, A., Pérez Vázquez, A., Vlasenko, T. y Dieguez, J. (2019). Mass production test of solar cells and modules made of 100% UMG silicon: 20.76% record efficiency. *Energies, 12*(8), 1495. https://doi.org/10.3390/en12081495

Freire, W. (2025, 4 de noviembre). Valor de la energía solar: ¿cuánto cuesta de media la instalación? *Canal Solar.*

Gereffi, G., Humphrey, J. y Sturgeon, T. (2005). The governance of global value chains. *Review of International Political Economy, 12*(1), 78-104. https://doi.org/10.1080/09692290500049805

Greentec Glass Co. Ltd. (2026). *Solar glass.* https://www.greentecglass.com

Hernández, G. y Quintero, L. F. (2025). Cadena de valor de la industria fotovoltaica (Archivos de Economía). Departamento Nacional de Planeación.

Hipp, A. y Binz, C. (2020). Firm survival in complex value chains and global innovation systems: Evidence from solar photovoltaics. *Research Policy, 49*(1), 103876.

Hirschman, A. O. (1958). *The strategy of economic development*. Yale University Press.

HKUST Li & Fung Supply Chain Institute. (2025). Where the sun shines: The changing landscape of the global solar supply chain (Global Supply Chain Report). https://ustlfsci.hkust.edu.hk/sites/default/files/2025-12/Global_Supply_Chain_Report_DEC2025_Solar.pdf

Hoover, H., Bell, R. y Rippy, K. (2024). Emerging technologies for decarbonizing silicon production. *Journal of Sustainable Metallurgy, 10*(4), 1921-1932. https://doi.org/10.1007/s40831-024-00913-3

International Energy Agency. (2024a). *Advancing clean technology manufacturing: An Energy Technology Perspectives special report*. IEA. https://www.iea.org/reports/advancing-clean-technology-manufacturing

International Energy Agency. (2024b). Renewables 2024: *Analysis and forecast to 2030*. https://www.iea.org/reports/renewables-2024

International Energy Agency. (2025). *Global EV Outlook 2025*.

International Energy Agency. (2026). *Inverter supply chains and cybersecurity*.

International Renewable Energy Agency. (2017). *Renewable energy benefits: Leveraging local capacity for solar PV*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Jun/IRENA_Leveraging_for_Solar_PV_2017.pdf

International Renewable Energy Agency. (2026). *Renewable power generation costs in 2025*.

International Renewable Energy Agency e IEA-PVPS. (2016). *End-of-life management: Solar photovoltaic panels* (Informe IEA-PVPS T12-06:2016).

Londoño Polo, I. (2020, 24 de febrero). Más ingenieras y científicas: una apuesta que vale la pena. *Razón Pública*. Más ingenieras y científicas: una apuesta que vale la pena

Méndez, L., Forniés, E., Garrain, D., Pérez Vázquez, A., Souto, A. y Vlasenko, T. (2021). Upgraded metallurgical grade silicon and polysilicon for solar electricity production: A comparative life cycle assessment. *Science of the Total Environment, 789*, 147969. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147969

Ministerio de Minas y Energía. (2025). *En el actual gobierno se han recibido más de 13.400 solicitudes para obtener el certificado de incentivos tributarios*. https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/actual-gobierno-han-recibido-mas-13400-solicitudes-obtener-certificado-incentivos-tributarios/

Ministerio de Minas y Energía. (2020). Estudio sectorial de equidad de género para el sector minero-energético. Minenergía.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Resolución 851 del 5 de agosto de 2022, por la cual se establecen los lineamientos y requisitos de los sistemas de recolección y gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*.

Ministerio de Minas y Energía. (2024). *Resolución 40117 de 2024, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Libro 2: Productos objeto del RETIE*. https://www.minenergia.gov.co/documents/11565/3._Libro_2_-_Productos.pdf

Ministerio de Minas y Energía. (2026, 21 de julio). Resolución 40326 de 2026, por la cual se adopta la Política Pública de Equidad de Género del Sector Minero-Energético.

Nahm, J. (2017). Renewable futures and industrial legacies: Wind and solar sectors in China, Germany, and the United States. Business and Politics, 19(1), 68-106.

Organismo Nacional de Acreditación de Colombia. (2026a). *Certificado de acreditación 11-LAB-024: Corporación Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico* (CIDET). https://onac.org.co/certificados/11-LAB-024.pdf

Organismo Nacional de Acreditación de Colombia. (2026b). Acreditación 12-LAB-049: TRONEX S.A.S.

Osejo Knudson, M., Acevedo Gamboa, H. y Rodríguez Mur, I. (2025). *Guía técnica para la segunda vida y gestión integral de baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos.* Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2025/12/Guia_Baterias_AFT.pdf

País Circular. (2025, 30 de septiembre). Primera planta de reciclaje de paneles solares de Chile estará en Atacama. País Circular.

Parés Olguín, F. y Busch, P. (2024). *Cadenas de valor de energías renovables y almacenamiento de energía en América Latina y el Caribe* (Nota técnica). Banco Interamericano de Desarrollo. https://doi.org/10.18235/0013197

Prebisch, R. (1949). *El desarrollo económico de la América Latina y algunos de sus principales problemas.* CEPAL.

Presidencia de la República de Colombia. (2018). *Decreto 284 del 15 de febrero de 2018, por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015 en lo relacionado con la gestión integral de los RAEE.*

PVKnowhow. (2023). *Solar panel manufacturing plant cost breakdown.* https://www.pvknowhow.com/solar-panel-manufacturing-plant-cost-breakdown/

Reinert, E. S. (2007). *How rich countries got rich... and why poor countries stay poor.* Constable.

Sachdeva Michael, S. (2023, 1 de mayo). *Role of recycling for resilient solar photovoltaic supply chains.* Institute for Energy Economics and Financial Analysis. https://ieefa.org/resources/role-recycling-resilient-solar-photovoltaic-supply-chains

Servicio Geológico Colombiano. (2023). *Recursos minerales de Colombia, volumen 2.*

Smith, K., Saxon, A., Keyser, M., Lundstrom, B., Cao, Z. y Roc, A. (2017). *Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system.*

Tamal, C., Mohammad, D., Nathan, C. y Richard, C. (2025). Review of issues and opportunities for glass supply for photovoltaic production at multiterawatt scale.

Toledo Engineering Co. (2026). *Furnaces for low iron solar glass.*

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.* https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2023). *Boletín estadístico de minas y energía 2018-2022.*

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2025). *Plan energético nacional 2024-2054, tomo I.*

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2026a). *Plan 6GW+.* https://www.upme.gov.co/simec/plan-6gw/

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2026b). *La UPME elimina ciclos de radicación y agiliza acceso a incentivos tributarios* [Noticia]. Certificados UPME: incentivos tributarios para energías limpias

Vega Barbosa, C. (2020, 27 de septiembre). Gobierno modificará el decreto de exportación de chatarra. *El Espectador.* https://www.elespectador.com/economia/gobierno-modificara-el-decreto-de-exportacion-de-chatarra-article/

Villazón, K. (2022). *Categorización de minerales críticos para su uso en energía solar fotovoltaica* [Trabajo de grado de maestría, Universidad EAFIT].

World Economic Forum. (2024). *Movilización de la inversión en energías limpias en Colombia: soluciones para acelerar la financiación.*

pol·en
Transiciones Justas

@polentjcol
@polentjcol
POLEN Transiciones Justas
www.polentj.org