

El liderazgo de China en energía solar fotovoltaica y su impacto en el comercio internacional de paneles solares*

China's Leadership in Solar Photovoltaic Energy and its Impact on International Solar Panel Trade

Humberto Merritt¹

Juan Carlos Vilchis Flores²

DOI: 10.32870/mycp.v13i37.870

Resumen

Desde 2015 China es el líder mundial en la producción y uso de energía solar y también el principal exportador de paneles solares. En este trabajo se argumenta que el liderazgo de China surge de la convergencia de factores como el agravamiento del cambio climático, el empleo por varios países de estímulos fiscales para fomentar los paneles solares, los avances en tecnología fotovoltaica y el impulso de las políticas públicas que aprovecharon las propias condiciones económicas del país. El objetivo es describir la evolución de China como líder mundial en energía solar mediante un enfoque de políticas públicas. La metodología parte de la revisión cualitativa de las estadísticas de la producción mundial de energía solar y del comercio internacional en paneles fotovoltaicos de 2001 a 2021 para evaluar la evolución de China en este campo. Los datos sugieren que las políticas públicas instrumentadas por China han desempeñado un rol crucial en fomentar su liderazgo en energías renovables.

Palabras clave: China; energía solar, política pública, innovación tecnológica, exportaciones.
Códigos JEL: F18, O31, O33, Q27, Q42, Q54, Q55.

Abstract

Since 2015, China has been the world's leading producer and user of solar energy and also the world's largest exporter of solar panels. This paper argues that China's leadership arises from the convergence of factors such as worsening climate change, the use by several countries of fiscal stimuli to promote solar panels, advances in photovoltaic technology (PV), and the momentum of public policies that took advantage of the country's own economy. The objective is to describe China's evolution as a world leader in solar energy through a public policy approach. The methodology is based on a qualitative review of global solar energy production statistics and international trade in PV panels from 2001 to 2021 to assess China's evolution in this field. Empirical findings suggest that China's policies have played a crucial role in fostering its leadership in renewable energy.

Keywords: China, solar energy, public policy, technological innovation, exports.

Artículo recibido el 21 de mayo de 2023 y dictaminado el 2 de septiembre de 2023.

* Este trabajo se deriva del proyecto IPN-SIP 20230137 y fue dictaminado por dos evaluadores anónimos, a quienes los autores agradecen sus observaciones y sugerencias. Sin embargo, los errores e imprecisiones que aún pudieran subsistir son responsabilidad única de los autores.

1. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales (CIECAS). Lauro Aguirre # 120. Colonia Agricultura. Alcaldía Miguel Hidalgo, 11360, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3580-7325> Correo electrónico: hmerritt@ipn.mx
2. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales (CIECAS). Lauro Aguirre # 120. Colonia Agricultura. Alcaldía Miguel Hidalgo, 11360, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9385-9559> Correo electrónico: carlosvfgn24@gmail.com



Introducción

El aumento en los niveles mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) que resultan del uso de combustibles fósiles está creando catástrofes ambientales de forma cada vez más frecuente. Este fenómeno, conocido como calentamiento global, ha servido para incentivar la adopción de fuentes de poder limpias, las cuales pueden ayudar tanto a abatir los efectos del cambio climático como a satisfacer las crecientes necesidades energéticas del planeta (IPCC, 2022).

No obstante, el contexto mundial es complejo pues, como Foster, Ghassemi y Cota (2009) señalan, la demanda total de electricidad podría duplicarse o incluso triplicarse para 2050 a medida que crezca la población mundial y los países en desarrollo amplíen sus economías. Además, el reciente conflicto en Ucrania ha demostrado que el mundo es todavía altamente dependiente del petróleo y sus derivados (Wiatros-Motyka, 2023).

Aunque el acceso a fuentes de poder confiables es esencial para el desarrollo y bienestar, la rápida confluencia de conflictos ambientales, económicos y sociales complica enfrentar los retos que plantea el cambio climático (IEA, 2022b). Así, la creciente adopción de fuentes limpias puede contribuir también a garantizar el crecimiento mundial. De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), las energías renovables superarán a los combustibles fósiles como el principal modo de generar electricidad en 2025; y donde la solar fotovoltaica se está colocando como la opción más económica en la mayor parte del mundo (IEA, 2022a). Coincidentemente, desde el año 2000 se han producido avances tecnológicos significativos en fuentes limpias. Estos avances han generado tanto aumentos en la eficiencia energética como en la reducción de costos para las energías eólica, solar y biomasa, haciendo cada vez más factible la operación a gran escala de estas tecnologías (IRENA, 2022).

Al respecto es pertinente señalar que China es ya uno de los principales líderes en tecnologías limpias; y además desde 2015 es el productor más grande de electricidad solar fotovoltaica en el mundo (Frankel et al., 2016; The Economist, 2020). Este proceso comenzó en 2004 cuando el gigante asiático instrumentó políticas públicas dirigidas a disminuir sus emisiones de GEI mediante la utilización de energías renovables (Finamore, 2020; Huang et al., 2016; Zhi et al., 2014).

Sin embargo, el actual dominio de China no sólo se debe al efecto de sus políticas públicas, sino también a la coincidencia de dos importantes eventos:

1) el rápido avance tecnológico en energías renovables, y 2) la aplicación de estímulos fiscales para acelerar la instalación de paneles solares residenciales en Alemania, Australia, España, Estados Unidos y Japón (Best et al., 2019; Frondel et al., 2008; Ondraczek et al., 2015).

Aparte de esta convergencia de factores, el ascenso de China en electricidad solar fotovoltaica se apoyó en la enorme capacidad de consumo del país, estimulando a las empresas chinas fabricantes de paneles solares a aumentar su producción y que, a su vez, mediante las economías de escala desarrolladas por la manufactura de China lograron primero acelerar la difusión de la electricidad solar fotovoltaica en el mercado doméstico y exportar paneles solares después (Zhang et al., 2022).

Pero el liderazgo de China en la fabricación y exportación de paneles y equipos solares está suscitando una gran preocupación entre algunos países por su ya visible dominio del mercado solar mundial. Esta preocupación se percibe como el riesgo estratégico que representa China al controlar suministros clave como el polisilicio y el consecuente desplazamiento de otros productores (The Economist, 2020). No obstante, China aún enfrenta el reto de reducir significativamente sus propias emisiones de GEI y promover el desarrollo sostenible de su industria solar (Rafiq et al., 2022).

El objetivo de este trabajo es analizar los factores que explican el ascenso de China como líder mundial de la industria solar bajo una perspectiva exploratoria; es decir, se revisa cómo la convergencia de diversos factores le permitió a China posicionarse como el principal exportador de paneles solares del mundo. Para tal efecto el trabajo propone la siguiente pregunta de investigación: ¿en qué medida la conjunción de diversos eventos ayudó a China a convertirse en el principal productor y exportador de paneles solares fotovoltaicos? En este contexto se han identificado cuatro grandes factores que podrían explicar el desarrollo de este proceso: 1) el agravamiento del calentamiento global por GEI; 2) el rápido desarrollo del mercado solar gracias a la aplicación de incentivos fiscales para estimular la instalación de paneles solares residenciales en varios países del mundo; 3) los avances en eficiencia en tecnología fotovoltaica, y 4) la aplicación estratégica de políticas públicas en China destinadas a fomentar el desarrollo de su industria solar.

Este trabajo está organizado en seis secciones, además de la introducción y conclusiones. En la siguiente sección se describe brevemente cómo el combate al calentamiento global, causado por la incesante quema de combustibles fósiles, puede ser abatido por la adopción de energías limpias y renovables.

I. Las energías renovables como alternativa a los combustibles fósiles

El calentamiento global ha adquirido cada vez más relevancia en la opinión pública mundial a medida que aumenta el número de emergencias climáticas. Un gran número de estudios científicos han asociado el calentamiento global con el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono procedentes de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), producidas principalmente por la combustión de combustibles fósiles (IPCC, 2022).

Como casi todas las actividades económicas dependen de los hidrocarburos, el acuerdo climático de París de 2015 se centró en abatir el impacto de las emisiones de GEI mediante la reducción sistemática de las principales fuentes contaminantes, como el transporte o la generación de energía eléctrica. Así, eliminar las emisiones derivadas de los combustibles fósiles es ya un objetivo medioambiental urgente y con ello la adopción de alternativas energéticas más limpias (Merritt & Barragán, 2022).

Actualmente la opción más viable es la generación de potencia eléctrica mediante fuentes renovables como las provenientes del sol o el aire (Foster et al., 2009; IPCC, 2022; IRENA, 2022). Las ventajas de las alternativas limpias estriban en ayudar a frenar el deterioro climático al mismo tiempo que pueden garantizar el abastecimiento eléctrico sin recurrir al petróleo o el carbón (Sivaram, 2018). Sin embargo, varios estudios alertan que aún se requiere alcanzar una producción muy significativa a partir de fuentes renovables para estar en condiciones de lograr un futuro más seguro y limpio (Bolinger et al., 2022).

II. El desarrollo del mercado mundial de la energía solar

Para entender el proceso de liderazgo y consolidación de China como el principal productor de electricidad fotovoltaica, es necesario analizar la evolución del mercado mundial de energía solar. Los segmentos más relevantes de la industria solar son la investigación y desarrollo (I+D) y la fabricación, instalación y financiamiento (que incluye los mecanismos de apoyo) de paneles y equipos solares (Grand View Research, 2021).

Varios estudios destacan que el mercado internacional de la energía solar está creciendo rápidamente gracias a la notable rentabilidad de la energía solar, lo que está creando nuevas oportunidades para empresas e individuos de todo el mundo (IEA, 2022b; Wiatros-Motyka, 2023). Pero la adopción de la energía solar depende de las condiciones de oferta y demanda para acelerar su

difusión, es decir su uso está estrechamente condicionado al comportamiento del mercado. A este respecto, los consultores especializados en energía fotovoltaica dividen la industria en los cuatro campos que se describen en la tabla 1.

Tabla 1
Los segmentos del mercado de energía solar fotovoltaica

<i>Tipo de segmentación</i>	<i>Componentes</i>
Por producto	Paneles solares. Reguladores de carga. Baterías. Inversores. Equipos de soporte y apoyo.
Por tipo de usuario	Residencial. Comercial. Industrial. Servicios públicos.
Por categoría de instalación	Instalaciones nuevas. Mercado de mantenimiento, reparación y revisión (MRR).
Por región	Norteamérica. Europa. Asia Pacífico. Asia Oriental. Sudeste asiático. Asia Meridional. Pacífico. América Central y del Sur. Oriente Medio. África.

Fuente: elaboración de los autores a partir de Grand View Research, 2021 (<https://bit.ly/3nZ7KHz>).

La consultora Grand View Research (GVR, 2021) reporta que el tamaño del mercado mundial de sistemas de energía solar era de 160.3 mil millones de dólares en 2021, estimando que crezca a una tasa media anual del 15.7% entre 2022 y 2030, y considera que la pujante demanda por energías renovables sostendrá el crecimiento de la industria solar en los próximos 10 años.

Por producto, el segmento de paneles solares representó el 41.5% del mercado solar en 2021, pero se cree que las baterías solares contemplen un mayor crecimiento de aquí a 2030. Para los analistas de Grand View Research, el auge

en energía solar vendrá de los grandes flujos de inversión, tanto pública como privada, que se anticipa se ejercerán en los próximos años como resultado de las diversas políticas de estímulo a las energías renovables en general, y a la solar en particular (GVR, 2021). Además, otros estudios pronostican que el flujo de inversiones hará pronto más competitiva la generación de electricidad solar fotovoltaica que la producida por las actuales centrales eléctricas basadas en carbón o gas (Heggarty & Attia, 2019).

En el segmento residencial se ha visto que la preocupación mundial por reducir el uso de combustibles fósiles ha estimulado fuertemente la instalación de paneles solares residenciales. Así, en 2019 el total del mercado solar residencial se valoró en casi 67 mil millones de dólares, calculándose que crezca a una tasa media anual del 6.1% durante los próximos cinco años. Estas estimaciones confían en que la abundante disponibilidad de energía solar de varias regiones del mundo impulse el crecimiento del mercado, ya que los paneles solares en tejados actúan como una inversión segura para los clientes finales ante las frecuentes fluctuaciones de precios que ha presentado la electricidad en años recientes (Deign, 2022; Zhang et al., 2022).

Por otra parte, y en anticipación al análisis que se hará más adelante, es pertinente señalar que desde 2011 China se ha convertido en el jugador dominante del mercado mundial de paneles solares (Huang et al., 2016; Rodríguez, 2012). Su ascenso comenzó a mediados de la década del 2000, cuando varios países comenzaron a aplicar incentivos basados principalmente en subsidios y estímulos fiscales para auspiciar la instalación de paneles solares en los hogares. Entre los principales impulsores estuvieron Alemania, Australia, España, Japón y los Países Bajos (Best et al., 2019; Moskovkin et al., 2018; The Economist, 2018).

La política detrás de los incentivos perseguía dos objetivos: 1) que los usuarios finales pudieran reducir sus facturas de electricidad al generar su propia electricidad usando paneles solares en sus hogares, y 2) que la población ayudara a combatir el cambio climático (Frondelet et al., 2008; Ondraczek et al., 2015; Torani et al., 2016). Sin embargo, pronto surgieron tres efectos contraproducentes, como: 1) el aumento del déficit público por los montos crecientes de los subsidios; 2) la elevada incertidumbre en el cálculo de las tarifas de referencia por las frecuentes fluctuaciones del precio del petróleo que dificultaban pronosticar el costo de producción para los mercados domésticos de electricidad, y 3) el aumento de las importaciones de paneles solares procedentes de China. Fue así que para la crisis financiera mundial de 2008

varios países tuvieron que desechar este tipo de esquemas de apoyo (Best et al., 2019; Heggarty & Attia, 2019).

En retrospectiva, la evaluación de estas experiencias muestra que el fomento a la energía solar fotovoltaica se realizó a un precio innecesariamente alto debido a las escasas restricciones para otorgar las subvenciones. El caso de Alemania es ilustrativo porque logró generar el mayor nivel fotovoltaico residencial a pesar de no tener una abundancia de rayos solares. De acuerdo con Ondraczek et al. (2015), el error fue que las estimaciones para subvencionar los hogares alemanes no se basaron en el índice de insolación total (medido por la irradiancia horizontal global), sino en los costos de inversión y explotación, así como el costo del capital, todos factores en gran medida endógenos y por tanto irrelevantes para el análisis de la viabilidad del apoyo. En todo caso, los estímulos serían más ventajosos para naciones en desarrollo, y además situadas cerca de los trópicos, porque la irradiación solar que reciben es mucho más alta, pero los costos que enfrentan para obtener capital son igualmente elevados (Tetteh & Kebir, 2022).

III. La evolución de la tecnología solar

La generación de electricidad mediante luz solar se debe al fenómeno llamado efecto fotovoltaico; y fue descubierto por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel en 1839 sin que tuviera aplicaciones prácticas durante mucho tiempo (Sivaram, 2018).

Posteriormente, el descubrimiento del silicio como material semiconductor a finales de los años cincuenta permitió la fabricación de diodos fotovoltaicos que aprovecharon la luz solar como fuente de energía, pero su rendimiento era bajo y su costo elevado (Shah et al., 1999). No obstante, los paneles solares formados por cristales de silicio se hicieron indispensables unos pocos años después para suministrar energía eléctrica a los equipos de telecomunicaciones ubicados en satélites y en otros lugares de difícil acceso (Bradford, 2006; Foster et al., 2009; Sivaram, 2018; Shubbak, 2019). Aun así, la utilización de paneles solares para generar electricidad permaneció como aplicación de nicho hasta octubre de 1973, cuando la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) canceló sus exportaciones de hidrocarburos a raíz de la guerra entre Israel y los países árabes, desencadenando la primera crisis mundial del petróleo (Shah et al., 1999).

El desabasto de 1973 puso en evidencia los riesgos de la excesiva dependencia mundial en los combustibles fósiles, empujando a Alemania, Estados Unidos, Francia y Japón a lanzar ambiciosos proyectos de energía solar fotovoltaica como una opción alterna (Foster et al., 2009); aun así, los avances en tecnología solar seguían siendo escasos y esporádicos (Rúa-Ortiz et al., 2020). Fue hasta principios de los noventa que los crecientes efectos del calentamiento global por GEI reforzaron las presiones mundiales para hacer de la luz solar fotovoltaica una opción viable (Shah et al., 1999; Sivaram, 2018).

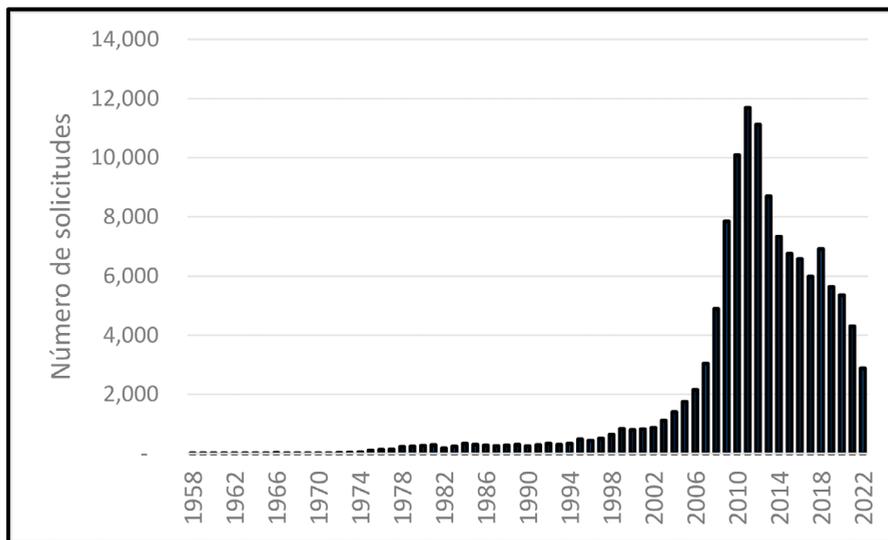
Desde entonces los desarrollos tecnológicos en celdas fotoeléctricas han seguido avanzando, aunque hasta enero de 2022 la eficiencia máxima reportada de una celda solar, referida como la parte de energía solar que la celda puede convertir en electricidad, solamente es de 32.7%, según Green et al. (2022). Esta condición implica que se requieren grandes extensiones para compensar la baja eficiencia energética y poder generar electricidad fotovoltaica a una escala competitiva (Moskovkin et al., 2018; IRENA, 2022). Pero no sólo la baja tasa de eficiencia dificulta la adopción de tecnología solar, sino también los altos costos de instalación de los paneles, situación que los hace prácticamente inalcanzables para la mayoría de los países pobres (Tetteh & Kebir, 2022).

En el tema de la innovación, la dificultad para mejorar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas se verifica mediante el conteo de las solicitudes de patentes reportadas por las principales oficinas de propiedad industrial en el mundo.

De acuerdo con la base de datos de la plataforma Lens.org,³ el total de solicitudes relativas a patentes en celdas solares fotovoltaicas alcanzó un máximo en 2011 y desde entonces ha venido cayendo. La figura 1 muestra la trayectoria de este tipo de solicitudes desde el primer registro realizado en 1958 hasta 2022.

3. <https://www.lens.org/>

Figura 1
Solicitudes de patentes para celdas solares
en las oficinas mundiales, 1958-2022



Nota: patentes solicitadas en el campo de celdas solares fotovoltaicas (*solar cells*) en todas las oficinas de propiedad industrial del mundo.

Fuente: elaboración propia con datos de Lens.org, 2023 (<https://www.lens.org/>).

De la figura 1 se desprende que el auge del patentamiento en celdas fotovoltaicas se presentó entre 2001 y 2011, lo que sugiere que ese periodo ha sido el más intenso en años recientes para la innovación de celdas fotoeléctricas, y que además coincide con el ascenso en el precio del petróleo derivado de la invasión estadounidense a Irak y los clamores mundiales por detener el calentamiento global (Rúa-Ortiz et al., 2020).

Pero una inspección más fina de las cifras que se reportan en la figura 1 demuestra que entre 1958 y 2023 se han presentado 116,426 solicitudes de patentes, las cuales fueron recibidas por diversas oficinas del mundo. La revisión de las oficinas involucradas (jurisdicciones) muestra que la Administración Nacional de la Propiedad Intelectual de la República Popular China (CNIPA, por sus siglas en inglés) es la más activa, al recibir el 37.3% del total, seguida por la oficina de Corea del Sur (15.1%), la oficina de patentes y marcas

de Estados Unidos (USPTO por sus siglas en inglés) (14.5%) y de la oficina de Japón (13.9%) (Lens.org, 2023).

IV. La producción de paneles solares y el ascenso de China como líder mundial

A raíz del auge de la industria solar, la manufactura de los paneles fotovoltaicos también ha registrado un crecimiento notable en años recientes. Como resultado, el precio del silicio que sirve de sustrato de los paneles, así como los costos del encapsulado de las celdas y del cableado y las estructuras de soporte han sufrido fuertes fluctuaciones, afectando así la competitividad de la industria solar (Pillai, 2015; Frankel et al., 2016; Heggarty & Attia, 2019). Si bien la competitividad de la industria de paneles solares depende de las innovaciones tecnológicas, el volumen de producción y el costo de las materias primas también ejercen un poderoso efecto (Foster et al., 2009; Shubbak, 2019).

En relación con la producción mundial de módulos fotovoltaicos (e. g. paneles), ésta ha crecido de forma sorprendente, especialmente en China, gracias a los efectos favorables de los subsidios a la producción, las economías de escala en la manufactura y la fuerte demanda mundial de paneles solares, condiciones que China ha sabido aprovechar para convertirse en el mayor productor del mundo (The Economist, 2020; Deign, 2022).

En este contexto es oportuno señalar que la viabilidad de la producción de celdas solares depende críticamente de la disponibilidad de materias primas específicas (notablemente polisilicio), área en donde China es principal proveedor mundial (Bernreuter, 2022).

Derivado de este auge, la producción mundial de electricidad solar fotovoltaica ha venido aumentando continuamente. En la tabla 2 se muestra la evolución anual de esta área desde 2000 a 2020 para los cinco principales países productores respecto al total mundial.

Tabla 2
Producción mundial de energía solar fotovoltaica, 2000-2020
(Gigavatios-hora - GWh)

<i>Año</i>	<i>Total mundial</i>	<i>Alemania</i>	<i>Australia</i>	<i>China</i>	<i>EE. UU.</i>	<i>Japón</i>
2000	805	60	38	37	183	357
2001	1,135	116	44	43	220	547
2002	1,408	188	50	68	261	644
2003	1,851	313	58	81	300	858
2004	2,494	557	68	94	378	1,118
2005	3,813	1,282	78	137	524	1,420
2006	5,473	2,220	90	155	737	1,721
2007	7,436	3,075	105	191	1,001	1,972
2008	11,898	4,420	123	235	1,214	2,206
2009	20,089	6,583	156	345	1,699	2,657
2010	32,148	11,729	386	729	3,063	3,543
2011	62,427	19,599	1,388	1,998	5,322	4,839
2012	96,294	26,380	2,322	4,391	9,186	6,613
2013	131,430	31,010	3,472	8,798	14,858	12,880
2014	183,651	36,056	4,007	23,751	23,076	22,952
2015	242,194	38,726	5,019	39,978	32,091	34,802
2016	314,580	38,098	6,205	67,865	46,633	45,761
2017	425,322	39,401	8,069	118,258	67,393	55,068
2018	549,682	43,459	9,926	178,062	81,244	62,668
2019	676,188	44,383	14,845	224,527	93,943	69,381
2020	830,741	48,641	21,030	261,639	115,902	79,087
TMCA	41.5	39.8	37.1	55.7	38.1	31.0

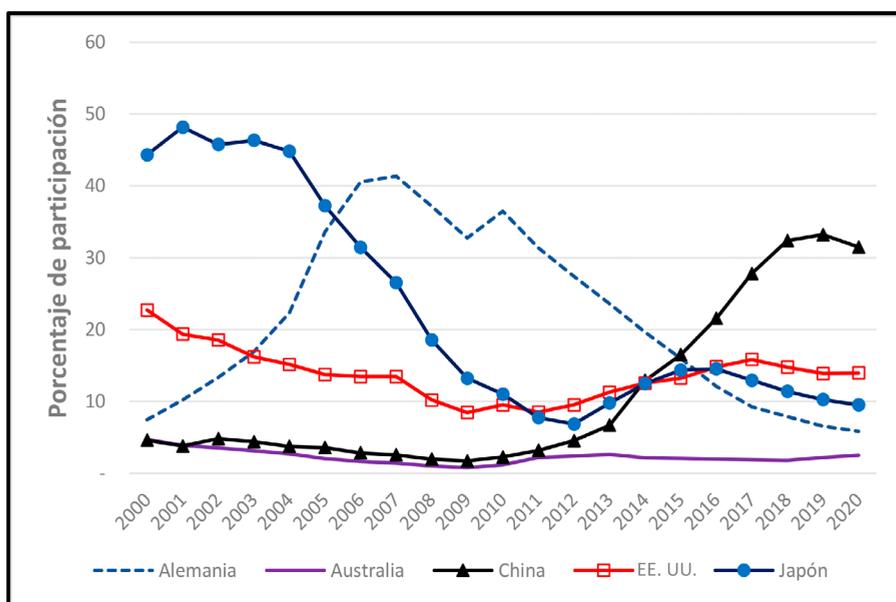
TMCA: tasa media de crecimiento anual, en porcentaje.

Fuente: elaboración de los autores a partir de IRENA Renewable Energy Statistics (<https://tinyurl.com/y4synw9p>).

Como se observa en la tabla 2, la producción mundial solar fotovoltaica ha venido aumentando a un ritmo de casi 42% anual (TMCA). Destaca el fuerte crecimiento de China al mantener una tasa promedio anual cercana al 60% en los 20 años que se reportan; aunque el empuje es más notorio en los últimos cinco años, que es cuando pasa a dominar el comercio mundial de paneles solares, como veremos después.

Para los demás países el ritmo de crecimiento ha sido distinto, con Australia y Japón experimentando las menores tasas, mientras que Alemania y Estados Unidos se muestran un poco mejor. En el fondo, los cinco países han sido los promotores más fervientes de la energía solar fotovoltaica, por lo que su participación en el total mundial es mayoritaria, como se ilustra en la figura 2.

Figura 2
Evolución de la participación en
la producción solar fotovoltaica, 2000-2020
(% del total)



Fuente: elaboración de los autores a partir de IRENA Renewable Energy Statistics (<https://tinyurl.com/y4synw9p>)

Como se observa en la figura 2, las participaciones individuales han fluctuado a lo largo del periodo, con Japón dominando al inicio, para que luego lo hiciera Alemania, pero desde 2015 China controla totalmente la producción solar fotovoltaica mundial, lo que coincide con la instrumentación por parte del Gobierno chino de las políticas de fomento a las energías limpias (Huang et

al., 2016). Para el futuro inmediato se pronostica que la producción mundial continúe subiendo, con China probablemente dominando.

Aunque las tendencias indican que la producción mundial de energía solar seguirá en aumento, el costo actual de generación de electricidad fotovoltaica sigue siendo superior a los precios comerciales de la electricidad generada por medios consolidados como la energía hidráulica, la nuclear, o los hidrocarburos. Es de esperar, no obstante, que la innovación permita pronto elevar la eficiencia de las celdas fotoeléctricas (IRENA, 2022).

V. El papel de las políticas públicas en el ascenso de China en energía solar

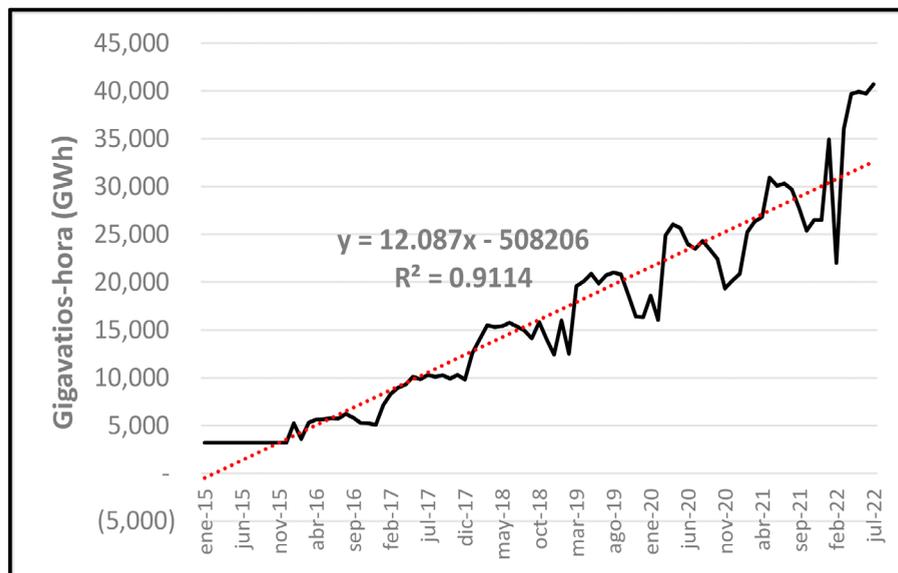
A principios de los años ochenta el Gobierno de China lanzó el primer plan de desarrollo energético basado en el impulso de nuevas energías y de energías renovables (Zhi et al., 2014), y desde entonces ha venido promoviendo las energías renovables con la intención de evitar depender de la manufactura contaminante (y de su elevada carga energética) con la misión de transitar hacia un sistema de alta tecnología basado en la producción de bienes y servicios sustentables (Correa, 2017; Finamore, 2020).

Al seguir esta orientación, China pudo volverse en poco tiempo el líder mundial en energía solar y eólica, vehículos eléctricos y producción de baterías, compartiendo una drástica reducción de costos a todo el mundo (Zhang et al., 2022). Sin embargo, aún enfrenta innumerables retos, especialmente a medida que ha comenzado a eliminar subvenciones en su intento por reforzar los mecanismos de mercado para aumentar la adopción de tecnologías sustentables y limpias (The Economist, 2020; World Bank, 2013).

Para mejorar las posibilidades de éxito, las políticas de estímulo a la energía solar aprovecharon las condiciones privilegiadas que tiene el país. A este respecto, Rafiq et al. (2022) señalan que China recibe una radiación anual de más de seis mil millones de julios por metro cuadrado, ubicándose como una de las naciones con mayor potencial solar. Las regiones mejor posicionadas están en el noroeste, el Tíbet y la provincia de Yunnan (Zhang et al., 2022). En 2007 el Estado chino puso en marcha un programa para privilegiar las zonas menos desarrolladas, como aquéllas en áreas rurales, proporcionando 4,700 millones de yenes para construir varias centrales independientes de energía renovable en 1,000 ciudades, y otros 7,000 millones para centrales de energía solar en 1,065 municipios de 12 provincias como Mongolia Interior, Qinghai,

Xinjiang, Sichuan, Tíbet y Shanxi, entre otras (IEA, 2022c); y los resultados comenzaron a ser evidentes a partir de 2015, como se muestra en la figura 3.

Figura 3
Evolución de la generación mensual
de energía solar fotovoltaica, 2015-2022
(GWh)



Fuente: elaboración de los autores a partir de International Energy Agency, 2022c (<https://bit.ly/45jQn5b>).

De la figura 3 surgen varios puntos relevantes. Primero, la generación de electricidad solar fotovoltaica en China ha venido creciendo a una tasa de 12 gigavattios-hora por mes (como lo reporta la ecuación de tendencia), demostrándose la efectividad de las políticas instrumentadas. Segundo, aunque la energía fotovoltaica viene creciendo de forma sostenida, es aún insuficiente para cubrir las necesidades del país pues solamente atiende, hasta ahora, el 10% del total requerido (Wiatros-Motyka, 2023). Tercero, la potencia solar fotovoltaica tiene una debilidad: la generación no es constante, pues la variación en irradiación le afecta fuertemente, como sucede en invierno cuando la producción tiende a caer, como lo prueba la recurrencia de valles de cada febrero.

Para compensar las fluctuaciones en producción, el Gobierno de China introdujo subvenciones e incentivos fiscales para que las empresas solares del país desarrollen tecnología de baterías fotovoltaicas y complementar así el avance de la industria fotovoltaica nacional (Zhang et al., 2022), pero esto aún no es visible en los datos.

Se puede afirmar que la aplicación de políticas ha logrado hacer más rentable la inversión solar, porque el mercado fotovoltaico doméstico se desarrolla de forma sostenida gracias a las enormes economías de escala del país, donde los bajos costos de producción han permitido que las empresas locales puedan aumentar la producción y bajar precios, permitiendo que la energía solar sea más accesible y asequible para los consumidores chinos (IEA, 2022a; Rafiq et al., 2022; Wiatros-Motyka, 2023).

Para entender el papel que han desempeñado las políticas gubernamentales en el ascenso de China como potencia solar, Huang et al. (2016) postulan tres etapas del proceso: 1) la era pionera que va de 1985 a 1996; 2) la etapa de impulso al sector de fabricación fotovoltaica dada por el mercado europeo de 2004 a 2008; 3) el inicio de la formación del mercado nacional fotovoltaico, que va de 2009 a 2012.

Huang et al. (2016) aducen que, si bien la historia del éxito de la industria fotovoltaica china comenzó en la década de 1980, la verdadera aceleración se produjo hasta 2004. Observan que el proceso de industrialización del sector fotovoltaico, y el consecuente nacimiento del liderazgo chino, tuvo lugar entre 2004 y 2013, es decir en menos de 10 años. Para fundamentar sus argumentos, estos autores ven tres factores externos que cumplieron un papel importante en este proceso. En primer lugar, se adecuó el enfoque económico para permitir la operación de empresas privadas y así adherir a China a la Organización Mundial de Comercio. En segundo lugar, los mecanismos de transferencia tecnológica desde Occidente fueron cruciales. Aquí Alemania ejerció un papel destacado porque hizo que sus empresas líderes montaran en China líneas de producción llave en mano a cambio del acceso a su enorme mercado. Finalmente, el avanzado mercado europeo de energía fotovoltaica accedió a dejar que los empresarios chinos entraran a su espacio; y así China logró sacar ventaja del dinamismo europeo que, junto con la rápida acumulación de capacidades tecnológicas, explican el rápido posicionamiento mundial del sector exportador fotovoltaico chino.

En resumen, el apoyo gubernamental fue decisivo para el rápido crecimiento de la industria solar china. Así, las subvenciones, incentivos fiscales

y un trato preferencial para las empresas domésticas, así como la creciente inversión en I+D sirven para explicar tanto el notable aumento del patentamiento de las empresas chinas como su rápido posicionamiento como líderes tecnológicos mundiales en celdas fotovoltaicas (Shubbak, 2019; Zhang et al., 2022). Ahora debemos analizar cómo se ha trasladado este posicionamiento al comercio internacional de paneles solares.

VI. El liderazgo de China en el comercio internacional de paneles solares

Como se ha mencionado, el ascenso de China en el horizonte solar mundial comenzó en la década del 2000, cuando el Gobierno eligió a las energías renovables como su prioridad de política (Huang et al., 2016). Al aplicar subvenciones, tarifas preferentes de alimentación y apoyos para la I+D, China logró estimular su industria doméstica. De acuerdo con Correa (2017), los incentivos a la industria solar china también sirvieron para mejorar la seguridad energética nacional y mitigar los problemas medioambientales asociados al uso intensivo de los combustibles fósiles por parte de la industria local.

Para 2015 China se convirtió en líder mundial en la producción y uso de energía solar, siendo desde entonces el principal productor y exportador del mercado de energía solar. Hoy en día las empresas chinas controlan más del 70% de la producción mundial de paneles solares, lo que les ha otorgado una amplia ventaja competitiva en el comercio mundial de estos equipos (Heggarty & Attia, 2019; The Economist, 2018).

Por otra parte, la hegemonía de China en la producción manufacturera mundial le ayudó a dominar también el mercado de celdas fotovoltaicas, y que además son el componente principal de los paneles solares. De manera coincidente, el mercado internacional de celdas solares ha venido creciendo a una tasa media anual del 11.6% en los últimos cuatro años.

Para tener una idea de los efectos de esta tasa de crecimiento en la composición del mercado mundial de celdas solares, en la tabla 3 se presenta cómo ha evolucionado el comercio internacional en dispositivos semiconductores fotosensibles, que es la denominación comercial de las células fotovoltaicas y que está catalogado en el sistema armonizado internacional por el código 854140.

Tabla 3
Comercio mundial de celdas solares fotovoltaicas, 2018-2021
(Miles de millones de US \$)

<i>Año</i>	<i>Exportaciones</i>	<i>% var.</i>	<i>Importaciones</i>	<i>% var.</i>
2018	52.1	--	53.5	--
2019	56.7	8.8	57.4	7.3
2020	58.3	2.9	59.0	2.8
2021	74.1	27.0	72.8	23.4

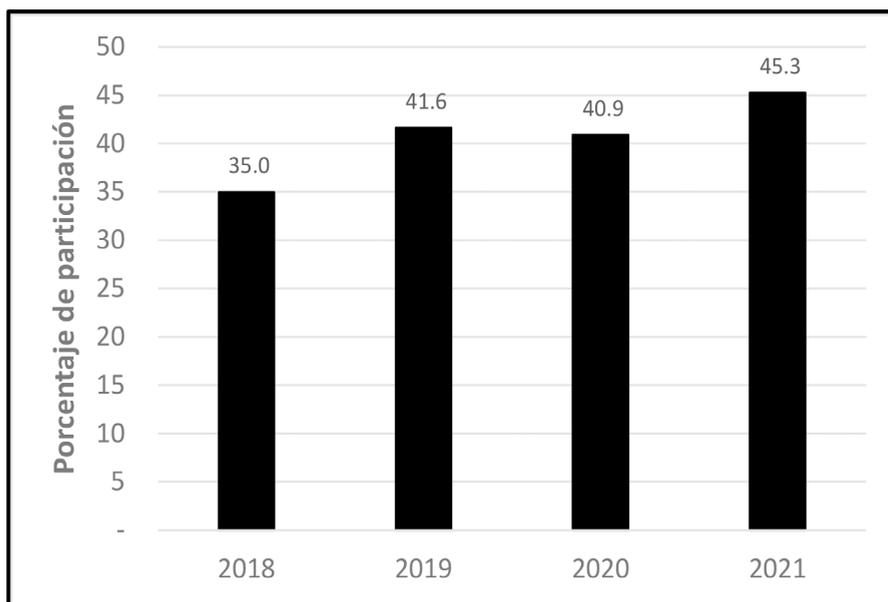
Nota: datos del comercio mundial en dispositivos semiconductores fotosensibles, incluidas las células fotovoltaicas bajo el código 854140 del sistema armonizado de comercio internacional. Fuente: elaboración de los autores a partir de International Trade Centre, 2022 (<https://www.trademap.org/>).

De la tabla 3 se desprende que, tanto exportaciones como importaciones han tenido un aumento sostenido de 2018 a 2021, aunque existen dos periodos claramente diferenciados. El primero de 2019 a 2020, cuando el mercado sólo creció a una tasa del 2.8%, para después experimentar un fuerte repunte del 27%. Estas variaciones tan notables se pueden atribuir a la pandemia de COVID-19 que interrumpió fuertemente los flujos del comercio internacional entre 2020 y 2021.

Con todo, el periodo 2018-2022 es bastante trascendente porque corresponde con el reforzamiento de las acciones internacionales destinadas a combatir los efectos del calentamiento global mediante las energías renovables (IEA, 2022c; IPCC, 2022).

Así, y de acuerdo con estadísticas del Centro Internacional de Comercio (ITC, por sus siglas en inglés), China se ha colocado como el principal exportador de paneles solares desde 2015, desplazando a Estados Unidos y Alemania. La figura 4 muestra la evolución de la participación de China en este mercado desde 2018 hasta 2021.

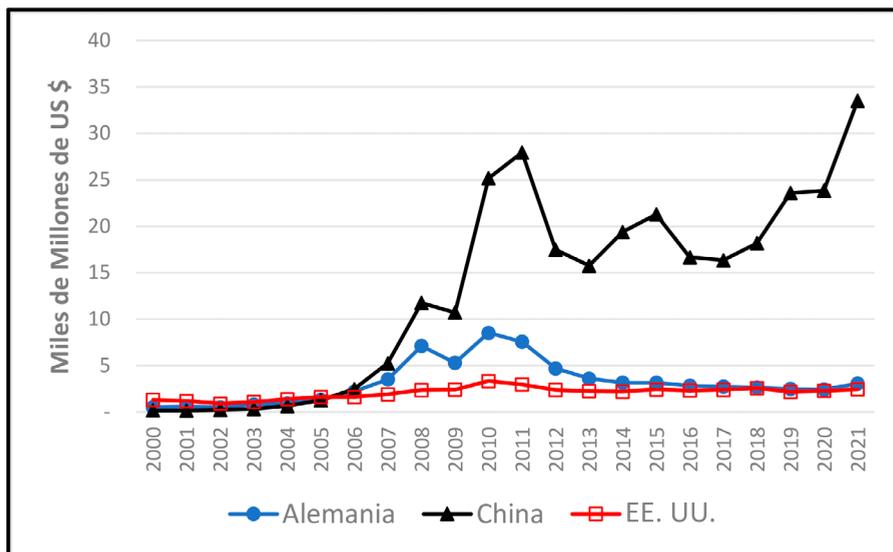
Figura 4
Participación de China en el comercio
internacional de paneles solares, 2018-2021
(%)



Fuente: elaboración de los autores a partir de International Trade Centre, 2022 (<https://www.trademap.org/>).

Sin embargo, varios análisis sostienen que el liderazgo de China surgió de las agresivas estrategias de mercado implementadas. En particular observan que los fabricantes chinos han usado estrategias comerciales muy agresivas para conquistar los mercados internacionales, aprovechando sus ventajas de bajos costos de producción para eliminar competidores, capturar cuotas de mercado y aumentar sus ventas. Para lograrlo han recurrido a guerras de precios, a menudo vendiendo paneles solares a precios por debajo del costo de fabricación de sus competidores, lo que ha distorsionado el mercado solar mundial, aniquilando en el camino a muchos fabricantes de otros países (Rodríguez, 2012; Deign, 2022). En la figura 5 se muestra la evolución de este mercado a través de las exportaciones de Alemania, China y Estados Unidos desde 2000 hasta 20121.

Figura 5
Exportaciones de paneles solares, 2000-2021
(Miles de millones de US \$)



Fuente: elaboración de los autores a partir de UN Comtrade Database, 2023 (<https://comtradeplus.un.org/TradeFlow>).

Se observa que desde 2007 las exportaciones de China han crecido aceleradamente, alcanzando un pico en 2010 para luego recuperarse y continuar subiendo desde entonces, mientras que las exportaciones de Alemania y Estados Unidos se han estancado, lo que comprueba que las agresivas estrategias comerciales de las empresas chinas han redituado en mayores ganancias de mercado.

Aunque la agresividad comercial de las empresas chinas explica su auge, la capacidad para explotar economías de escala en la manufactura también ha contribuido. Este fenómeno ha sido usado para bajar notablemente los costos locales de producción de paneles solares (Moskovkin et al., 2018; Pillai, 2015; The Economist, 2018); así como también el rápido crecimiento del mercado nacional ha sido aprovechado por los fabricantes chinos para transitar precipitadamente la curva de aprendizaje y así apuntalar una base sólida para la producción a gran escala (Huang et al., 2016).

Asimismo, la innovación tecnológica ha ejercido un papel crucial en la consolidación del liderazgo chino en paneles solares. Para empezar, las

empresas de China han realizado un gasto creciente en I+D desde finales de los noventa para mejorar la eficiencia de las celdas solares, reducir los costos de producción y desarrollar procesos de fabricación innovadores (Zhang & Gallagher, 2016). A partir de estas inversiones China ha logrado avances significativos en la eficiencia y la calidad de sus paneles solares, haciéndolos más competitivos en los mercados mundiales (Deign, 2022).

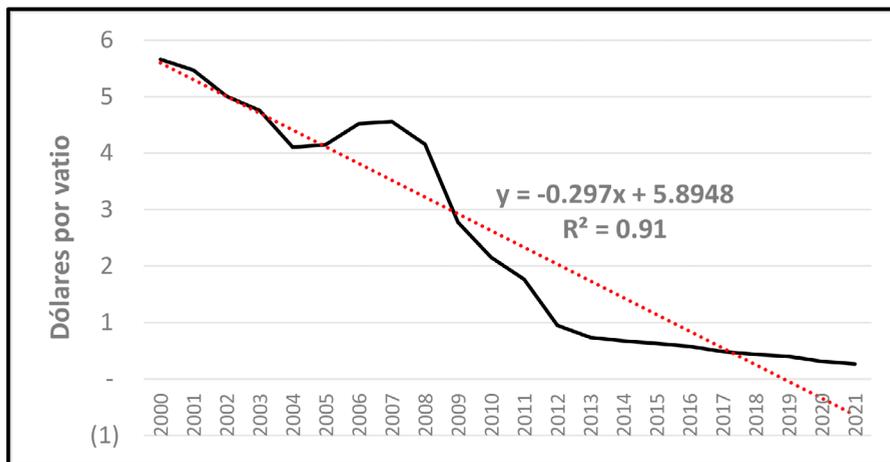
Finalmente, la existencia de cadenas eficientes de suministros y el fomento a un entorno empresarial favorable han contribuido también al liderazgo del país. Por ejemplo, el acceso sostenido a materias primas, como el polisilicio, ha permitido que los fabricantes chinos dominen el mercado (Bernreuter, 2022). Adicionalmente, China ha forjado una sólida red de proveedores, fabricantes de equipos y proveedores de servicios que apoyan a la industria de paneles solares. Claramente, esta integración vertical ha contribuido a la eficiencia y racionalización de la producción (Zhang & Gallagher, 2016).

Sin embargo, la construcción de este liderazgo ha tenido costos también. Del lado positivo se puede señalar que la escala de producción masiva de China ha contribuido a una reducción significativa de los precios de los paneles solares en todo el mundo, haciendo que la energía solar sea más asequible y acelerando su adopción a nivel mundial. Este efecto ha cumplido un papel vital en la transición mundial hacia las energías limpias y el combate al cambio climático. Para ilustrar cómo ha evolucionado este fenómeno, en la figura 6 se muestran los cambios en el precio de la potencia eléctrica generada en celdas fotoeléctricas. Las estadísticas relativas al precio de la generación de un vatio de potencia (ajustado por inflación) de los paneles solares medidos en dólares de Estados Unidos de 2000 a 2021 fueron tomadas de la página web Our World in Data.⁴

4. <https://ourworldindata.org>

Figura 6

Evolución del precio de un vatio generado en paneles solares, 2000-2021
(US \$)



Fuente: elaboración de los autores a partir de Our World in Data, 2023 (<https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices>).

La línea de tendencia de la figura 6 muestra que los precios de la electricidad fotovoltaica han venido cayendo a una tasa (promedio) de casi 30 centavos de dólar por año, lo que coloca a la energía solar en una posición muy competitiva en relación con la electricidad obtenida de fuentes tradicionales. Si bien los precios han bajado, la tasa de disminución se ha ralentizado a partir de 2018, estabilizándose alrededor de los 35 centavos por vatio.

Del lado negativo, el ascenso de China también ha desatado una creciente preocupación por la competencia desleal y las prácticas comerciales en que (aparentemente) están incurriendo las empresas chinas. De tal forma que algunos países han acusado a China de incurrir en prácticas comerciales desleales, como el *dumping* de paneles solares para ganar cuota de mercado. Estas acusaciones han provocado varias disputas comerciales y la imposición de aranceles a los paneles solares chinos en varios mercados importantes (The Economist, 2020; Zhang et al., 2022). Con todo, la actual hegemonía de China tiene implicaciones favorables para el combate mundial al cambio climático. Por una parte, el rápido auge de energías limpias como la solar puede ayudarle a reducir su dependencia de los combustibles fósiles, y por otra puede mitigar

la enorme huella de carbono que ha generado su veloz crecimiento económico (IEA, 2022a; Rafiq et al., 2022).

Es así, entonces, que el rápido crecimiento de la industria solar china, al provocar un exceso de oferta y la consecuente caída de los precios de los paneles solares, está beneficiando indirectamente a muchos países, especialmente los menos desarrollados, al hacer que la energía solar sea más asequible para su población (Tetteh & Kebir, 2022). De mantenerse la disminución de precios en la electricidad fotovoltaica, sin duda se lograrán grandes beneficios al poder abatir los estragos del cambio climático.

Conclusiones

Este trabajo tuvo como objetivo explorar los factores que explican cómo China se ha convertido en el líder mundial en la producción y uso de energía solar. En él se revisó si el fomento a la electricidad solar fotovoltaica es una opción viable para la transición hacia las energías limpias. Los hallazgos se pueden sintetizar en cinco conclusiones generales.

En primer lugar, están los efectos del combate mundial al cambio climático mediante el fomento al uso de fuentes renovables para reducir el impacto medioambiental de los GEI. Desde la instrumentación del primer gran plan nacional de desarrollo en 1981, China se enfocó en promover la energía solar como una forma efectiva de disminuir su enorme huella de carbono. Así, su elección por la electricidad solar fotovoltaica ha contribuido a reducir las emisiones mundiales de GEI, evitando la consecuente contaminación asociada a la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles.

En segundo lugar, está la expansión del mercado solar. Con la introducción a lo largo del mundo de incentivos para la instalación de paneles solares en los sectores residencial, comercial y de servicios públicos se creó un fuerte mercado para los productos solares. Situación que China aprovechó para la expansión de su mercado doméstico, reforzando así sus ya notables economías de escala para reducir los precios de los paneles solares.

En tercer lugar, están los avances tecnológicos generados en el campo de celdas fotovoltaicas, que han sido fomentados por las políticas públicas. En el lapso estudiado el Gobierno chino instrumentó mecanismos de apoyo para la investigación y el desarrollo de tecnologías de energía solar. Esta inversión en I+D ha dado lugar a mejoras significativas en la eficiencia de las células solares, los procesos de fabricación y la calidad general del producto. Como resultado,

los paneles solares chinos son cada vez más competitivos en términos de rendimiento y rentabilidad, además de que las patentes surgidas de la I+D han ayudado a posicionar al país como líder tecnológico mundial en este campo.

En cuarto sitio está el manejo inteligente de herramientas de gestión por parte del Gobierno chino para que las empresas del país pudieran diseñar agresivas estrategias de mercado y convertirse en actores dominantes del mercado mundial de paneles solares. Desde 2015 los fabricantes chinos han aprovechado sus ventajas competitivas de bajos costos para ampliar su presencia en los mercados internacionales, captando una cuota de mercado significativa, con la ventaja de que los paneles solares sean más asequibles.

Finalmente, está el rol de los conflictos comerciales y de la inestabilidad geopolítica mundial. Es pertinente recordar que entre 2000 y 2022 se han presentado innumerables eventos de crisis, entre los que se encuentran las fluctuaciones del mercado petrolero mundial de mediados de los años 2010, así como la guerra comercial contra China iniciada por el presidente Trump de Estados Unidos en 2016. Estos conflictos han servido para probar la eficacia de las políticas públicas chinas. En unos casos, la polémica ha nacido de la preocupación expresada por Estados Unidos, y otros países, alrededor de las prácticas comerciales de China. Estas disputas han dado lugar a la imposición de aranceles sobre los paneles solares chinos, lo que indica el nivel de los retos que enfrenta China para mantener su dominio del mercado. A la fecha, China ha sabido manejar estos retos a través de los canales diplomáticos, pero las tensiones podrían aumentar a medida que China siga escalando su liderazgo.

En conclusión, el ascenso de China como potencia en el comercio mundial de paneles solares ha sido el resultado de una combinación muy favorable de factores, aunque debe quedar claro que, sin el apoyo del Gobierno, ni los avances tecnológicos, ni las economías de escala ni mucho menos las agresivas estrategias de mercado podrían haber impulsado la industria solar china a los niveles que tiene actualmente. En todo caso es sensato reconocer que el liderazgo de China ha contribuido a que la energía solar esté siendo crecientemente accesible a lo largo del planeta, y con ello la esperanza de que el combate al calentamiento global tenga un resultado exitoso.

Referencias

Bernreuter, J. (2022). *Polysilicon market research*. Bernreuter Research. <https://www.bernreuter.com/polysilicon/price-trend/>

- Best, R., Burke, P. J., & Nishitatenno, S. (2019). Evaluating the effectiveness of Australia's Small-scale Renewable Energy Scheme for rooftop solar. *Energy Economics*, 84(104475), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ene-co.2019.104475>
- Bolinger, M., Seel, J., Warner, C., & Robson, D. (2022). *Utility-Scale Solar: Empirical Trends in Deployment, Technology, Cost, and Value in the United States*. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://emp.lbl.gov/utility-scale-solar/>
- Bradford, T. (2006). *Solar Revolution: The Economic Transformation of the Global Energy Industry*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mit-press/6331.001.0001>
- Correa, G. (2017). Cambio climático, energía solar y disputas comerciales. *Portes*, 11(21), 7-26. <http://www.portesasiapacifico.com.mx/revistas/epocaiii/numero21/1.pdf>
- Deign, J. (2022). *How photovoltaic technology is changing the entire electricity system*. Discover CleanTech. <https://bit.ly/3M3o029>
- Finamore, B. A. (2020, enero). China's Quest for Global Clean Energy Leadership. *IAI Papers*, 20(5), 1-16. <https://www.iai.it/en/publicazioni/chinas-quest-global-clean-energy-leadership>
- Foster, R., Ghassemi, M., & Cota, A. (2009). *Solar energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420075670>
- Frankel, D., Perrine, A., & Pinner, D. (2016, octubre 28). *How solar energy can (finally) create value*. McKinsey & Co. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/how-solar-energy-can-finally-create-value>
- Frondel, M., Ritter, N., & Schmidt, C. M. (2008). Germany's solar cell promotion: Dark clouds on the horizon. *Energy Policy*, 36(11), 4198-4204. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.07.026>
- Grand View Research. (2021). *Solar Energy Systems Market* (Report ID: GVR-4-68039-967-8). <https://bit.ly/3nZ7KHz>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Hinken, D., Rauer, M., & Xiaoqing H. (2022). Solar cell efficiency tables (version 60). *Progress in Photovoltaics*, 30(7), 687-701. <https://doi.org/10.1002/pip.3595>
- Heggarty, T., & Attia, B. (2019). *Global Solar PV Markets*. Wood Mackenzie. <https://bit.ly/41cuQsK>

- Huang, P., Negro, S. O., Hekkert, M., & Bi, K. (2016). How China became a leader in solar PV: An innovation system analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 777-789. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.061>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- International Energy Agency. (2022a). *Renewables 2022: Analysis and forecast to 2027*. IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ada7af90-e280-46c4-a577-df2e4fb44254/Renewables2022.pdf>
- International Energy Agency. (2022b). *World Energy Investment*. IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b0beda65-8a1d-46ae-87a2-f95947ec2714/WorldEnergyInvestment2022.pdf>
- International Energy Agency (2022c). *World Energy Outlook 2022*. IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>
- International Trade Centre. (2022). *Trade Map [Data set]*. <https://www.trademap.org/>
- IRENA. (2022). *Renewable Energy Statistics 2022*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>
- Lens.org. (2023). *Patent Statistical Database*. <https://www.lens.org/>
- Merritt, H., & Barragán-Ocaña, A. (2023). The impact of market factors on the development of eco-friendly energy technologies: the case of bioethanol. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(2): 313-321. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02225-6>
- Moskovkin, D., Mathew, A. M., Guo, Q., Eyetsemitan, R., & Daim, T. U. (2018). Landscape Analysis: Regulations, Policies, and Innovation in Photovoltaic Industry. En T. U. Daim, L. Chan & J. Estep (Eds.), *Infrastructure and Technology Management* (pp. 3-17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68987-6_1
- Ondraczek, J., Komendantova, N., & Patt, A. (2015). WACC the dog: The effect of financing costs on the levelized cost of solar PV power. *Renewable Energy*, 75, 888-898. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.053>
- Our World in Data. (2023). *Solar (photovoltaic) panel prices [Data set]*. <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices>

- Pillai, U. (2015). Drivers of cost reduction in solar photovoltaics. *Energy Economics*, 50, 286-293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.015>
- Rafiq, M. A., Zhang, L., & Kung, C.-C. (2022). A Techno-Economic Analysis of Solar Energy Developmental Under Competing Technologies: A Case Study in Jiangxi, China. *SAGE Open*, 12(2), 1-15. <https://doi.org/10.1177/21582440221108166>
- Rodríguez, M. (2012). *The Social and Economic Impacts of Clean Energy Technology Exportation*. IFRI Energy Center. <https://bit.ly/3OtgNeC>
- Rúa-Ortiz, A. F., Merritt, H., & Valencia-Arias, J. A. (2020). Innovación tecnológica inducida: un análisis bibliométrico de la investigación en energía solar, 1960-2018. *Análisis Económico*, 35(89), 239-269. <https://analiseconomico.azc.uam.mx/index.php/rae/article/view/497>
- Shah, A., Torres, P., Tscharnner, R., Wyrsh, N., & Keppner, H. (1999). Photovoltaic Technology: The Case for Thin-Film Solar Cells. *Science*, 285(5428), 692-698. <https://doi.org/10.1126/science.285.5428.692>
- Shubbak, M. H. (2019). Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115(109383), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109383>
- Sivaram, V. (2018). *Taming the Sun: Innovations to Harness Solar Energy and Power the Planet*. The MIT Press.
- Tetteh, N., & Kebir, N. (2022). Determinants of Rooftop Solar PV adoption among urban households in Ghana. *Renewable Energy Focus*, 43, 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.11.003>
- The Economist. (2018, June 16). On the solarcoaster. *The Economist*, 427(9096), 57-59.
- The Economist. (2020, September 19). Petrostate v electrostate. *The Economist*, 436(9212), 22-24.
- Torani, K., Rausser, G., & Zilberman, D. (2016). Innovation subsidies versus consumer subsidies: A real options analysis of solar energy. *Energy Policy*, 92, 255-269. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.010>
- UN Comtrade Database. (2023). *Trade Data* [Data set]. <https://comtradeplus.un.org/TradeFlow>
- Wiatros-Motyka, M. (2023). *Global Electricity Review 2023*. Ember. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/>
- World Bank. (2013). *China 2030: Building a Modern, Harmonious, and Creative Society*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-9545-5>

- Zhang, A. H., Sirin, S. M., Fan, C., & Bu, M. (2022). An analysis of the factors driving utility-scale solar PV investments in China: How effective was the feed-in tariff policy? *Energy Policy*, 167(113044). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113044>
- Zhang, F., & Gallagher, K. S. (2016). Innovation and technology transfer through global value chains: Evidence from China's PV industry. *Energy Policy*, 94, 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.014>
- Zhi, Q., Sun, H., Li, Y., Xu, Y., & Su, J. (2014). China's solar photovoltaic policy: An analysis based on policy instruments. *Applied Energy*, 129, 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.014>