

Análisis de los costos de generación de energía solar fotovoltaica hacia el año 2050

Analysis of the costs of photovoltaic solar energy generation towards the year 2050

GÓMEZ, María del Carmen¹

GÁLVEZ, Dora C.²

MATA, Leovardo³

Resumen

Este artículo analiza la competitividad económica de la energía solar fotovoltaica (FV) mediante el análisis de los costos de generación de energía solar fotovoltaica. Para ello, se estima un modelo SARIMA en el periodo 2005-2023 y se realiza una simulación MonteCarlo hacia el año 2050. Se encuentra que el Costo Total Nivelado de Generación alcanzará 10.60 USD/MWh en 2050, convirtiendo a la energía solar FV en una fuente de generación de energía eléctrica competitiva frente a otras tecnologías.

Palabras clave: energía solar fotovoltaica, montecarlo, sarima, costo de generación de energía

Abstract

This paper analyzes the economic competitiveness of photovoltaic solar energy (PV) by examining the costs of PV energy generation. A SARIMA model is estimated in the period 2005–2023, and a Monte Carlo simulation is conducted for projections toward 2050. It is found that the Levelized Cost of Energy (LCOE) will reach 10.60 USD/MWh by 2050, positioning PV solar energy as a competitive source of electricity generation compared to other technologies.

Keywords: photovoltaic solar energy, montecarlo, sarima, cost of energy generation

1. Introducción

El constante avance de la tecnología ha requerido de un creciente consumo de energía para sostenerlo. Tal es el caso de la inteligencia artificial que, si bien se marcan sus orígenes a 1932, es en 2018 que se abren al mundo programas como BERT de Google que es entrenado con más de 3.3 miles de millones de palabras, o como OpenAI con GPT que utiliza aproximadamente 40 gigabytes de datos y 117 millones de parámetros. Para 2023 las inteligencias artificiales se integraron en el uso cotidiano de la tecnología y ocuparon, en hardware aproximadamente 300% más de energía, mientras que la International Energy Agency (IEA) pronostica un requerimiento de energía eléctrica para los centros de datos de hasta 800 TWh en 2026. Esto representa un incremento del 75% en 4 años (Kindig, 2024; Lawton, G., 2024).

¹ Profesora investigadora. Facultad de Economía y Negocios. Universidad Anáhuac México. México. E-mail: carmen.gomez@anahuac.mx

² Profesora investigadora. Facultad de Economía y Negocios. Universidad Anáhuac México. México. E-mail: doracarmen.galvez@anahuac.mx

³ Profesor investigador. Facultad de Economía y Negocios. Universidad Anáhuac México. México. E-mail: leovardo.mata@anahuac.mx

Aunado a lo anterior, el incremento en requerimientos de electricidad tiene impacto en el tipo de generación y en el aumento de CO₂. El Acuerdo de París, propone el uso de energías renovables para reducir las emisiones de CO₂ (United Nations Climate Change, 2016).

De acuerdo con el *Renewables Global Status Report* (Ren21, 2023), en la década del 2010 al 2020 la participación de electricidad en general y la proveniente de fuentes renovables, en particular, tuvieron los siguientes comportamientos: En el caso del sector de la construcción el aumento de la demanda de electricidad fue de 1.6%, siendo el 5.4% de energía renovable. El sector industrial aumentó la demanda de electricidad en 2.5%, con el 6.1% de energías renovables. El sector del transporte incrementó la demanda en 3.5%, mientras que el aumento en energías renovables fue de 7.0%. Finalmente, para la agricultura, el aumento fue de 4.3%, y 7.9% en energías renovables. Dentro de estos aumentos en la participación en las energías renovables, en el 2022 se estimó la contribución de China con, aproximadamente, la mitad de todas las adiciones de capacidad de energía renovable a nivel mundial.

En relación con los proyectos de energía solar FV a gran escala, durante el 2020, el tamaño, la cantidad de proyectos y los sistemas de distribución fueron más grandes en muchos países. Lo cual permitió a los desarrolladores, reducir aún más el precio de la electricidad solar a través de economías de escala en la construcción, en la operación y mantenimiento de los proyectos. Durante 2020, se finalizó la construcción de alrededor de 80 plantas generadoras de 50 MW o más; dichas plantas comenzaron su operación en cerca de 49 países. También se completaron al menos 30 proyectos con capacidad igual o mayor a 200 MW. Entre estas plantas destaca la Central Núñez de Balboa de 500 MW en España, la planta solar FV más grande de Europa (Pérez, 2020). O como el parque solar Bhadla de 2.2 GW de la India, que se convirtió en uno de los más grandes del mundo (Deboutte, 2022).

La inversión en energía y combustibles renovables cambió según la región, aumentando en China, India, Medio Oriente y África, pero cayendo en Estados Unidos (USA), en Europa y Asia (excluyendo China e India). China continuó representando la mayor parte de inversión mundial en energías renovables (excluida la energía hidroeléctrica mayores de 50 MW), con un 37%, seguido de Europa (22%), Asia-Oceanía (excluyendo China e India; 16%) y Estados Unidos (13%).

Ante este crecimiento acelerado en la creación de proyectos de plantas solares FV, este artículo plantea que existe una relación inversa entre el desarrollo de la tecnología y el Costo Total Nivelado de Generación (CTNG). Esta relación tiene un impacto económico positivo, ya que la tecnología ha favorecido la reducción de costos de generación de energía fotovoltaica. Para demostrar esta relación, este artículo presenta una revisión de la literatura sobre el desarrollo en la fabricación de tecnología solar FV, así como los costos de producción y realiza un análisis sobre estos elementos.

En el presente documento de investigación se presentan dos aportaciones. La primera aportación considera el CTNG de la energía solar FV que reportan países representativos en la publicación *Projected Cost of Electricity* (NEA/IEA) de los años 2005, 2010, 2015 y 2020 (International Energy Agency, 2005, 2010, 2015, 2020). Con dicha información se determina un CTNG promedio para los años mencionados y posteriormente se aplica un modelo Monte Carlo que permite realizar proyecciones quinquenales del CTNG de la energía solar FV del 2025 al 2050.

La segunda de ellas, proyecta la generación mensual de energía solar FV en el período junio 2023 hasta agosto 2030 utilizando datos mensuales de generación neta de electricidad en USA, considerando todos los sectores reportados de la IEA de febrero 1984 a mayo 2023. Y se ajusta un modelo estadístico SARIMA.

A continuación, se presenta la revisión de literatura que detalla el comportamiento de las energías renovables, los avances tecnológicos y el cambio en el mercado de las celdas FV. Posteriormente se describe la metodología

utilizada para el análisis y proyección del CTNG de energía solar FV, los resultados obtenidos y finalmente se presenta la discusión y conclusiones.

2. Revisión de literatura

Las energías sustentables han estado en el centro de la innovación tecnológica, esquemas de financiamiento y creación de políticas a nivel internacional de los últimos tiempos. Estas políticas también han incluido temas como cambio climático, el impacto en los mercados energéticos y el consumo creciente de energía.

La IEA (International Energy Agency, 2021) ha identificado a la energía solar como una opción eficiente, sustentable, confiable y limpia. Eventos sociopolíticos como la guerra entre Rusia y Ucrania, o eventos de salud como la pandemia COVID-19, han retrasado el avance en las propuestas y el alcance de los objetivos de reducir la emisión de CO₂ que se tienen planteados a nivel internacional para el 2030 y 2050, lo que resulta en un repunte del uso de carbón y petróleo, aumentando las emisiones de CO₂. Sin embargo, la generación de energía solar FV está demostrando ser una opción económicamente viable, en gran medida gracias a los avances tecnológicos que se han dado a lo largo de las diferentes etapas de fabricación e instalación de las nuevas plantas solares FV (International Energy Agency, 2022).

A pesar de los desafíos enfrentados por los actores en la industria solar FV, la competencia y la presión sobre los precios de la electricidad han motivado la inversión en tecnologías en toda la cadena de valor mejorando la eficiencia, y reduciendo el CTNG (Allouhi et al., 2022).

2.1. Capacidad instalada de la energía solar FV

A pesar del avance en la tecnología y el auge de la energía solar FV, en la mayoría de los países, todavía existe la necesidad de esquemas de apoyos financieros, así como marcos regulatorios adecuados y políticas gubernamentales que permitan la interconexión de las centrales de energía solar FV a la red de distribución de electricidad. En 2019, políticas gubernamentales, en particular las tarifas de alimentación tradicionales Feed in Tariff (FIT), mecanismo diseñado para incentivar la inversión en energías renovables en los que se garantiza a los productores un precio superior al del mercado (International Energy Agency, 2021; IRENA, 2019), continuaron impulsando la mayor parte del mercado global y la compra corporativa de energía solar FV.

A pesar de los desafíos a los que se enfrentan los actores en la industria solar FV, nuevas empresas continuaron ingresando. Por ejemplo, la mayor parte de los grandes fabricantes de energía eólica en Estados Unidos se expandieron a la energía solar FV y su almacenamiento, y tendencias similares son vistas en China, India y Europa. Los gigantes del petróleo y el gas, en particular las empresas que se encuentran en Europa, se están moviendo hacia el desarrollo y operación de proyectos solares, y el uso de energía solar FV para alimentar sus operaciones en todo el mundo.

Con respecto a la capacidad, el mercado de la energía solar FV mantuvo su racha récord, con la construcción de nuevas instalaciones, totalizando un estimado de 175 Gigawatts (GW) en 2021, 36 GW más que en 2020. Este fue el mayor incremento en la capacidad anual registrado hasta ese momento, con lo que la capacidad anual acumulada de energía solar FV a nivel global fue de 942 GW. En el 2021, la participación de energía solar a nivel global fue de 5% frente al 3.7% en 2020. Manteniéndose China, Estados Unidos, Japón, India y Alemania como los países líderes en capacidad instalada acumulada de energía solar fotovoltaica (REN21, 2021, 2022).

Para finales de 2021, la generación de energía solar FV continuó desempeñando un papel importante, pues en siete países contaron con capacidad instalada suficiente para atender al menos el 10% de su demanda de electricidad, contra solo dos países en 2020. Al menos 18 países presentaron suficiente capacidad solar FV instalada para satisfacer el 5% de su demanda de electricidad, frente a 15 países en 2020. En 2021, Australia

tuvo la mayor proporción de generación de energía solar fotovoltaica con un 15.5%, seguida de España (14.2%), Grecia (13.6%), Honduras (12.9%), Países Bajos (11.8%), Chile (10.9%) y Alemania (10.9%) (REN21, 2022).

En Europa, se han realizado estudios para determinar la viabilidad en la ubicación de plantas de energía solar FV en Europa, específicamente en los países que forman el EU-28 (Castillo *et al.*, 2016). Este bloque económico y político que reúne a veintiocho países agregó alrededor de 16 GW de energía solar FV conectada a la red, casi el doble de los 8.2 GW instalados en 2018, elevando la capacidad total a cerca de 131.7 GW. La mayoría de los mercados de la región han utilizado el mecanismo FIT debido a la competitividad de la generación solar, que está aumentando el interés en el abastecimiento de energía renovable corporativa, así como por gobiernos que buscan cumplir con los compromisos del Acuerdo de París en energía renovable a través de licitaciones. Al mismo tiempo, surgen nuevos desafíos, incluido el acceso a las conexiones a la red, la disponibilidad de suelo y la licencia de obra (particularmente en algunas áreas que ya tienen grandes instalaciones).

Europa agregó alrededor de 28 GW para un total de 191 GW, al finalizar el 2021 fue capaz de mantener su segundo lugar en el ranking de capacidad total instalada, con una cuota del 21% del mercado fotovoltaico mundial. Nuevas instalaciones en 28 países de la Unión Europea (UE-28) aumentaron un 29.5% respecto a 2020, con adiciones notables en países de toda la región. En total, el EU-28 conectó a la red eléctrica alrededor de 25 GW, para alcanzar 165.5 GW. Los principales mercados de la Unión Europea para nuevas incorporaciones fueron Alemania (5.3 GW), España (4.9 GW), Francia (3.4 GW), Holanda y Polonia (3.3 GW cada uno) (REN21, 2022).

Por otro lado, en Estados Unidos la energía solar FV representó en el 2020 alrededor del 18% del mercado mundial ocupando el segundo lugar (tercero si se considera al grupo europeo UE-28) para las nuevas instalaciones como para la capacidad acumulada. Estados Unidos agregó 19.2 GW para un total de 96 GW. También en el 2020, la energía solar FV representó casi el 43% de toda la energía nueva de ese país, la mayor hasta la fecha, 27 estados incorporaron más de 100 MW. California lideró a todos los estados en capacidad agregada (3.9 GW), seguido por Texas (3.4 GW) y Florida (2.8 GW). En el mismo año, la energía solar FV a escala de servicios públicos generó 87.7 TWh mientras que los sistemas de pequeña escala generaron un 41.7 TWh adicionales (REN21, 2021).

La rápida caída en los costos de las instalaciones de energía solar FV y de baterías ha impulsado un aumento en el número de proyectos de almacenamiento de energía solar FV en los Estados Unidos al permitirles competir con las plantas de generación de gas natural. Siendo el caso del proyecto Eland en el desierto de Mojave en California.

La capacidad instalada de energía solar en Norteamérica representó, en el 2021, alrededor del 21% de la energía solar FV mundial ocupando el tercer lugar a nivel mundial, después de China y Europa (EU-28), tanto en nuevas instalaciones como en capacidad total, sumando un récord de 26.9 GW, un 19% más para alcanzar una capacidad acumulada de 121.4 GW. La energía solar FV fue la principal fuente de capacidad adicional de generación en los Estados Unidos por tercer año consecutivo, representando un récord del 46% de su capacidad total (REN21, 2022).

En 2021, la adopción de energía solar FV en América Latina siguió creciendo, a pesar de una lenta recuperación de los impactos de la pandemia de COVID-19. Los cuatro países que adicionaron mayor capacidad fueron Brasil (5.5 GW), México (1.8 GW), Chile (1.3 GW) y Argentina (0.2 GW). Brasil lideró en capacidad instalada total, terminando el año con alrededor de 13 GW. La nueva capacidad adicional del país llevó a Brasil al quinto lugar en el ranking mundial (frente al noveno en 2020). En 2020, México incorporó una capacidad de 1.8 GW, teniendo una capacidad total de 5 GW y terminando el 2020 con 7.7 GW (REN21, 2021, 2022).

Por otra parte, por noveno año consecutivo, Asia dominó sobre las demás regiones en la construcción de nuevas instalaciones de energía solar FV, representando el 52% del total de capacidad adicional a nivel mundial en 2021.

En el caso de China, que ocupó el primer lugar en capacidad instalada de energía solar FV, incrementó la capacidad adicional en 54.9 GW para alcanzar una capacidad acumulada de 305.9 GW en 2021 (REN21, 2022).

China ha dominado la producción y envíos globales de celdas y módulos solares fotovoltaicos desde 2011, lo que significa que el país también ha dominado sus precios de venta, influyendo en los márgenes que reciben otros fabricantes. Esto siguió siendo el caso en 2019 ya que 123.5 GW de celdas y módulos fueron enviados a todo el mundo (39% más que en 2018). Del estimado de 78 GW de celda/módulo enviados por los 10 principales proveedores, más del 80% fue enviado por firmas chinas, el resto, en partes iguales del volumen procedente de la República de Corea (Hanwha Q-Cells), Taipei Chino (UREC) y Estados Unidos (Primer Solar) (REN21, 2020).

En 2021, la nueva inversión en energías renovables a nivel global alcanzó un récord, en un estimado de 366 mil millones de dólares. Este fue un aumento del 6.8% respecto a 2020, debido en gran parte al aumento global en instalaciones de energía solar FV. La inversión en energía renovable y combustibles ha superado los 250 mil millones de dólares anuales durante ocho años consecutivos. La energía solar FV y eólica continuaron dominando las nuevas inversiones en energías renovables, con la energía solar FV representando el 56% del total en 2021. El fuerte crecimiento de la inversión en energía solar FV que se registró en 2020 se expandió aún más en 2021, aumentando casi un 19% para alcanzar 205 mil millones de dólares.

En 2021, las instalaciones de energía renovable continuaron atrayendo más inversión que la relacionada con combustibles fósiles o nuclear. La inversión en nueva capacidad de energía renovable, contabilizó 69% de la inversión total comprometida (REN21, 2022).

En el caso específico de China, la inversión total en energías renovables aumentó 32% alcanzando la cifra de 137 mil millones de dólares en 2021. Esto se debió en gran parte a un aumento en inversión en energía solar FV, que creció un 115% hasta los 79 mil millones de dólares, un valor no visto desde 2017. China volvió a representar la mayor parte de la inversión global en energía renovable, con el 37% del total a nivel mundial (REN21, 2022).

2.2. Desarrollo tecnológico

Como se mencionó anteriormente, la generación de energía renovable ha tenido un gran auge, principalmente debido a los avances tecnológicos que se han llevado a cabo en las últimas décadas. Los elementos tecnológicos involucrados en la energía FV se pueden dividir en: colección de energía (celdas solares, revestimiento anti-reflejante, diodos bypass), construcción de paneles (encapsulación, recubrimiento, cobertura frontal, marco para sostener el panel), generación de energía (paneles solares o módulos solares, arreglos), electrónica de potencia (inversores, microinversores, optimizadores de potencia, controladores de carga), sistemas de colocación (montaje fijo, sistemas de rastreo del sol), almacenaje de energía (baterías, sistema de administración de baterías), mantenimiento y control (sensores de la intensidad de luz solar, colectores de datos, software de monitoreo remoto), componentes eléctricos (cableado, desconectores eléctricos). Mientras que algunas de las tecnologías nombradas pueden ser compartidas con otros métodos de generación de energía, las relacionadas con la colección y almacenaje son propias de la energía solar FV (Parida *et al.*, 2011; Sampaio & González, 2017; Singh, 2013).

Uno de los elementos más importantes dentro de la generación FV es la eficiencia de transformación eléctrica. A mayor eficiencia menor costo. Los dispositivos fotovoltaicos requieren un mínimo mantenimiento, trabajan de forma independiente y pueden tener salidas que van de los micro watts a los MW, las celdas fotovoltaicas están formadas de este tipo de dispositivos y convierten directamente la luz solar en energía (Parida *et al.*, 2011; World Energy Resources, 2013). La eficiencia en las celdas fotovoltaicas determina cuanta luz solar puede ser convertida a electricidad y puede ir de 15% hasta 44% (World Energy Resources, 2013). La eficiencia de las celdas fotovoltaicas está directamente ligada al material con el cuál están elaboradas. (World Energy Resources, 2013).

Entre los materiales usados en las celdas fotovoltaicas se encuentran: Teluro de Cadmio (CdTe) con una eficiencia aproximada de 22%. Selenio de Cobre Indio (CIS) o di-Selenio de Cobre Indio (CuInSe₂) con una eficiencia máxima de 20% y 13% para paneles de grandes áreas, Cobre Indio Galio Diselenuro (CIGS) con una eficiencia entre el 21% y 22.8%. Fosforo de Indio (InP). Silicón amorfo que tiene una eficiencia entre el 5% - 7% y si se usan diseños de doble unión se pueden tener eficiencias de 8% - 10%, dióxido de titanio (TiO₂), entre otros (Parida *et al.*, 2011; World Energy Resources, 2013). La eficiencia de las celdas solares basada en los materiales que las conforman pueden variar. El silicio monocristalino puede presentar una eficiencia máxima de 29% en laboratorios mientras que la eficiencia de los módulos comerciales está alrededor del 15%, en tanto que el silicio policristalino tiene una eficiencia aproximada de 14% (Allouhi *et al.*, 2022; Noguera-Salas *et al.*, 2018).

El material Perovskite está siendo investigado como una solución más económica para la construcción de celdas fotovoltaicas, ha mostrado una eficiencia en laboratorio de 22%, junto con silicio cristalino o una base de película delgada, ambos están atrayendo importantes capitales a la investigación y obteniendo eficiencias crecientes. Los investigadores continúan enfocándose sobre la estabilidad a largo plazo de las perovskities, el contenido de plomo y otros desafíos (Allouhi *et al.*, 2022).

Las mejoras en la tecnología de celdas y el diseño de módulos han permiti6 el desarrollo de módulos con mayor potencia. En 2019, SunPower (Estados Unidos) lanzó el panel residencial más poderoso de la industria, de 400 vatios y Canadian Solar reveló lo que afirmaba fue el primer módulo bifacial poly de más de 400 vatios para grandes proyectos. Elevar la potencia nominal aumenta la producción de electricidad por módulo, reduciendo así el número necesario para un proyecto, lo que significa que se requiere menos espacio y tierra asociada, y se reducen los costos de instalación. Los módulos bifaciales, por otro lado, pueden capturar la luz en ambos lados, también ofrecen ganancias potenciales en la producción (y, por lo tanto, un CTNG más bajo). Incluso genera mayores rendimientos si se usa en instalaciones con rastreadores (Singh, 2013).

Entre los desarrollos tecnológicos de las celdas fotovoltaicas se puede encontrar la célula solar realizada por científicos del instituto alemán Fraunhofer ISE. La célula solar tiene una triple unión de perovskite - perovskite – silicio, cuya eficiencia se estima en 20.1% y un voltaje de circuito abierto mayor a 2.8V (Heydarian *et al.*, 2023; Inj, 2023).

Investigadores de la facultad de ingeniería de la Universidad de Hokkaido, en Japón, exploran el uso de rayos infrarrojos, espectro ultravioleta y, en general, todo el espectro de radiación solar para la generación de electricidad. Esta investigación, actualmente en etapas primarias, plantea el uso de nano cristales de óxido de tungsteno impurificado de cobre que absorben luz a través del espectro que va desde luz visible hasta infrarroja (Jeem *et al.*, 2023; University, 2023).

Las exportaciones bifaciales de China (el mayor fabricante y mercado de paneles bifaciales) y la distribución geográfica de la demanda ha tenido un aumento creciente gracias a las mejoras en la tecnología de las celdas. Varios de los fabricantes han anunciado planes para aumentar la producción bifacial o lanzar nuevos productos (REN21, 2021, 2022).

Los operadores desempeñan un papel cada vez más importante en el desarrollo de proyectos, trabajando para maximizar la generación y reducir el CTNG, ya que el apoyo directo del gobierno disminuye y los activos solares se cotizan a precios de mercado. Las operaciones de la planta son cada vez más digitales y automatizadas a medida que la creciente competencia incita a las empresas a reducir aún más los costos, mejorar el rendimiento del sistema e integrar el almacenamiento de energía. La digitalización, gracias en gran medida a los avances de la tecnología inversa, está ayudando a mejorar los rendimientos (por ejemplo, a través del mantenimiento predictivo, teledetección y control, tanto satelitales como terrestres, así como esquemas numéricos de

pronóstico solar) y para proporcionar servicios tales como capacidad de rampa y regulación de frecuencia para respaldar la confiabilidad de la red (REN21, 2021, 2022).

Por otro lado, las tecnologías de control y mantenimiento remoto mejoran la eficiencia y la reducción de los costos de operación y mantenimiento, así como los tiempos de inactividad. Las tecnologías de drones permiten a los operadores acceder y analizar los datos de rendimiento a través de imágenes termográficas remotas de instalaciones. El interés en la limpieza robótica está aumentando en India, Israel y otros lugares con la finalidad de reducir la mano de obra, ahorrar agua y mejorar la eficiencia. Además de las investigaciones para el desarrollo en revestimientos superficiales que puedan reducir la acumulación de polvo en paneles solares, un avance que mejora el rendimiento del sistema y reduce los costos de limpieza en ambientes con mucho polvo (REN21, 2021, 2022).

A pesar de las mejoras en la tecnología y operación de la energía solar FV, existe la preocupación de mantener estándares de calidad altos a lo largo de toda la cadena de valor, pues se ha detectado que la presión que tienen los fabricantes de entregar los pedidos a tiempo y/o cumplir con los costos de entrega pactados, les puede llevar a tomar atajos en el control de calidad, particularmente en mercados emergentes.

Para abordar algunas de estas preocupaciones relacionadas con la calidad, en 2019 el Ministerio de Energías Nuevas y Renovables de India, aprobó una serie de directrices para los inversionistas bajo una orden de control de calidad que fue introducido por primera vez en 2017. Al mismo tiempo, en Bangladesh, las preocupaciones sobre las importaciones de productos de baja calidad que amenazan la sostenibilidad del mercado interno llevó al gobierno nacional a introducir estándares mínimos de calidad en módulos solares, controladores de carga y baterías. Por su parte, Australia hizo un progreso significativo sobre un nuevo código del consumidor para establecer estándares mínimos para protección del consumidor y buenas prácticas para energía solar FV, baterías y otros productos y servicios emergentes. También en 2019, las organizaciones de elaboración de normas continuaron trabajando para establecer rigurosos estándares para mejorar la calidad de la producción de módulos e instalación del sistema (REN21, 2019, 2020, 2021, 2022)

Si bien la vida técnica de los paneles solares puede incrementarse de 25 a 40 años, se espera que el tiempo para el desmantelamiento de las plantas solares en la próxima década sea mayor, y la investigación en opciones de segunda vida (reutilización) y fin de vida útil (reciclaje) ha sido tema de análisis en muchos países. Tal es el caso de la empresa PV Cycle (Francia) que recolectó, en 2019, más de 280,000 paneles solares FV para reciclar. También en 2019, Jinko Solar, uno de los principales fabricante de módulos FV del mundo se comprometió a obtener toda su energía de fuentes renovables, 70% para 2023 y 100% para 2025. A ellos le siguió, a principios de 2020, LONGi, que se comprometió con el 100% de electricidad renovable en todas sus operaciones para 2028 (REN21, 2020, 2021).

Además de impulsar la construcción de nuevas y más eficientes instalaciones de fabricación, la competencia ha alentado la inversión en tecnologías solares FV en toda la cadena de valor, y particularmente en celdas y módulos solares, para mejorar aún más las eficiencias y reducir el CTNG. Se logró un nuevo récord de eficiencia en celdas y módulos durante 2019. Tecnología de celdas monocristalinas, que perdió su liderazgo en 2002, mejoró su desempeño debido al gran número de envíos que se realizaron a nivel internacional.

La demanda de módulos de mayor eficiencia ha provocado un cambio hacia la tecnología Passivated Emitter Rear Cell (PERC). PERC se ha convertido en el nuevo estándar para la variedad de celdas solares de silicio monocristalino porque aumenta la eficiencia, lo que lo convierte en una opción económicamente atractiva para muchos fabricantes PERC (particularmente LONGi de China) (REN21, 2020, 2021).

Mientras que el PERC monocristalino es el foco de la mayor parte de expansiones en la capacidad, y su comercialización entró en línea en 2019, la industria ya está mirando más allá de PERC. En 2019, varios

fabricantes estaban reconvirtiendo o construyendo nuevas fábricas para producir tecnología de celdas de heterojunction (HJT), que ofrece mayores eficiencias y se produce a bajas temperaturas y con menos pasos de producción que otras tecnologías de celdas de alta eficiencia. Varias empresas con sede en China se han enfocado activamente en HJT. Los fabricantes europeos han considerado HJT como una opción para recuperar cuota de mercado. A finales 2019, REC (Noruega) comenzó la producción una celda y un módulo HJT en Singapur.

Un problema que enfrentan las compañías que fabrican paneles solares son las regulaciones y aranceles impuestos por ciertos países, tal es el caso de las compañías chinas, canadienses y camboyanas como BYD, Trina Solar, Longi, Canadian Solar, y New East Solar, que incurrieron en violaciones a leyes comerciales de Estados Unidos (anti-dumping y countervailing). Estas compañías son proveedoras de hasta el 80% de paneles solares en Estados Unidos. El mayor problema lo enfrentan los fabricantes locales ya que los productores extranjeros reciben, en muchas ocasiones, grandes subsidios, lo que abarata el precio, haciendo que los productores locales sean menos competitivos (Kennedy, 2023).

A continuación se presenta la metodología del CTNG aplicado a la energía solar FV que reportan países representativos en la publicación Projected Cost of Electricity (NEA/IEA) de los años 2005, 2010, 2015 y 2020 (International Energy Agency, 2005, 2010, 2015, 2020). Con dicha información se determina un CTNG promedio para los años mencionados y posteriormente se aplica un modelo Monte Carlo que permite realizar una proyección del CTNG de la energía solar FV para 2050.

3. Metodología del CTNG

La metodología usada para analizar la forma en la que los avances tecnológicos han impactado el costo del MWh generado en centrales solares fotovoltaica es el Costo Total Nivelado de Generación (CTNG) recomendado por la EIA/NEA es sus reportes Projected Cost of Electricity.

La metodología del CTNG proporciona información del costo de un MegaWatt-hora (MWh) generado en una central eléctrica, considerando los gastos de diseño, construcción de la central, puesta en servicio, combustible, operación y mantenimiento, y desmantelamiento. El CTNG es particularmente útil para comparar diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica (Gómez, M. C., 2008).

El costo nivelado está conformado por tres elementos:

Costos de inversión: son las erogaciones realizadas durante el período de diseño, ingeniería y construcción, esta incluye desde la colocación de la primera piedra hasta la puesta en operación de la central.

Costos del combustible: son los gastos referentes a la adquisición del combustible necesario para la operación de la central a lo largo de la vida económica. Cabe aclarar que en el caso de las central solar fotovoltaica esos costos son de cero.

Costos de operación y mantenimiento: son las erogaciones referentes a sueldos y salarios, prestaciones, gastos administrativos, servicio técnico, laboratorio, capacitación, impuestos, seguros, reparaciones, refacciones, mantenimiento menor y mayor, costo de materiales (consumo de agua, químicos, aditivos y lubricantes), entre otros, considerados en la operación y mantenimiento a lo largo de de la vida económica de la central.

La fórmula para obtener el CTNG (Gómez, M. C., 2008), expresado en dólares por MWh, es:

$$CTNG = CNI + CNC + CNOM$$

donde CNI es el Costo nivelado de inversión, CNC es el Costo nivelado del combustible y CNOM es el Costo nivelado de operación y mantenimiento.

La metodología mencionada se utiliza para obtener un CTNG promedio para los años considerados (2005, 2010, 2015 y 2020) y posteriormente se aplica un modelo Monte Carlo para estimar valores quinquenales del CTNG en el periodo 2025 al 2050, como se muestra a continuación.

4. Resultados y proyecciones del CTNG

En la revisión de literatura se menciona información referente a la tendencia decreciente de los costos de generación de la energía solar FV. Con el fin de ilustrar dicho comportamiento se utiliza el CTNG publicado en el NEA/IEA para los años 2005, 2010, 2015 y 2020 (International Energy Agency, 2005, 2010, 2015, 2020), utilizando una muestra de países que reportaron información para dichos años y se obtiene un CTNG promedio (Tabla 1).

En la Tabla 1 se observa que el CTNG promedio de los años y países seleccionados, se redujo de manera importante a través del tiempo.

Conocidos los CTNG promedio presentados en la Tabla 1, se utiliza el modelo de Monte Carlo considerando 10,000 escenarios para estimar el CTNG promedio quinquenal, iniciando en 2025 y finalizando en 2050.

El modelo MonteCarlo puede ser expresado, empleando μ y σ en la especificación del movimiento browniano (Chamorro, 2012), de tal forma que para el proceso estocástico X_t se define la tasa de variación como

$$\frac{dX}{X} = \mu dt + \sigma dz$$

Donde $dz = \varepsilon\sqrt{dt}$ y ε es una variable aleatoria normal estándar.

Tabla 1
CTNG 2005, 2010, 2015 y 2020

	Solar - dólares/MWh			
	CTNG 2005	CTNG 2010	CTNG 2015	CTNG 2020
Alemania	609.4	439.77	199.13	
Austria			123.20	125.20
Australia				45.83
Bélgica			229.89	111.12
Brasil				56.68
Canadá		435.96		77.56
Corea			211.75	119.31
China		189.34	95.68	62.30
Dinamarca	743.40		187.92	50.32
España			157.21	
Francia		388.14	212.27	42.16
Holanda		704.78	203.70	95.73
Hungría			217.31	105.77
India				44.15
Italia		615.98	212.31	72.29
Japón			373.65	211.92
Noruega				166.94
Portugal			121.20	
Reino Unido			352.63	
USA	269.50	332.78	150.76	42.67
PROMEDIO	540.77	443.82	203.24	89.37

Fuente: elaboración propia con datos de NEA/IEA 2005, 2010, 2015 y 2020 (IEA, 2005, 2010, 2015, 2020)

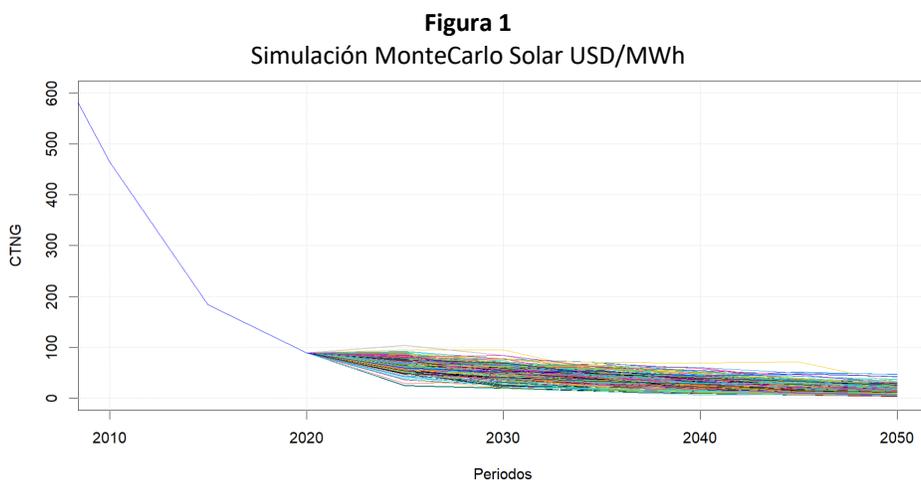
Resulta relevante señalar que se justifica el uso de la campana de Gauss para la generación de escenarios por medio del Teorema del Límite Central, donde se afirma que la media de un gran número de variables aleatorias independientes se aproximará a una distribución normal, sin importar la forma de la distribución de probabilidad inicial de la secuencia de variables aleatorias. En otras palabras, se justifica la inferencia estadística bajo la normal, inclusive cuando el conjunto de información poblacional no se comporte como una distribución de probabilidad normal (Llamosa *et al.*, 2011).

Los escenarios que se generan para trazar las diversas trayectorias se construyen numéricamente. Para ello, se emplea la versión discretizada (De Lara Haro, 2008) dada por las siguientes expresiones:

$$\frac{x_t - x_{t-1}}{x_{t-1}} = \mu\Delta t + \sigma\varepsilon_t\sqrt{\Delta t}$$

$$x_t = x_{t-1} + x_{t-1}[\mu\Delta t + \sigma\varepsilon_t\sqrt{\Delta t}]$$

El resultado de las expresiones anteriores para diferentes perturbaciones aleatorias hacia el año 2050 se muestran en la Figura 1.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 1, se puede visualizar que las trayectorias decrecen conforme transcurre el tiempo. Lo cual indica que las proyecciones del CTNG promedio quinquenal de la energía solar FV, mantengan una tendencia descendente en el periodo 2025 – 2050. Ver Tabla 2.

Tabla 2
CTNG (USD/MWh) - Energía solar FV

Periodo	CTNG
2005	540.77
2010	443.82
2015	203.24
2020	89.37
2025 e	62.65
2030 e	43.91
2035 e	30.78
2040 e	21.58
2045 e	15.12
2050 e	10.60

e/ estimado

Fuente: elaboración propia.

El CTNG promedio por MWh de los años 2030 y 2050 se encuentra dentro del rango publicado por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, 2019). En el año 2030, IRENA estima un rango para el CTNG que va de \$20 dólares/MWh a \$80 dólares/MWh. La proyección obtenida por las autoras es de \$43.91 dólares/MWh el cual se encuentra dentro de dicho rango. Mientras que para el 2050 IRENA estima un intervalo de \$10 dólares/MWh a \$50 dólares/MWh y el obtenido en la presente investigación es de \$10.60 dólares/MWh.

5. Resultados - Tendencia de la generación solar FV en USA

En esta sección se utiliza información pública de la capacidad instalada de un país líder en el sector solar FV con el fin de identificar que ésta ha aumentado en las últimas décadas principalmente debido a los avances tecnológicos y esquemas de financiamiento (REN 2022, REN 2021, REN 2020). Y posteriormente se estima su comportamiento futuro considerando los datos históricos.

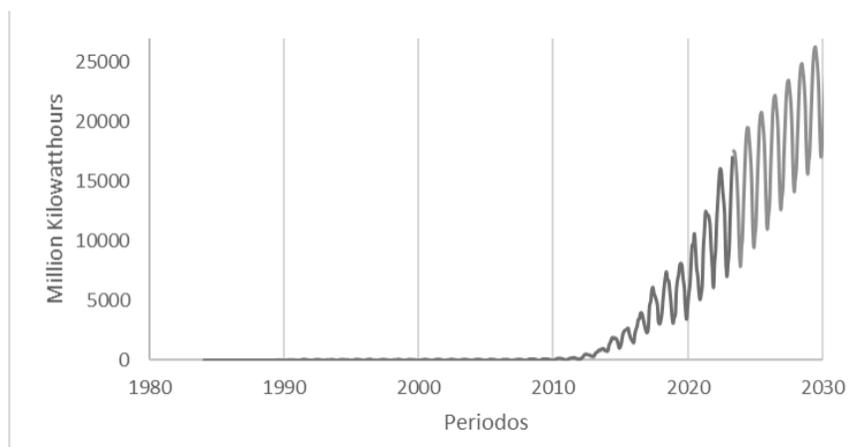
El país seleccionado es Estados Unidos por tener datos públicos disponibles, además de ser uno de los tres principales países generadores de energía solar a nivel internacional, después de China y Europa (EU-28).

Se utilizaron los datos mensuales correspondientes a la generación neta de electricidad de todos los sectores económicos (en millones de kWh) publicada por la Administración de Información de Energía de Estados Unidos (U.S. Energy Information Administration, 2023) que abarca el periodo de febrero de 1984 a mayo de 2023.

El programa que se aplicó es el R-Studio 4.31 para modelar la serie de tiempo y realizar proyecciones de la misma para el periodo junio 2023 a agosto 2030. El análisis de la generación de electricidad neta y_t (millones de kWh) se llevó a cabo mediante la metodología propuesta por Box-Jenkins (Makridakis & Hibon, 1997).

Debido a la periodicidad mensual de los datos, se consideró el componente estacional de la serie de tiempo, es decir, los patrones de variación que periódicamente aparecen en el mismo mes cada año. Estos patrones estacionales pueden atribuirse a eventos climáticos o económicos recurrentes, como la intensidad de la radiación solar en los diversos meses. Cabe señalar que los meses de junio a septiembre fueron los que presentaron una mayor generación. Ver Figura 2.

Figura 2
Simulación MonteCarlo Solar USD/MWh



Fuente: elaboración propia.

Para proyectar hacia el futuro la serie de tiempo de la generación, y_t , e incorporar el componente estacional y empleando la información histórica, se estimó un modelo Autorregresivo Integrado de Medias Móviles con estacionalidad (SARIMA, por sus siglas en inglés). Bajo esta especificación se pronosticó la serie de tiempo mensual histórica utilizada (febrero 1984 - mayo 2023) hacia el año 2030. Se puede observar con un 95% de nivel

de confianza que la generación de electricidad bajo esta fuente de energía sigue en ascenso con tendencia positiva y fuerte componente estacional.

El intervalo de pronóstico inicia en junio 2023 y finaliza en agosto 2030 para preservar un nivel confianza en la proyección mayor o igual a 90%.

En la serie de tiempo utilizada para el modelo SARIMA se tiene registrado que en mayo de 2023 la generación de energía eléctrica se situaba en 16,999.78 millones de kWh y se estima que para agosto del año 2030 alcance un pico de 25,898.01 millones de kWh, Figura 2.

Asimismo, en la Tabla 3 se presentan los coeficientes estimados del modelo SARIMA, en donde se puede observar que los coeficientes son significativos, pues el valor p es menor al nivel de significancia de 10%.

Tabla 3
Modelo SARIMA(2,1,2)(1,1,0)[12] para la generación neta mensual de energía eléctrica mediante energía solar FV (todos los sectores) en 1984-2030.

	AR(1)	AR(2)	MA(1)	MA(2)	SAR(1)
Coefficientes	1.718	-0.9255	-1.854	0.9681	-0.553
Error estándar	0.0229	0.024	0.0134	0.013	0.0462
Estadístico t	75.022	-38.563	-138.358	74.469	-11.970
Valor p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sigma	248.99				
Logverosimilitud	-3184.61				
AIC	6381.22				

Fuente: elaboración propia.

La especificación del modelo se puede escribir como $SARIMA(p, q, d)(P, Q, D)[s]$, de acuerdo con la descripción teórica (Rodríguez, 2021) para la realización del proceso estocástico y_t , cuyas ecuaciones son:

$$\varphi_p(B)\Phi_q(B^s)\nabla^p y_t = c + u_t$$

$$(1 - \varphi_p(B))(1 - \Phi_q(B^s))(1 - B^p)y_t = c + u_t$$

Donde:

y_t es la generación neta mensual de electricidad (todos los sectores) utilizando energía solar FV en millones de kWh.

B es el operador de rezago

φ es el polinomio asociado a los coeficientes ARMA

c es una constante

u_t es ruido blanco débil

Φ es el polinomio asociado a los coeficientes SAR (Aguirre & Contreras, 2009).

El conjunto de parámetros $(p, q, d)(P, Q, D)[s]$ tiene un significado específico: p es número de rezagos de y_t en el componente autorregresivo (AR), q es el número de términos de media móvil (MA) que abarca los errores aleatorios pasados que se utilizan para predecir y_t . El parámetro d es el número de veces que se ha diferenciado la serie temporal para convertirla a estacionaria.

El parámetro P es el número de términos autorregresivos estacionales en el modelo (SAR) y Q es el el número de términos de media móvil estacionales en el modelo. Estos términos tienen en cuenta la autocorrelación estacional. El coeficiente D es el orden de diferenciación estacional y s indica la longitud del ciclo estacional en la serie temporal (Cong et al., 2019).

Los resultados de las proyecciones del modelo indican que la generación de energía solar continuará con una tendencia creciente, y se estima que para agosto del año 2030 alcance un pico de 25,898.01 millones de kWh.

4. Conclusiones

En la presente investigación se analizó la evolución de la generación solar FV. Se utilizaron datos de generación neta de electricidad de todos los sectores de energía solar de Estados Unidos y se aplicó la metodología propuesta por Box-Jenkins en la generación de electricidad neta (en millones de kWh) en el periodo 1984 – 2023. Y se estima que para agosto del año 2030 alcance un pico de generación de 25,898.01 millones de kWh.

Por otro lado, se realizaron proyecciones quinquenales del CTNG del 2025 al 2050. Utilizando el programa R-Studio 4.31 y los CTNG promedio de países elegidos en los años 2005, 2010, 2015 y 2020, se aplicó el modelo Monte Carlo para obtener las proyecciones para el periodo 2025 - 2050.

El análisis mostró, para el 2050, un CTNG de 10.60 dólares/MWh. Lo que convierte a la energía solar FV en una fuente de generación de energía eléctrica competitiva desde el punto de vista técnico y económico.

Los avances tecnológicos que han tenido lugar en las diferentes etapas de elaboración de las celdas solares, la mejora en sus eficiencias, ha permitido una mejora en la viabilidad económica de las centrales solares FV, lo cual ha incentivado la construcción de un mayor número de ellas y por ende un incremento en la generación solar.

Como conclusión de esta investigación, y dados los valores obtenidos en la energía solar FV, tanto para las proyecciones de CTNG como de la generación de energía solar, se recomienda destinar mayores recursos financieros a las tecnologías energéticas renovables como la solar.

La limitante de esta investigación fue el acceso a un mayor número de bases de datos con información específica de la generación y costos de la industria solar FV en países representativos.

Para trabajo futuro se sugiere la comparación del CTNG de la energía solar FV con otras energías renovables como la eólica, así como con la del ciclo combinado. Y considerar externalidades ambientales en este último caso.

Referencias bibliográficas

- Aguirre, B. I., & Contreras, J. (2009). *A model SARIMA to predict chilean unemployment*. MPRA. Munich Personal RePEc Archive, 19369, 1–16.
- Allouhi, A., Rehman, S., Buker, M. S., & Said, Z. (2022). Up-to-date literature review on Solar PV systems: Technology progress, market status and R&D. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132339.
- Castillo, C. P., e Silva, F. B., & Lavalle, C. (2016). An assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28. *Energy Policy*, 88, 86–99.
- Chamorro, D. (2012). Algunas herramientas matemáticas para la economía y las finanzas: El movimiento Browniano y la integral de Wiener. *Analítika: revista de análisis estadístico*, 3, 3–15.
- Cong, J., Ren, M., Xie, S., & Wang, P. (2019). Predicting seasonal influenza based on SARIMA model, in mainland China from 2005 to 2018. *International journal of environmental research and public health*, 16(23), 4760.

- De Lara Haro, A. (2008). *Medición y control de riesgos financieros*. Editorial Limusa.
- Deboutte, G. (2022, julio 25). Las mayores centrales solares del mundo. 1: El parque solar de Bhadla (La India). *pv magazine Latin America*. <https://www.pv-magazine-latam.com/2022/07/25/las-mayores-centrales-solares-del-mundo-1-el-parque-solar-de-bhadla-la-india/>
- Gómez, M. C. (2008). *La energía nuclear: Una alternativa de generación de energía eléctrica de carga base en México*. Universidad Anáhuac México.
- Heydarian, M., Heydarian, M., Bett, A. J., Bivour, M., Schindler, F., Hermlé, M., Schubert, M. C., Schulze, P. S. C., Borchert, J., & Glunz, S. W. (2023). Monolithic Two-Terminal Perovskite/Perovskite/Silicon Triple-Junction Solar Cells with Open Circuit Voltage >2.8 V. *ACS Energy Letters*, 4186–4192. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.3c01391>
- Ini, E. (2023, septiembre 20). Célula solar de triple unión de perovskita-perovskita-silicio con una tensión en circuito abierto superior a 2,8 V. *pv magazine Mexico*. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/09/20/celula-solar-de-triple-union-de-perovskita-perovskita-silicio-con-una-tension-en-circuito-abierto-superior-a-28-v/>
- International Energy Agency. (2005). *Projected Costs of Generating Electricity 2005 – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2005>
- International Energy Agency. (2010). *Projected Costs of Generating Electricity 2010 – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2010>
- International Energy Agency. (2015). *Projected Costs of Generating Electricity 2015 – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2015>
- International Energy Agency. (2021). *World Energy Outlook 2021*. En IEA. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- International Energy Agency. (2022). *World Energy Outlook 2022*. En IEA. IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- International Energy Agency, N. (2020). *Projected costs of generating electricity 2020*.
- IRENA. (20019). *EL FUTURO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA*. http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_summary_2019_ES.pdf?la=en&hash=DE82F7DC53286F720D8E534A2142C2B8D510FB0B#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20solar%20FV%20generar%C3%ADa,generaci%C3%B3n%20m%C3%A1s%20importantes%20para%202050.&text=EST%A%20TRANSFORMACI%C3%93N%20SOLO%20SER%C3%81%20POSIBLE,EN%20LAS%20TRES%20PR%C3%93XIMAS%20D%C3%89CADAS.
- Jeem, M., Hayano, A., Miyashita, H., Nishimura, M., Fukuroi, K., Lin, H.-I., Zhang, L., & Watanabe, S. (2023). Defect Driven Opto-Critical Phases Tuned for All-Solar Utilization. *Advanced Materials*, n/a(n/a), 2305494. <https://doi.org/10.1002/adma.202305494>
- Kennedy, R. (2023, agosto 18). Five major solar panel suppliers found in violation of antidumping laws. *Pv Magazine USA*. <https://pv-magazine-usa.com/2023/08/18/five-major-solar-panel-suppliers-found-in-violation-of-antidumping-laws/>

- Kindig, B. (2024). AI Power Consumption: Rapidly Becoming Mission-Critical. *Forbes*.
<https://www.forbes.com/sites/bethkindig/2024/06/20/ai-power-consumption-rapidly-becoming-mission-critical/>
- Lawton, G. (2024). What is Generative AI? Everything You Need to Know. *Enterprise AI*.
<https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/generative-AI>
- Llamosa, L. E., Rivera, J. H., & Torres, J. I. (2011). Utilización del teorema del límite central en el cálculo de la incertidumbre de medición. *Revista Colombiana de Física*, 43(3), 690.
- Makridakis, S., & Hibon, M. (1997). ARMA models and the Box–Jenkins methodology. *Journal of forecasting*, 16(3), 147–163.
- Noguera-Salas, O., Pinto-García, R. A., & Villarreal-Padilla, J. E. (2018). La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares. *Iteckne*, 15(1), 7–16.
- Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>
- Pérez, E. (2020). La mayor planta fotovoltaica de Europa está en Badajoz: Así es Núñez de Balboa, con 500 MW y más de 1.400.000 paneles solares. *Xataka*. <https://www.xataka.com/energia/mayor-planta-fotovoltaica-europa-esta-badajoz-asi-nunez-balboa-500-mw-1-400-000-paneles-solares>
- REN21. (2019). *Renewables 2019 Global Status Report* (Nos. 978-3-9818911-7-1; p. 480).
- REN21. (2020). *Renewables 2020—Global status report* | INIS. <https://www.ren21.net/gsr-2020/>
- REN21. (2021). *Renewables 2021—Global status report* | INIS. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf
- REN21. (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. <https://www.ren21.net/gsr2022-full-report>
- Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590–601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
- Singh, G. K. (2013). Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, 53, 1–13.
- United Nations Climate Change. (2016). Secretaría de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Acuerdo de París. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- University, H. (2023, septiembre 15). Harnessing All-Solar Energy: Nanocrystal Breakthrough Transforms Infrared Light Conversion. *SciTechDaily*. <https://scitechdaily.com/harnessing-all-solar-energy-nanocrystal-breakthrough-transforms-infrared-light-conversion/>
- U.S. Energy Information Administration. (2023). Total Energy Monthly Data—U.S. Energy Information Administration (EIA). <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/index.php>
- World Energy Resources. (2013). World Energy Resources: 2013 Survey. World Energy Council. <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-resources-2013-survey>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
 Atribución-NoComercial 4.0 Internacional