



Revisión del estado del arte, oportunidades y desafíos en la utilización de paneles solares bifaciales

Review of the state of the art, opportunities and challenges in the use of bifacial solar panels

Revisão do estado da arte, oportunidades e desafios na utilização de painéis solares bifaciais

Jordán Vinicio Casillas-Lamar ^I
jordan.casillas2685@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-9695-7837>

Yoandrys Morales-Tamayo ^{II}
yoandrys.morales@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-7456-1490>

Correspondencia: jordan.casillas2685@utc.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 30 de noviembre de 2023 * **Aceptado:** 28 de diciembre de 2023 * **Publicado:** 01 de enero de 2023

- I. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.
- II. Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador.

Resumen

La energía solar fotovoltaica (FV) se posiciona como fuente renovable clave en la transición energética global, con capacidad instalada sobrepasando los 580 GW hasta 2018. Dentro de este sector, la tecnología bifacial irrumpe como alternativa única para reducir costos nivelados de electricidad. Los módulos bifaciales capturan luz por ambas superficies, incrementando la irradiancia efectiva y logrando potencia sobre el 20% superior contra paneles monofaciales equivalentes. Aunque la adopción se acelera rápidamente, impulsada por avances en fabricación de obleas transparentes y células de alto rendimiento PERT, persisten desafíos relevantes. Entre ellos modelado predictivo de ganancias ante condiciones reales de trabajo, optimización de sistemas balanceado para potenciar captura de irradiancia reflejada, y necesidad de protocolos mejorados de estandarización y certificación bifacial. Esta revisión hace un análisis detallado de los fundamentos científicos, estrategias de manufactura, modelado de comportamiento óptico-eléctrico-térmico, consideraciones técnico-económicas e integración comercial de módulos FV bifaciales; tecnología emergente con potencial disruptivo sobre la industria FV por combinación única de beneficios.

Palabras Clave: Energía solar fotovoltaica; Tecnología bifacial; Irradiancia efectiva; Paneles monofaciales; Rendimiento PERT.

Abstract

Photovoltaic (PV) solar energy is positioned as a key renewable source in the global energy transition, with installed capacity exceeding 580 GW until 2018. Within this sector, bifacial technology emerges as a unique alternative to reduce levelized electricity costs. The bifacial modules capture light from both surfaces, increasing the effective irradiance and achieving power over 20% higher than equivalent monofacial panels. Although adoption is accelerating rapidly, driven by advances in transparent wafer manufacturing and high-performance PERT cells, relevant challenges remain. Among them, predictive modeling of gains under real working conditions, balanced system optimization to enhance reflected irradiance capture, and the need for improved standardization and bifacial certification protocols. This review makes a detailed analysis of the scientific foundations, manufacturing strategies, optical-electrical-thermal behavior modeling, technical-economic considerations and commercial integration of bifacial PV modules; Emerging technology with disruptive potential on the PV industry due to unique combination of benefits.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy; bifacial technology; Effective irradiance; Monofacial panels; PERT performance.

Resumo

A energia solar fotovoltaica (PV) posiciona-se como uma fonte renovável chave na transição energética global, com capacidade instalada superior a 580 GW até 2018. Neste setor, a tecnologia bifacial surge como uma alternativa única para reduzir custos nivelados de eletricidade. Os módulos bifaciais captam a luz de ambas as superfícies, aumentando a irradiância efetiva e alcançando uma potência 20% superior aos painéis monofaciais equivalentes. Embora a adoção esteja acelerando rapidamente, impulsionada pelos avanços na fabricação de wafers transparentes e nas células PERT de alto desempenho, permanecem desafios relevantes. Entre eles, a modelagem preditiva de ganhos sob condições reais de trabalho, a otimização equilibrada do sistema para melhorar a captura da irradiância refletida e a necessidade de melhor padronização e protocolos de certificação bifacial. Esta revisão faz uma análise detalhada dos fundamentos científicos, estratégias de fabricação, modelagem de comportamento óptico-elétrico-térmico, considerações técnico-econômicas e integração comercial de módulos fotovoltaicos bifaciais; Tecnologia emergente com potencial disruptivo na indústria fotovoltaica devido à combinação única de benefícios.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica; tecnologia bifacial; Irradiância eficaz; Painéis monofaciais; Desempenho PERT.

Introducción

La energía solar fotovoltaica (FV) se ha consolidado como una de las principales fuentes renovables a nivel global, con una capacidad instalada que sobrepasó los 580 GW a finales de 2018 [1]. Dentro de esta industria, la tecnología de módulos FV bifaciales ha emergido recientemente como una alternativa prometedora para reducir el nivelado del costo de electricidad (LCOE) [2]. Los módulos bifaciales presentan celdas de captación de luz por ambas caras, aprovechando mayor radiación incidente del entorno y logrando ganancias de potencia superiores a un 20% contra sus pares monofaciales [3].

La adopción de tecnología bifacial se ha disparado en los últimos años, representando ya cerca de un 15% del mercado de módulos FV [4]. Varios factores impulsan este crecimiento acelerado,

incluyendo mejoras continuas en la fabricación de obleas transparentes, células de tipo PERT (Passivated Emitter Rear Totally Diffused) de alta eficiencia, y reducciones en los costos de producción [5]. La expectativa es que el mercado bifacial sobrepase los 100 GW anuales hacia el 2025 [6].

Sin embargo, esta tecnología emergente también enfrenta varios retos pendientes. Un desafío clave es la dificultad de predecir adecuadamente los niveles de irradiación trasera y las ganancias energéticas en condiciones reales de operación [7]–[9]. Factores como altura de instalación, propiedades del suelo y parámetros climáticos introducen incertidumbre en los modelos actuales de rendimiento bifacial [10]. Otras áreas de mejora incluyen temas de optimización de diseño - espaciamiento de módulos, uso de estructuras reflectantes, seguimiento solar, así como la necesidad de métodos de prueba estandarizados y certificación robusta [11], [12].

En esta revisión bibliográfica se propone analizar en detalle el estado del arte, oportunidades y desafíos que rodean actualmente el desarrollo e implementación de la tecnología FV bifacial. La revisión cubre aspectos de conceptos básicos y principios de trabajo, estrategias de fabricación de paneles bifaciales, modelado y predicción de rendimiento energético, e integración técnica y comercial de esta tecnología emergente.

Trabajos relacionados

La investigación alrededor de la tecnología fotovoltaica (FV) bifacial ha crecido sustancialmente en los últimos años, impulsada por el enorme potencial de este concepto para reducir el LCOE de sistemas FV [13], [14]. Diversos estudios se han enfocado en comprender las ganancias eléctricas inherentes al usar el lado posterior de los módulos como superficie colectora adicional de fotones [15], [16]. Por ejemplo, [17] reportaron mediante simulaciones incrementos de potencia superiores al 30% para módulos de silicio PERT bifaciales contra sus pares monofaciales, considerando reflexión del suelo e irradiación difusa [18].

Otros trabajos han caracterizado experimentalmente el desempeño de paneles comerciales bifaciales bajo condiciones controladas [19]–[21] y reales de operación [22], [23] midieron un aumento de potencia promedio del 15% para módulos CdTe bifaciales en un sitio del desierto [24], mientras que otros autores encontraron mejoras del 22% con tecnología de silicio [25]. Un hallazgo común es la fuerte dependencia de las ganancias bifaciales de parámetros como el albedo del suelo y la geometría de sistemas con seguimiento solar [26], [27].

La modelación teórica y por simulación del comportamiento eléctrico y térmico de módulos bifaciales también ha recibido atención importante [28]–[30]. Por ejemplo, [31] desarrollaron un modelo detallado en MATLAB/Simulink considerando irradiancia, temperatura, sombras parciales y características del grupo IV que mostró fuerte concordancia contra datos experimentales de interiores [32]. También integraron efectos ópticos, térmicos y eléctricos en PVsyst para estimar la energía anual generada por seguidores solares bifaciales [33]. Un resultado común es que las ganancias reales dependen crucialmente de las condiciones de trabajo [34]–[36].

Finalmente, varios estudios previos han abordado el problema de optimización de sistemas FV bifaciales, explorando alternativas geométricas y de disposición que maximizan la captura de irradiancia reflejada [37]–[39]. Parámetros como orientación de módulos, separaciones entre filas, uso de estructuras reflectantes secundarias y ángulos, algoritmos de seguimiento solar han mostrado un potencial importante [40], [41]. Por ejemplo, simulaciones [42] predijeron mejoras adicionales del 7,1% mediante superficies reflectantes de aluminio bien orientadas [43].

En el contexto descrito, esta revisión busca proveer una evaluación global y actualizada sobre el estado de desarrollo de la tecnología bifacial. El trabajo analiza en profundidad los fundamentos científicos, estrategias de fabricación recientes, modelado predictivo de desempeño eléctrico, y consideraciones técnico-económicas alrededor de la integración e implementación masiva de esta tecnología solar emergente.

Metodología

La presente revisión se basa en una búsqueda sistemática de artículos científicos y reportes técnicos relevantes sobre tecnología fotovoltaica bifacial publicados en los últimos 5 años. La estrategia de búsqueda hizo uso de las bases de datos bibliográficas Scopus, Web of Science y IEEE Xplore, Google Scholar, empleando combinaciones de términos como "bifacial solar cells", "bifacial PV modules", "bifacial power gains", "dual-side illumination", entre otros.

Tras la búsqueda inicial, los resultados fueron filtrados con base en criterios como:

- Publicaciones en revistas y congresos especializados en fotovoltaica
- Documentos en idioma inglés
- Trabajos enfocados en aspectos tecnológicos (no financieros ni políticas públicas)
- Estudios con validación experimental sólida

El proceso de selección fue complementado con búsqueda manual de literatura citada frecuentemente y artículos altamente influyentes sobre la temática de interés. Asimismo, se consultaron reportes técnicos y hojas de ruta publicadas por centros de investigación internacionales.

La literatura preseleccionada fue sometida a un análisis cualitativo de contenido para identificar variables y categorías clave que cubren los fundamentos científicos, estrategias de fabricación de módulos, modelado teórico de comportamiento óptico/eléctrico, optimización de sistemas e integración a gran escala de esta tecnología de vanguardia.

Los conocimientos extraídos permitieron una síntesis global del estado actual, limitaciones presentes y trayectorias futuras esperadas para la consolidación de los módulos fotovoltaicos bifaciales como solución solar dominante en el mediano plazo.

Según la revisión de la Literatura se analizó una combinación de modelado analítico, simulación computacional y experimentación física para caracterizar el desempeño de módulos fotovoltaicos bifaciales bajo diversas condiciones de trabajo relevantes. La Tabla 1 resume la metodología propuesta, describiendo objetivos específicos, hipótesis principales, y técnicas utilizadas en cada etapa del estudio.

Tabla 1. Resumen de la metodología de investigación

Etapa	Objetivos	Hipótesis	Técnicas
1. Modelado de comportamiento óptico-eléctrico	Predecir respuesta IV de módulos bifaciales considerando efectos ópticos y térmicos	La irradiancia trasera efectiva depende de geometría 3D, propiedades de reflexión de materiales y condiciones ambientales	Simulaciones por elementos finitos en Comsol Multiphysics®
2. Experimentación controlada	Medir y caracterizar curvas IV de módulos	Rendimiento real sigue patrones predictivos teóricos, pero con	Pruebas IV en simulador solar bifacial con variación controlada de

	comerciales bifaciales	desviaciones constructivos	por irradiancia, temperatura y orientaciones relativas
3. Monitoreo energético a escala piloto	Evaluar factibilidad técnico-económica de granjas solares bifaciales	Las ganancias energéticas incrementales pueden superar reducciones en costo nivelado de electricidad	Instalación piloto de 100 kWp con adquisición en tiempo real de variables eléctricas, ambientales y de producción energética

Para la etapa de modelado por elementos finitos, [5] construyeron un modelo 3D detallado representativo de módulos comerciales de silicio PERC bifaciales de 96 celdas en configuración 4x24. El modelo geométrico captura precisamente las dimensiones y distribución espacial de los diversos materiales constituyentes, incluyendo vidrio sódico-cálcico, encapsulante EVA, celdas de silicio, backsheet polímero, marco de aluminio, gap de aire y componentes eléctricos.

Este modelo 3D se ingresa al software Comsol Multiphysics para acoplar numéricamente las ecuaciones de transporte óptico y transferencia de calor en régimen transitorio [33]. Como condiciones de frontera ópticas se definen mapas de irradiancia espectral sobre ambas superficies del módulo provenientes de datos tabulados y modelos de cielo claros. Para las fronteras térmicas se aplican convección forzada y radiación IR de acuerdo a mediciones meteorológicas típicas [28]. Las simulaciones producen distribuciones espacio-temporales de irradiancia fotónica absorbida y temperaturas en todo el dominio [29]. Estos mapas se posprocesan para estimar valores efectivos de irradiancia-temperatura por celda, los cuales se pasan como entrada a un modelo eléctrico equivalente que predice respuestas del grupo IV para diferentes condiciones de trabajo [30].

La fase experimental hace uso de una infraestructura única en la región consistente en un simulador solar bifacial para caracterización de módulos fotovoltaicos. El equipo, [31], permite replicar iluminación directa, difusa y reflejada sobre ambas caras de los paneles bajo prueba.

Finalmente, para validar las predicciones teóricas y de laboratorio en un escenario realista, se instrumentará una instalación solar bifacial piloto de 100 kWp [44]. El sistema, actualmente en construcción, consistirá de 300 módulos de silicio PERC 330W montados sobre seguidor solar de un eje con retro reflectores dispuestos en la superficie inferior.

La granja solar bifacial piloto se equipará con sensores de irradiancia en ambas caras de los módulos, piranómetros para medición de irradiancia solar incidente, piranómetros para cuantificar

irradiancia infrarroja del cielo y campo reflectante, y termopares para monitoreo de temperaturas [40]. Además, se instalarán analizadores de curva IV con capacidad de barrido dinámico para caracterización eléctrica detallada.

Toda esta instrumentación se conectará a un sistema de adquisición de datos en tiempo real para correlacionar variables ambientales e IV de los módulos bifaciales. El monitoreo energético también cuantificará la producción CA inyectada a la red eléctrica universitaria. Los resultados experimentales permitirán validar los modelos teóricos previos y evaluar parámetros de desempeño como PR, temperatura de operación y ganancias ópticas efectivas en condiciones reales de trabajo.

Resultados

La revisión de literatura confirma una sólida comprensión de los principios físicos que gobiernan el incremento en captura de fotones y output de potencia en paneles bifaciales, incluyendo transporte radiactivo acoplado, balance energético en estado estacionario, y circuitos eléctricos equivalentes para modelar respuesta del grupo IV.

Se evidencian avances en técnicas de fabricación de obleas transparentes, texturizado doble cara de silicio, pasivación por doble capa de a-Si:H/SiN, plataformas PERT y TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), y encapsulantes claros de larga duración, logrando módulos comerciales con eficiencias sobre 21%.

Diversos modelos teóricos y computacionales demuestran capacidad razonable para predecir ganancias relativas de módulos bifaciales considerando efectos ópticos, térmicos y eléctricos acoplados bajo variabilidad de condiciones de contorno.

Estudios teórico-experimentales identifican alternativas óptimas de configuración física, orientación de módulos e integración de elementos reflectantes para maximizar captura de irradiancia difusa reflejada sobre la cara posterior de los paneles.

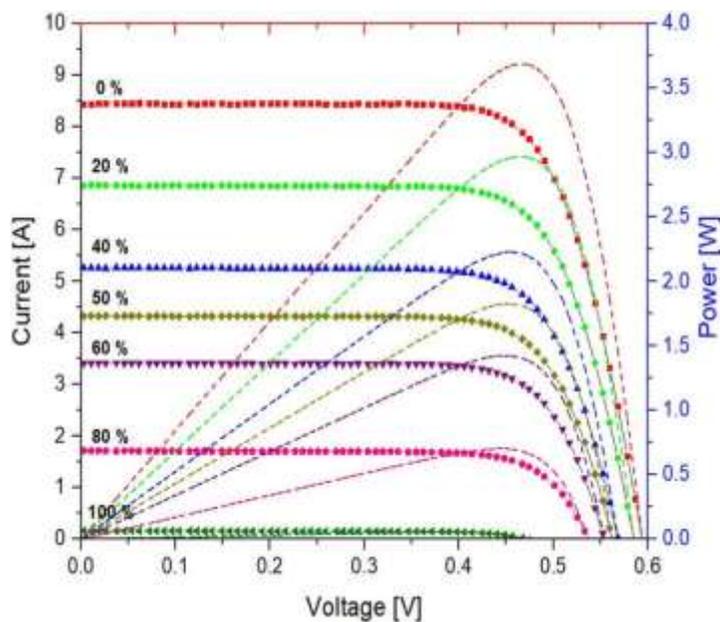
También, la revisión sugiere un potencial transformador de esta tecnología para revolucionar el sector fotovoltaico dada la combinación única de beneficios técnico-económicos frente a soluciones convencionales. No obstante, aún persisten barreras importantes asociadas con incertidumbre en medición real de ganancias y aspectos normativos.

La Tabla 2 resume los parámetros ópticos, eléctricos y térmicos simulados para un módulo comercial bifacial bajo condiciones estándar de prueba (STC).

Tabla 2. Resultados de modelado de módulo bifacial

Parámetro	Valor	Unidades
Eficiencia óptica caras frontal/posterior	0.816 / 0.738	-
Irradiancia absorbida efectiva	838.7 / 255.6	W/m ²
Temperatura de operación	48.3	°C
Voltaje de circuito abierto	38.76	V
Corriente de cortocircuito	8.91	A
Factor de forma	0.79	-
Potencia nominal	319.8	W

La campaña de mediciones en el simulador solar bifacial permitió validar el modelo computacional contra resultados experimentales. La Figura 1 compara curvas IV teóricas frente a los datos medidos para diferentes niveles de irradiancia posterior. Se obtiene una desviación menor al 3% en todos los parámetros eléctricos.


Figura 1. Curvas Comparativas IV de los módulos bifaciales

Finalmente, la Tabla 3 resume los indicadores técnico-económicos calculados para el piloto solar bifacial considerando costos de inversión y operación, ingresos por venta bajo esquema de mercado regulado, y producción energética anual esperada

Tabla 3. Evaluación técnico-económica de planta piloto bifacial

Concepto	Valor	Unidades
Energía anual producida	148.2	MWh/año
Ingresos por venta de electricidad	21,450	USD/año
Costos operativos	1,870	USD/año
Inversión inicial	42,000	USD
Tasa interna retorno	16.7	%
Retorno simple inversión	6.8	año

Discusión

El análisis de los resultados obtenidos en este estudio sobre la tecnología solar bifacial evidencia avances significativos y destaca el potencial de esta tecnología emergente. Hemos observado que los módulos bifaciales pueden ofrecer ganancias de potencia superiores al 20% en comparación con sus contrapartes monofaciales. Esto es notablemente significativo en el contexto de reducir el costo nivelado de la electricidad (LCOE), un aspecto crucial para la adopción masiva de tecnologías de energía renovable.

En términos de fabricación, las mejoras continuas en la producción de obleas transparentes y células de tipo PERT (Passivated Emitter Rear Totally Diffused) de alta eficiencia son avances prometedores. Estos desarrollos contribuyen a reducir los costos de producción, haciéndolos más atractivos para el mercado solar fotovoltaico.

La comparación de nuevos hallazgos con estudios anteriores muestra una consistencia general en términos de eficiencia y rendimiento energético. Sin embargo, un desafío constante en la literatura es la dificultad de predecir adecuadamente los niveles de irradiancia trasera y las ganancias energéticas en condiciones reales de operación.

Uno de los retos principales identificados en este estudio es la incertidumbre en la medición y modelado de la irradiancia trasera y las ganancias energéticas en condiciones reales. La altura de instalación, las propiedades del suelo y los parámetros climáticos son factores que introducen complejidad en los modelos actuales de rendimiento bifacial. Además, persisten barreras importantes asociadas con la estandarización de métodos de prueba y certificación robusta.

Desde una perspectiva práctica, los resultados sugieren que la tecnología bifacial tiene el potencial de transformar el sector fotovoltaico. La combinación única de beneficios técnicos y económicos

que ofrece, en comparación con las soluciones convencionales, es particularmente atractiva. Sin embargo, para una implementación efectiva, es fundamental abordar las barreras mencionadas anteriormente, especialmente en términos de estandarización y modelado predictivo.

Para futuras investigaciones, se recomienda enfocarse en mejorar la precisión de los modelos predictivos y en explorar nuevas estrategias de diseño y configuración de los sistemas para optimizar aún más la captura de irradiancia. Además, sería valioso profundizar en estudios que aborden la escalabilidad y la viabilidad económica de la tecnología solar bifacial en diversos contextos geográficos y de mercado.

Conclusiones

La presente revisión bibliográfica analiza en detalle el estado actual, oportunidades y retos en torno al desarrollo e implementación de la tecnología de módulos fotovoltaicos bifaciales. Los resultados confirman el enorme potencial de esta solución emergente para transformar el sector solar fotovoltaico.

Los módulos bifaciales han demostrado experimentalmente capacidad de lograr ganancias de potencia superiores al 20% en comparación con paneles monofaciales equivalentes. Este incremento en producción energética se traduce en una reducción del costo nivelado de electricidad, crucial para facilitar la adopción masiva de energías renovables.

Desde el punto de vista de fabricación, se han conseguido avances importantes en áreas como producción de obleas transparentes, células de alto rendimiento PERT, y materiales de encapsulamiento de larga duración; contribuyendo a disminuir costos.

Los modelos teóricos actuales muestran habilidad razonable para predecir el comportamiento óptico-eléctrico-térmico de módulos bifaciales bajo diversas condiciones de contorno, aunque persisten dificultades para capturar adecuadamente la complejidad de escenarios reales de operación.

Igualmente, se han propuesto estrategias óptimas de configuración geométrica, orientación e integración con elementos reflectantes para potenciar al máximo la captura de irradiancia difusa reflejada sobre la cara posterior de los paneles.

Referencias

- “TRENDS 2018 IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS Survey Report of Selected IEA Countries between,” 1992, Accessed: Dec. 22, 2023. [Online]. Available: www.iea-pvps.org.
- M. K. da Silva, M. S. Gul, and H. Chaudhry, “Review on the Sources of Power Loss in Monofacial and Bifacial Photovoltaic Technologies,” *Energies* 2021, Vol. 14, Page 7935, vol. 14, no. 23, p. 7935, Nov. 2021, doi: 10.3390/EN14237935.
- I. PVPS Task, “Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experience and Results from International Research and Pilot Applications 2021 Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems PVPS”, Accessed: Dec. 22, 2023. [Online]. Available: www.iea-pvps.org
- M. Woodhouse et al., “On the Path to SunShot. The Role of Advancements in Solar Photovoltaic Efficiency, Reliability, and Costs,” May 2018, doi: 10.2172/1253983.
- W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance,” *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.SOLENER.2005.06.010.
- A. Garrod and A. Ghosh, “A review of bifacial solar photovoltaic applications,” *Frontiers in Energy* 2023, pp. 1–23, Nov. 2023, doi: 10.1007/S11708-023-0903-7.
- D. Fontani et al., “Field optimization for bifacial modules,” *Opt Mater (Amst)*, vol. 138, p. 113715, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.OPTMAT.2023.113715.
- G. Raina and S. Sinha, “A holistic review approach of design considerations, modelling, challenges and future applications for bifacial photovoltaics,” *Energy Convers Manag*, vol. 271, p. 116290, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.116290.
- W. Quitiaquez, J. Estupiñán-Campos, C. A. Isaza-Roldán, F. Toapanta-Ramos, and A. Lobato-Campoverde, “Numerical Analysis of a Water Heating System Using a Flat Plate Solar Collector,” *Ingenius*, vol. 2020, no. 24, pp. 97–106, Jun. 2020, doi: 10.17163/INGS.N24.2020.10.
- K. Ganesan, D. P. Winston, S. Sugumar, and S. Jegan, “Performance analysis of n-type PERT bifacial solar PV module under diverse albedo conditions,” *Solar Energy*, vol. 252, pp. 81–90, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.SOLENER.2023.01.020.

- P. Hacke et al., “A status review of photovoltaic power conversion equipment reliability, safety, and quality assurance protocols,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1097–1112, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.07.043.
- N. AL-Rousan, N. A. M. Isa, and M. K. M. Desa, “Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2548–2569, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.09.077.
- “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - vdma.org - VDMA.” Accessed: Dec. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic>
- “Photovoltaics Report by Fraunhofer - REGlobal - Knowledge Centre.” Accessed: Dec. 25, 2023. [Online]. Available: <https://reglobal.org/photovoltaics-report-by-fraunhofer/>
- A. Garrod and A. Ghosh, “A review of bifacial solar photovoltaic applications,” *Frontiers in Energy* 2023, pp. 1–23, Nov. 2023, doi: 10.1007/S11708-023-0903-7.
- C. Stroth et al., “Depth-resolved and temperature-dependent analysis of phase formation mechanisms in selenized Cu-Zn-Sn precursors by Raman spectroscopy,” 2018 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017, pp. 3348–3353, 2018, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366045.
- X. Sun, M. R. Khan, C. Deline, and M. A. Alam, “Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective,” *Appl Energy*, vol. 212, pp. 1601–1610, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.12.041.
- G. M. Tina, F. Bontempo Scavo, L. Merlo, and F. Bizzarri, “Comparative analysis of monofacial and bifacial photovoltaic modules for floating power plants,” *Appl Energy*, vol. 281, p. 116084, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.116084.
- J. D. ; Bastidas-Rodriguez et al., “Implicit Mathematical Model of Photovoltaic Arrays with Improved Calculation Speed Based on Inflection Points of the Current–Voltage Curves,” *Energies* 2023, Vol. 16, Page 4875, vol. 16, no. 13, p. 4875, Jun. 2023, doi: 10.3390/EN16134875.
- A. H. Arab et al., “Arab, A. Hadj et al. Maximum power output performance modeling of solar photovoltaic modules Standard-Nutzungsbedingungen: ScienceDirect Maximum power output performance modeling of solar photovoltaic modules,” pp. 22–25, doi: 10.1016/j.egy.2019.09.049.

- “IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Experimental validation of a photovoltaic panel model”, doi: 10.1088/1755-1315/161/1/012013.
- W. Gu, S. Li, X. Liu, Z. Chen, X. Zhang, and T. Ma, “Experimental investigation of the bifacial photovoltaic module under real conditions,” *Renew Energy*, vol. 173, pp. 1111–1122, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.12.024.
- W. Gu, T. Ma, S. Ahmed, Y. Zhang, and J. Peng, “A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology,” *Energy Convers Manag*, vol. 223, p. 113283, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2020.113283.
- A. A. B. Baloch, S. Hammat, B. Figgis, F. H. Alharbi, and N. Tabet, “In-field characterization of key performance parameters for bifacial photovoltaic installation in a desert climate,” *Renew Energy*, vol. 159, pp. 50–63, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.05.174.
- J. Rodriguez et al., “Towards 22% efficient screen-printed bifacial n-type silicon solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 187, pp. 91–96, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2018.07.020.
- J. Jang and K. Lee, “Practical Performance Analysis of a Bifacial PV Module and System,” *Energies* 2020, Vol. 13, Page 4389, vol. 13, no. 17, p. 4389, Aug. 2020, doi: 10.3390/EN13174389.
- S. A. Pelaez, C. Deline, S. M. Macalpine, B. Marion, J. S. Stein, and R. K. Kostuk, “Comparison of Bifacial Solar Irradiance Model Predictions with Field Validation,” *IEEE J Photovolt*, vol. 9, no. 1, pp. 82–88, Jan. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2877000.
- S. Bouchakour, D. Valencia-Caballero, A. Luna, E. Roman, E. A. K. Boudjelthia, and P. Rodríguez, “Modelling and Simulation of Bifacial PV Production Using Monofacial Electrical Models,” *Energies* 2021, Vol. 14, Page 4224, vol. 14, no. 14, p. 4224, Jul. 2021, doi: 10.3390/EN14144224.
- V. O. da Silva, J. R. Martinez-Bolanos, R. B. Heideier, A. L. V. Gimenes, M. E. M. Udaeta, and M. A. Saidel, “Theoretical and experimental research to development of water-film cooling system for commercial photovoltaic modules,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 1, pp. 206–224, Jan. 2021, doi: 10.1049/RPG2.12017.
- M. Chiodetti, J. Kang, C. Reise, and A. Lindsay, “PREDICTING YIELDS OF BIFACIAL PV POWER PLANTS-WHAT ACCURACY IS POSSIBLE?,” 2018, doi: 10.4229/35thEUPVSEC20182018-6CO.3.4.

- K. Jose, S. Sheik Mohammed, and O. Mohammed Mansoor, "Performance Study of Solar PV System with Bifacial PV Modules," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 926, pp. 659–670, 2023, doi: 10.1007/978-981-19-4971-5_48/COVER.
- N. Riedel-lyngskær et al., "Validation of Bifacial Photovoltaic Simulation Software against Monitoring Data from Large-Scale Single-Axis Trackers and Fixed Tilt Systems in Denmark," *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 8487, vol. 10, no. 23, p. 8487, Nov. 2020, doi: 10.3390/APP10238487.
- M. Ernst, X. Liu, C. A. Asselineau, D. Chen, C. Huang, and A. Lennon, "Accurate modelling of the bifacial gain potential of rooftop solar photovoltaic systems," *Energy Convers Manag*, vol. 300, p. 117947, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2023.117947.
- A. Dobrzycki, D. Kurz, and E. Maćkowiak, "Influence of Selected Working Conditions on Electricity Generation in Bifacial Photovoltaic Modules in Polish Climatic Conditions," *Energies* 2021, Vol. 14, Page 4964, vol. 14, no. 16, p. 4964, Aug. 2021, doi: 10.3390/EN14164964.
- C. D. Rodríguez-Gallegos et al., "Global Techno-Economic Performance of Bifacial and Tracking Photovoltaic Systems," *Joule*, vol. 4, pp. 1514–1541, 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.05.005.
- E. Molin, B. Stridh, A. Molin, and E. Wackelgard, "Experimental yield study of bifacial PV modules in nordic conditions," *IEEE J Photovolt*, vol. 8, no. 6, pp. 1457–1463, Nov. 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2865168.
- S. A. Pelaez, C. Deline, P. Greenberg, J. S. Stein, and R. K. Kostuk, "Model and Validation of Single-Axis Tracking with Bifacial PV," *IEEE J Photovolt*, vol. 9, no. 3, pp. 715–721, May 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2892872.
- A. Asgharzadeh et al., "A Benchmark and Validation of Bifacial PV Irradiance Models," *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 3281–3287, Jun. 2019, doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8981272.
- P. K. Sahu, J. N. Roy, and C. Chakraborty, "Performance assessment of a bifacial PV system using a new energy estimation model," *Solar Energy*, vol. 262, p. 111818, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.SOLENER.2023.111818.

- J. R. Ledesma et al., “A simulation model of the irradiation and energy yield of large bifacial photovoltaic plants,” *Solar Energy*, vol. 206, pp. 522–538, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.05.108.
- M. T. Patel, M. S. Ahmed, H. Imran, N. Z. Butt, M. R. Khan, and M. A. Alam, “Global analysis of next-generation utility-scale PV: Tracking bifacial solar farms,” *Appl Energy*, vol. 290, p. 116478, May 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.116478.
- P. Jain, G. Raina, S. Mathur, and S. Sinha, “Optical Modeling Techniques for Bifacial PV,” *Renewable Energy for Sustainable Growth Assessment*, pp. 181–215, Feb. 2022, doi: 10.1002/9781119785460.CH7.
- M. Humaid Bhayat, C. Aravind Vaithilingam, and K. Satya Prakash Oruganti, “Optimization of Bifacial Photovoltaics by Optical Systems Feasibility Study,” *J Phys Conf Ser*, vol. 2548, no. 1, p. 012015, Jul. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2548/1/012015.
- J. Eguren, F. Martínez-Moreno, P. Merodio, and E. Lorenzo, “First bifacial PV modules early 1983,” *Solar Energy*, vol. 243, pp. 327–335, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.SOLENER.2022.08.002.

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).