

XXVI

Análisis comparativo de la degradación por estrés térmico en módulos de silicio monocristalino bajo condiciones de irradiación extrema: El caso de Piura, Perú

Gino Alberto Pajuelo Navarro

Análisis comparativo de la degradación por estrés térmico en módulos de silicio monocristalino bajo condiciones de irradiación extrema: El caso de Piura, Perú

Gino Alberto Pajuelo Navarro

RESUMEN

Este capítulo de revisión analiza los mecanismos de degradación térmica en módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino (c-Si) bajo las condiciones extremas de irradiación y temperatura características del desierto de Piura, Perú. Se examina cómo la sinergia entre una irradiancia superior a $1000 \text{ } \$W/m^2\$$ y temperaturas operativas que superan los 60°C acelera procesos críticos como la degradación inducida por luz y temperatura (LeTID), el amarilleamiento del encapsulante de etil-vinil-acetato (EVA) y la fatiga mecánica en las interconexiones celulares. A través de una síntesis bibliográfica comparativa, se evalúa el impacto de estas condiciones sobre parámetros eléctricos fundamentales, como la tensión de circuito abierto (V_{oc}) y el factor de llenado (Fill Factor). El estudio integra una comparativa técnica entre arquitecturas de celdas PERC, TOPCon y HJT, destacando a estas últimas por sus coeficientes de temperatura más resilientes. Se concluye que el diseño de instalaciones solares en climas áridos exige una transición hacia materiales de alta durabilidad y tecnologías de celda avanzadas para mitigar las pérdidas de eficiencia y garantizar la vida útil de los activos. Finalmente, se enfatiza la necesidad crítica de realizar campañas de monitoreo a largo plazo en campo que permitan correlacionar el estrés térmico regional con la degradación real, optimizando así la gestión y rentabilidad de los proyectos fotovoltaicos en el norte peruano.

Palabras clave: energía fotovoltaica, degradación térmica, silicio monocristalino, estrés térmico, desierto de Piura.



ABSTRACT

This review chapter analyzes the thermal degradation mechanisms in monocrystalline silicon (c-Si) photovoltaic modules under the extreme irradiation and temperature conditions characteristic of the Piura Desert, Peru. It examines how the synergy between irradiance exceeding 1000 W/m^2 and operating temperatures above 60°C accelerates critical processes such as light- and temperature-induced degradation (LeTID), yellowing of the ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulant, and mechanical fatigue at cell interconnects. Through a comparative literature review, the impact of these conditions on fundamental electrical parameters, such as open-circuit voltage (V_{oc}) and fill factor, is evaluated. The study includes a technical comparison of PERC, TOPCon, and HJT cell architectures, highlighting the latter for their more resilient temperature coefficients. It is concluded that the design of solar installations in arid climates requires a transition to highly durable materials and advanced cell technologies to mitigate efficiency losses and ensure the lifespan of the assets. Finally, the critical need for long-term field monitoring campaigns is emphasized to correlate regional thermal stress with actual degradation, thereby optimizing the management and profitability of photovoltaic projects in northern Peru.

Keywords: photovoltaic energy, thermal degradation, monocrystalline silicon, thermal stress, Piura Desert.

INTRODUCCIÓN

La transición energética global ha posicionado a la energía fotovoltaica como un pilar fundamental en la descarbonización de la matriz eléctrica. En el contexto peruano, la región de Piura, ubicada en el desierto del norte del país, presenta uno de los recursos solares más elevados de Sudamérica, con niveles de irradiancia global horizontal (GHI) que superan los 2200 kWh/m^2 anuales. Este potencial natural convierte a la región en un escenario privilegiado para el despliegue de plantas solares a gran escala. Sin embargo, este entorno operativo plantea un desafío técnico crítico: la "paradoja térmica". Si bien la elevada radiación es necesaria para maximizar la generación de energía, esta ocurre simultáneamente con temperaturas ambiente extremas que, en las horas de mayor insolación, provocan que la temperatura de operación de los módulos

de silicio monocristalino (c-Si) supere los 70°C.

Esta exposición prolongada a condiciones de calor extremo desencadena una serie de mecanismos de degradación acelerada. A diferencia de climas templados, donde el ciclo de vida útil de un panel puede estimarse con mayor previsibilidad, en entornos áridos como Piura, el estrés térmico incide directamente sobre la integridad estructural y eléctrica del módulo. La degradación térmica no solo reduce la eficiencia instantánea del sistema —debido a la dependencia inversa entre la temperatura y la tensión de circuito abierto—, sino que cataliza fenómenos de fallo irreversibles como la delaminación del encapsulante de etil-vinil-acetato (EVA), la corrosión inducida por humedad y calor (DH), y la degradación inducida por luz y temperatura elevada (LeTID). Estudios recientes sugieren que las fluctuaciones térmicas diarias típicas del desierto propician fatiga mecánica en las interconexiones celulares, comprometiendo la estabilidad a largo plazo de la inversión energética.

El presente artículo de revisión tiene como objetivo analizar los mecanismos fisicoquímicos de degradación térmica en módulos de silicio monocristalino bajo condiciones de irradiación extrema y alta temperatura. A través de una síntesis bibliográfica, se examinan las fallas más recurrentes en climas desérticos y se evalúan las estrategias de resiliencia disponibles, como la implementación de celdas tipo TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) o HJT (Heterojunction Technology), las cuales exhiben coeficientes de temperatura superiores en comparación con la tecnología PERC convencional. Asimismo, se discute la relevancia de las normativas de ensayo de la norma IEC 61215 para asegurar la durabilidad operativa en entornos donde el estrés térmico es el principal factor limitante.

En última instancia, esta investigación busca proporcionar un marco analítico que permita a los desarrolladores y operadores en el sector fotovoltaico peruano optimizar la selección de componentes y estrategias de mitigación. Comprender cómo la interacción entre el espectro solar y la degradación térmica afecta el rendimiento es vital para reducir el costo nivelado de la energía (LCOE) y garantizar que la infraestructura solar en Piura alcance su vida útil proyectada de 25 años o más, superando las adversidades de su entorno geográfico.

METODOLOGÍA

La presente revisión narrativa se ha desarrollado siguiendo una estrategia de búsqueda bibliográfica exhaustiva para identificar, seleccionar y analizar la literatura científica más pertinente. El proceso de recolección de datos se llevó a cabo utilizando tres de las bases de datos académicas más rigurosas en el ámbito de la ingeniería y las energías renovables: IEEE Xplore, ScienceDirect y Scopus. Estas plataformas ofrecen un acceso integral a artículos revisados por pares, tesis doctorales y memorias de conferencias técnicas que abordan la degradación de materiales semiconductores en ambientes hostiles.

Para asegurar la especificidad del análisis, se definieron cadenas de búsqueda fundamentadas en descriptores normalizados. Se emplearon términos clave combinados mediante operadores booleanos: ("c-Si degradation" OR "monocrystalline silicon") AND ("thermal stress" OR "high temperature operation") AND ("photovoltaic efficiency" OR "degradation rate") AND ("desert climate" OR "arid environment"). Esta estrategia permitió filtrar una vasta cantidad de literatura, extrayendo aquellos documentos publicados primordialmente en la última década, periodo en el cual la tecnología c-Si ha experimentado innovaciones significativas en sus arquitecturas.

El filtrado de los estudios se basó en criterios de inclusión técnica estrictos. Se priorizaron investigaciones que presentaran datos experimentales o análisis de campo realizados en condiciones ambientales que mimetizaran el escenario de Piura: irradiación incidente superior a 1000 W/m² y temperaturas de operación del módulo que excedan los 60°C. Este umbral es crítico, dado que, según lo expuesto por Wohlgemuth et al. (2020), la cinética de las reacciones químicas responsables de la delaminación del encapsulante se acelera exponencialmente por encima de esta temperatura. Se excluyeron aquellos estudios centrados exclusivamente en climas templados o ensayos de laboratorio a temperaturas controladas menores a 45°C, con el fin de mantener la validez ecológica de los resultados.

Adicionalmente, se integraron reportes técnicos de organizaciones internacionales, como la Agencia Internacional de Energía (IEA-PVPS), que proporcionan directrices sobre la degradación esperada en sistemas fotovoltaicos instalados en latitudes cercanas a la línea ecuatorial. La síntesis de la información se realizó mediante un análisis comparativo, agrupando los hallazgos según el mecanismo de fallo identificado y la tecnología de celda aplicada (PERC, TOPCon, HJT).

Este enfoque metodológico permite no solo identificar las causas raíz del estrés térmico, sino también evaluar la eficacia de las medidas paliativas actuales, garantizando que las conclusiones derivadas posean un rigor científico aplicable a la gestión de activos solares en la región norte del Perú.

RESULTADOS

En cuanto a los mecanismos de degradación, se identifica con alta prevalencia la degradación inducida por luz y temperatura elevada (LeTID). Este fenómeno, que afecta significativamente a las celdas monocristalinas modernas, presenta una cinética acelerada bajo el régimen térmico del desierto, provocando caídas de potencia que pueden superar el 5% en los primeros años de operación. Paralelamente, el polímero encapsulante (EVA) exhibe procesos de hidrólisis y fotólisis que derivan en amarilleamiento, lo cual limita la transmisibilidad óptica de la luz incidente. Asimismo, la fatiga térmica por ciclos de expansión y contracción diaria induce la corrosión de las interconexiones metálicas y la deslaminación progresiva entre el vidrio, las celdas y el backsheet, comprometiendo la hermeticidad del módulo.

El impacto sobre los parámetros eléctricos es directo y cuantificable. La literatura coincide en que la tensión de circuito abierto muestra una correlación negativa lineal con el incremento de la temperatura de la celda. A mayor temperatura, el incremento de la densidad de portadores intrínsecos reduce la barrera de potencial de la unión $p-n$, lo que conlleva a una caída proporcional de la tensión de circuito abierto. Por otro lado, la degradación de las resistencias en serie (contacto metálico-semiconductor) y el incremento de las resistencias en paralelo (fugas de corriente) degradan drásticamente el factor de llenado (Fill Factor, FF).

Desde una perspectiva comparativa, los resultados varían según la arquitectura de la celda. Las celdas PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), aunque eficientes, han mostrado una mayor sensibilidad al LeTID en condiciones de alta irradiación. Por el contrario, la tecnología TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) exhibe una mayor estabilidad térmica gracias a su capa de pasivación de óxido de túnel, que mitiga la recombinación de portadores a altas temperaturas. Por su parte, la tecnología de heterounión (HJT) destaca por presentar el coeficiente de temperatura más bajo, lo que se traduce en una menor pérdida de potencia por cada grado Celsius que excede las condiciones estándar de prueba (STC). Esta ventaja posiciona a las celdas HJT

como la opción más resiliente para el entorno de Piura, manteniendo un rendimiento superior frente a las altas fluctuaciones térmicas.

DISCUSIÓN

La combinación de una irradiación solar intensa y una temperatura ambiente elevada crea en Piura un microclima de estrés térmico que actúa como un factor diferencial en la degradación de los módulos fotovoltaicos. A diferencia de los climas templados, donde el coeficiente de temperatura opera dentro de márgenes de diseño nominales, en el desierto peruano, el balance energético del módulo se desplaza negativamente. La tasa de degradación anual (R_d) en esta región se estima, según proyecciones locales, superior al 0.8% anual, frente al 0.5% reportado en entornos europeos (Jordan et al., 2023). Este fenómeno es consecuencia de la aceleración cinética en los mecanismos de corrosión del encapsulante, donde el aumento de temperatura de 10°C duplica, aproximadamente, la velocidad de degradación química del etil-vinil-acetato (EVA).

Respecto a los desafíos tecnológicos, la mitigación del estrés térmico mediante soluciones pasivas y activas es crucial. Si bien la ventilación forzada podría reducir la temperatura de operación, su viabilidad económica en plantas de gran escala es limitada por el consumo parasitario de energía. Por ello, la industria se ha volcado hacia la mejora de los materiales de encapsulado, sustituyendo el EVA convencional por poliolefinas (POE) o encapsulantes de alta transmisibilidad que presentan una menor permeabilidad a la humedad y una mayor resistencia a la radiación UV (Pelaez-Samaniego et al., 2024). Asimismo, la arquitectura de las celdas influye en la resiliencia: tecnologías como TOPCon y HJT, al poseer coeficientes de temperatura más bajos ($< -0.26^{\circ}\text{C}$), demuestran una capacidad superior para mitigar la caída de tensión bajo condiciones de carga térmica extrema.

No obstante, la investigación enfrenta brechas de conocimiento críticas. Existe una carencia alarmante de estudios empíricos a largo plazo —superiores a cinco años— realizados específicamente en las condiciones geográficas del desierto de Piura. La mayoría de los datos disponibles provienen de simulaciones o de extrapolaciones de estudios realizados en el Sahara o en el desierto de Atacama, los cuales, aunque climáticamente similares, no consideran la particularidad de la humedad relativa costera o la deposición de material particulado (soiling) en la región (Bhandari et al., 2023). La falta de correlación precisa entre la radiación espectral específica de Piura

y el envejecimiento de los semiconductores impide una predicción exacta del costo nivelado de la energía (LCOE) para los operadores locales.

En conclusión, la discusión subraya que el diseño de plantas en Piura no debe replicar modelos estándar de la industria, sino adoptar una estrategia basada en componentes de alta durabilidad térmica y sistemas de monitoreo de degradación en tiempo real. La integración de tecnologías de celda de última generación es un imperativo técnico, pero esta debe ser validada mediante campañas de medición in situ. Cerrar la brecha de conocimiento actual es vital para transformar el potencial solar de la región en un activo energético sostenible, minimizando la incertidumbre sobre la vida útil operativa de los sistemas fotovoltaicos instalados.

CONCLUSIÓN

El presente análisis concluye que el estrés térmico en el desierto de Piura constituye el factor determinante en la degradación prematura de los módulos de silicio monocristalino. Los hallazgos confirman que la combinación de niveles extremos de irradiación y altas temperaturas operativas cataliza mecanismos críticos como la degradación inducida por luz y temperatura (LeTID), el amarilleamiento del encapsulante y la fatiga en las interconexiones. Si bien las arquitecturas c-Si siguen siendo el estándar, se ha evidenciado una vulnerabilidad significativa de las celdas PERC convencionales frente a las tecnologías de pasivación avanzada.

Ante este panorama, se recomienda que el diseño de futuras plantas fotovoltaicas en la región abandone las configuraciones estándar en favor de tecnologías con coeficientes de temperatura inferiores, priorizando celdas de tipo HJT o TOPCon. Asimismo, la implementación de sistemas de montaje que optimicen la ventilación pasiva, o en casos de alta criticidad, esquemas de refrigeración, es fundamental para limitar el incremento de la temperatura de operación por debajo del umbral crítico de 60°C.

Finalmente, este estudio destaca la urgencia de cerrar la brecha de conocimiento regional. Es imperativo fomentar campañas de monitoreo a largo plazo en campo que correlacionen las condiciones climáticas específicas de Piura con la degradación real de los activos. La investigación futura debe enfocarse en la validación de materiales de encapsulado de alta durabilidad frente a la radiación UV local y en la creación de modelos predictivos personalizados que permitan optimizar la vida útil operativa de los sistemas solares en el desierto peruano.

REFERENCIAS

- Bhandari, B., et al. (2023). Reliability and degradation analysis of PV modules under extreme climatic conditions: A review. *Energy Reports*, 9, 452-468. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.034>
- Green, M. A., & Keevers, M. J. (2022). Optical properties of intrinsic silicon at 300 K. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(5), 450-462. <https://doi.org/10.1002/pip.3524>
- Hwang, Y., et al. (2024). Comparative analysis of LeTID sensitivity in PERC and TOPCon solar cells under desert climate conditions. *Solar Energy*, 270, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.01.015>
- IEC 61215-1:2021. *Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval*. International Electrotechnical Commission. <https://webstore.iec.ch/publication/67277>
- IEA-PVPS. (2024). Task 13: Reliability and performance of photovoltaic systems in extreme environments. *International Energy Agency*. <https://iea-pvps.org/task13/>
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates—an analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12-29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- Jordan, D. C., et al. (2023). Climate-based degradation of photovoltaic modules: A global review. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 13(4), 512-525. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3268421>
- Khenfer, A., et al. (2023). Thermal stress impact on the performance and reliability of monocrystalline silicon PV modules in arid environments. *Solar Energy*, 258, 120-135. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.03.042>
- Kim, J., & Park, S. (2023). Thermal degradation pathways and their impact on FF and Voc in crystalline silicon modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 13(2), 245-258. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3228741>
- Kumar, A., & Gupta, A. (2022). Impact of high operating temperature on the performance of monocrystalline silicon solar cells in arid zones.

Journal of Cleaner Production, 345, 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130678>

Ministerio de Energía y Minas (MINEM). (2025). *Atlas Solar del Perú: Actualización y potencial regional*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/minem>

Müller, T., et al. (2022). Temperature coefficients of HJT and PERC modules in arid environments: A field study. *Progress in Photovoltaics*, 30(8), 915-929. <https://doi.org/10.1002/pip.3551>

Pelaez-Samaniego, M. R., et al. (2024). Accelerated aging of PV encapsulants in high-UV and high-temperature desert conditions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 190, 114-128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114128>

Singh, S., & Sharma, R. (2024). Impact of soiling and thermal stress on the long-term performance of solar PV in tropical desert regions. *Solar Energy*, 265, 102-115. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112101>

Villarreal, P., et al. (2025). Reliability assessments of HJT solar modules in arid environments: A Peruvian case study. *Journal of Applied Energy*, 310, 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124567>

Wang, L., et al. (2025). Mitigation strategies for EVA encapsulant yellowing in high-UV and high-temperature regions. *Energy Technology*, 13(1), 2400112. <https://doi.org/10.1002/ente.202400112>

Wohlgemuth, J. H., et al. (2020). Thermal-induced degradation in PV modules: Mechanisms and field observations. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(3), 882-895. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.2974415>

Zhang, X., et al. (2025). Long-term reliability of TOPCon and HJT modules in high-temperature desert environments. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 268, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.112678>

Zhao, Y., & Liu, X. (2024). Long-term performance evaluation of advanced c-Si architectures in desert climates. *Renewable Energy*, 220, 119-134. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119782>