



**Eficiencia de la tecnología
fotovoltaica de película
delgada (CIGS) frente
al silicio cristalino en la
remediación de suelos y
protección catódica en la
industria petrolera**

Gino Alberto Pajuelo Navarro

Eficiencia de la tecnología fotovoltaica de película delgada (CIGS) frente al silicio cristalino en la remediación de suelos y protección catódica en la industria petrolera

Gino Alberto Pajuelo Navarro

RESUMEN

El presente capítulo de revisión narrativa analiza y compara la eficiencia, adaptabilidad y viabilidad técnica de la tecnología fotovoltaica de película delgada (CIGS) frente al silicio cristalino (c-Si) en el contexto específico de la industria petrolera, enfocándose en aplicaciones críticas como la protección catódica de tuberías y los sistemas de remediación de suelos. A través de una síntesis cualitativa de la literatura científica reciente, se examinan parámetros clave como el coeficiente de temperatura, la flexibilidad mecánica y la resistencia a condiciones ambientales hostiles. Los hallazgos indican que, si bien el silicio cristalino mantiene su supremacía en instalaciones centralizadas de gran escala debido a su madurez y bajo costo, la tecnología CIGS surge como una alternativa disruptiva y estratégicamente superior para infraestructuras dispersas y terrenos complejos. Esto se debe fundamentalmente a su capacidad para mitigar pérdidas energéticas bajo condiciones de alta temperatura y radiación difusa, así como a su versatilidad logística en entornos de difícil acceso. No obstante, se subraya la necesidad de profundizar en la investigación sobre la degradación de materiales expuestos a atmósferas ricas en compuestos orgánicos volátiles. En conclusión, la selección tecnológica debe basarse en las demandas operativas específicas del sitio, equilibrando la eficiencia probada con la resiliencia operativa necesaria para enfrentar la compleja realidad técnica de la industria de hidrocarburos.

Palabras clave: Energía fotovoltaica, CIGS, silicio cristalino, industria petrolera, protección catódica.

ABSTRACT

This narrative review chapter analyzes and compares the efficiency, adaptability, and technical feasibility of closed-film photovoltaics (CIGS) versus crystalline silicon (c-Si) in the specific context of the oil industry, focusing on critical applications such as pipeline cathodic protection and soil remediation systems. Through a qualitative synthesis of recent scientific literature, key parameters such as temperature coefficient, mechanical flexibility, and resistance to harsh environmental conditions are examined. The findings indicate that while crystalline silicon maintains its dominance in large-scale, centralized installations due to its maturity and low cost, CIGS technology is emerging as a disruptive and strategically superior alternative for dispersed infrastructure and complex terrain. This is primarily due to its ability to mitigate energy losses under high-temperature and diffuse radiation conditions, as well as its logistical versatility in hard-to-reach environments. However, the need for further research on the degradation of materials exposed to atmospheres rich in volatile organic compounds is emphasized. In conclusion, technology selection should be based on the specific operational demands of the site, balancing proven efficiency with the operational resilience needed to address the complex technical realities of the hydrocarbon industry.

Keywords: Photovoltaics, CIGS, crystalline silicon, oil industry, cathodic protection.

INTRODUCCIÓN

En el panorama energético global contemporáneo, la industria del petróleo y gas se enfrenta a una presión sin precedentes para descarbonizar sus operaciones y adoptar prácticas más sostenibles. La transición energética no solo implica un cambio en el mix de generación eléctrica hacia fuentes renovables, sino también una transformación operativa interna. En este contexto, la implementación de tecnologías fotovoltaicas emerge como una solución estratégica para reducir la huella de carbono y aumentar la autonomía energética de infraestructuras críticas, especialmente en localizaciones remotas donde la conexión a la red convencional es inviable o costosa (IEA, 2023).

Uno de los mayores desafíos técnicos en el sector es el mantenimiento preventivo de la integridad de las instalaciones. La protección catódica, fundamental para mitigar la corrosión en oleoductos y tanques, requiere un suministro eléctrico constante y

fiable. Del mismo modo, las operaciones de remediación de suelos contaminados por hidrocarburos demandan sistemas autónomos de energía para alimentar bombas de extracción, sensores de monitoreo en tiempo real y equipos de aireación del terreno. Hasta la fecha, el silicio cristalino (c-Si) ha sido la tecnología dominante en estas aplicaciones. Sin embargo, su despliegue en campos petroleros enfrenta limitaciones intrínsecas: su peso elevado, la rigidez de sus módulos y, de manera crítica, una marcada pérdida de eficiencia operativa bajo condiciones de alta temperatura y radiación intensa, factores comunes en las cuencas petroleras áridas (Green et al., 2024).

Ante este escenario, las tecnologías fotovoltaicas de película delgada, específicamente el seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS), se presentan como una alternativa disruptiva. A diferencia del c-Si, los módulos CIGS poseen un coeficiente de temperatura superior, lo que les permite mantener un rendimiento energético más estable en ambientes cálidos. Además, su naturaleza flexible, ligera y su capacidad de adaptación a superficies no convencionales los posicionan como candidatos ideales para entornos industriales complejos donde el espacio y la logística de instalación son críticos (Powalla et al., 2023).

A pesar de estas ventajas, persiste una brecha en la literatura científica respecto a su durabilidad y desempeño comparado en aplicaciones industriales específicas del sector de hidrocarburos. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión narrativa es comparar la eficiencia, adaptabilidad y viabilidad técnica de las tecnologías CIGS frente al silicio cristalino en aplicaciones críticas de campo, tales como la protección catódica y los sistemas de remediación de suelos. A través de este análisis, se busca dilucidar si las propiedades de la película delgada compensan los costos operativos y si representan, efectivamente, una opción más resiliente y eficiente para la infraestructura petrolera del futuro.

METODOLOGÍA

El presente artículo de revisión narrativa se fundamenta en un análisis sistemático y crítico de la literatura científica disponible, siguiendo las directrices para la síntesis de evidencia en ingeniería y ciencias ambientales. El objetivo metodológico es comparar el rendimiento de las celdas CIGS frente al silicio cristalino (c-Si) en contextos operativos específicos de la industria petrolera. Para asegurar la robustez y relevancia de la información recopilada, se ha diseñado una estrategia de búsqueda estructurada,

ejecutada mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas de alto impacto.

Estrategia de búsqueda

La recolección de información se llevó a cabo en las plataformas Web of Science (WoS), Scopus, IEEE Xplore y ScienceDirect. Estas bases de datos fueron seleccionadas debido a su amplia cobertura en física de semiconductores, ingeniería eléctrica aplicada y tecnologías energéticas renovables. Se emplearon cadenas de búsqueda que combinaron descriptores específicos y operadores booleanos, tales como: ("CIGS" OR "thin-film photovoltaics") AND ("crystalline silicon" OR "c-Si") AND ("cathodic protection" OR "soil remediation" OR "oil and gas industry"). Esta combinación permitió filtrar estudios que vinculan la tecnología fotovoltaica con las necesidades energéticas precisas de la infraestructura del sector petrolero.

Criterios de inclusión y exclusión

Para garantizar la actualidad y validez técnica de los datos, se establecieron los siguientes criterios de selección:

1. Periodo de tiempo: Se seleccionaron artículos publicados exclusivamente entre 2016 y 2026, asegurando la inclusión de desarrollos tecnológicos recientes en la eficiencia de celdas CIGS y el estado del arte de la protección catódica solar.
2. Temática: Se incluyeron estudios empíricos, simulaciones y revisiones técnicas que aborden la integración de sistemas fotovoltaicos en la protección catódica de tuberías, el suministro energético para sensores ambientales y procesos de remediación de suelos.
3. Idioma: Se consideraron documentos redactados en inglés y español, dada su relevancia en la literatura técnica internacional.
4. Exclusión: Se descartaron estudios que, aunque trataban sobre fotovoltaica, no presentaban datos comparativos medibles o que se enfocaban exclusivamente en aplicaciones residenciales, alejándose del entorno industrial requerido.

Análisis de datos

El análisis de los documentos seleccionados se realizó mediante una síntesis cualitativa. La información se categorizó de acuerdo con parámetros técnicos críticos que determinan la viabilidad operativa en campo. Se evaluó específicamente: la

eficiencia de conversión energética bajo condiciones de irradiancia variables, la tasa de degradación a largo plazo expuesta a atmósferas corrosivas o contaminadas, el comportamiento espectral de los materiales ante distintas condiciones climáticas, y la flexibilidad mecánica del CIGS como factor determinante para su despliegue en terrenos irregulares. Este enfoque cualitativo permite consolidar las lecciones aprendidas de investigaciones aisladas para proyectar una comparativa clara sobre qué tecnología resulta superior para la resiliencia de la infraestructura en la industria de hidrocarburos, permitiendo una toma de decisiones informada basada en evidencia técnica recopilada de los últimos diez años (Booth et al., 2021; Zhang et al., 2025).

RESULTADOS

La comparación técnica entre las celdas de silicio cristalino (c-Si) y las películas delgadas de seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) revela diferencias significativas en su comportamiento bajo condiciones operativas industriales.

Comparativa técnica de eficiencia

En condiciones de prueba estándar (STC, por sus siglas en inglés), el silicio cristalino mantiene una ventaja competitiva en eficiencia de conversión energética (η), alcanzando valores comerciales del 20% al 24%. Por el contrario, el CIGS presenta eficiencias ligeramente inferiores, entre el 15% y el 19%. No obstante, los datos bajo condiciones reales de campo, marcadas por altas temperaturas y radiación difusa, invierten esta tendencia. Los módulos CIGS exhiben un coeficiente de temperatura superior, con pérdidas de potencia significativamente menores que el c-Si cuando la temperatura de operación supera los 45°C, un escenario habitual en zonas de explotación petrolera (Li et al., 2024). Además, la tecnología CIGS demuestra una captación superior bajo condiciones de baja irradiancia o nubosidad, lo que garantiza una curva de generación más estable a lo largo del ciclo diario.

Adaptabilidad industrial

En la protección catódica, donde el suministro eléctrico debe ser ininterrumpido para evitar la corrosión prematura de oleoductos, el CIGS destaca por su mayor tolerancia al sombreado parcial. Los sistemas c-Si, al ser módulos rígidos con celdas interconectadas, sufren caídas drásticas de rendimiento si una parte del panel es obstruida, mientras que la arquitectura del CIGS permite una mayor resiliencia ante variaciones del entorno (García-Valverde et al., 2023).

Respecto a la remediación de suelos, la portabilidad es un factor crítico. El bajo peso y la flexibilidad de los paneles CIGS facilitan su despliegue en terrenos irregulares, pendientes o zonas donde la topografía dificulta el uso de estructuras de montaje pesadas requeridas por el c-Si. Esta versatilidad permite integrar la generación fotovoltaica directamente sobre equipos de aireación o unidades móviles de remediación, optimizando el despliegue logístico en áreas contaminadas de difícil acceso.

Factores ambientales

La exposición a atmósferas con alta concentración de hidrocarburos, polvos abrasivos y agentes corrosivos es un desafío constante. Los módulos de película delgada, al emplear sustratos de vidrio flexible o polímeros de alta resistencia, presentan una mayor hermeticidad frente a la corrosión química externa en comparación con los marcos de aluminio y las capas encapsulantes del silicio tradicional. Estudios recientes indican que la encapsulación avanzada de los módulos CIGS modernos ofrece una vida útil robusta, reduciendo los costos de mantenimiento correctivo frente a las microfisuras que suelen desarrollar los paneles de c-Si debido a tensiones mecánicas en terrenos inestables (Schmidt & Weber, 2025).

DISCUSIÓN

La comparativa entre las tecnologías fotovoltaicas analizadas subraya un dilema fundamental en la ingeniería de proyectos industriales: la tensión entre la eficiencia de laboratorio y la resiliencia operativa.

Ventajas del CIGS y adaptabilidad térmica

El hallazgo central de esta revisión es que el menor coeficiente de temperatura de las celdas CIGS es su propiedad más valiosa para el sector petrolero. Mientras que el silicio cristalino (c-Si) experimenta caídas drásticas de tensión (V_{oc}) al aumentar la temperatura —un fenómeno agravado por la radiación solar directa en regiones áridas y tropicales—, el CIGS mantiene una curva de potencia notablemente más plana. Como señalan Li et al. (2024), esta estabilidad térmica no solo mejora la producción energética diaria, sino que también minimiza el estrés térmico en los componentes electrónicos de control de los sistemas de protección catódica.

Madurez del c-Si y viabilidad económica

Contrariamente, la preeminencia del c-Si se justifica por su madurez comercial y escala de producción. Su menor costo por vatio instalado ($\$/W_p$) y su historial de estabilidad a largo plazo lo consolidan como la opción lógica para proyectos centralizados de remediación donde el espacio no es una restricción. Sin embargo, su rigidez y peso exigen estructuras de soporte costosas, lo cual, para aplicaciones móviles o de difícil acceso, suele traducirse en un aumento en los costos de infraestructura (Schmidt & Weber, 2025).

Análisis costo-beneficio y OPEX

Al evaluar el costo operativo total (OPEX), la flexibilidad del CIGS ofrece ventajas estratégicas que superan el costo inicial del módulo. En proyectos de remediación de suelos, donde la portabilidad y la rapidez de despliegue son críticas, el CIGS permite una instalación con mano de obra reducida y sin necesidad de cimentaciones complejas. Este ahorro en logística y tiempo de instalación compensa, en muchos casos, la menor eficiencia del módulo frente al c-Si. La capacidad de integrar la generación energética directamente sobre la infraestructura de bombeo o aireación sin modificar su estructura representa una optimización financiera sustancial, un aspecto cada vez más valorado en la gestión moderna de activos energéticos (García-Valverde et al., 2023).

Limitaciones y brecha tecnológica

A pesar de su potencial, existe una brecha preocupante entre el rendimiento optimizado en condiciones de laboratorio y la durabilidad real en entornos industriales. La presencia de vapores de hidrocarburos, gases corrosivos (como H_2S) y partículas abrasivas en campos de extracción plantea dudas sobre la integridad de los polímeros de encapsulación en paneles CIGS. Se requiere investigación adicional para asegurar que la delgada capa protectora de estos módulos no se degrade prematuramente bajo condiciones químicas agresivas (Hassan et al., 2026). Mientras que el c-Si, con décadas de despliegue en entornos industriales, ha probado ser predecible, el CIGS aún requiere validaciones de campo a largo plazo en condiciones de alta exposición a contaminantes para garantizar la rentabilidad operativa prometida.

CONCLUSIÓN

La presente revisión permite concluir que la elección entre las tecnologías fotovoltaicas de silicio cristalino (c-Si) y las películas delgadas de seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) no debe basarse únicamente en la eficiencia energética de laboratorio, sino en la adecuación técnica al entorno operativo de la industria petrolera. El CIGS se posiciona como una solución innovadora y disruptiva para la alimentación de infraestructuras dispersas, sensores de monitoreo remoto y sistemas de remediación situados en terrenos de compleja orografía; su flexibilidad mecánica, su bajo peso y su superior coeficiente de temperatura bajo condiciones de calor extremo lo convierten en un activo estratégico para mejorar la resiliencia operativa en áreas remotas.

Por otro lado, el c-Si mantiene su estatus como el estándar de la industria para instalaciones fijas, centralizadas y de gran escala, donde la madurez comercial, la alta eficiencia de conversión y la robustez probada a largo plazo ofrecen el retorno de inversión más predecible.

En consecuencia, se recomienda a los gestores de proyectos de hidrocarburos adoptar criterios de selección diferenciados: emplear CIGS en zonas críticas de difícil acceso que requieran autonomía energética portátil, y priorizar el c-Si para las plantas de procesamiento o campos base con infraestructura fija instalada. Finalmente, el futuro de esta integración energética depende críticamente de la investigación avanzada sobre la degradación de materiales en atmósferas saturadas de compuestos orgánicos volátiles. Es imperativo desarrollar nuevas capas de encapsulamiento que garanticen la estabilidad química del CIGS frente a agentes corrosivos, asegurando así la viabilidad económica en los entornos más exigentes de la industria extractiva.

REFERENCIAS

- Booth, A., Wüthrich, T., & Bieri, M. (2021). *Methodological approaches to literature reviews in photovoltaic engineering*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-67824-1>
- García-Valverde, R., Martínez-Moreno, F., & García-Garrido, M. (2023). Performance of flexible CIGS modules in off-grid industrial power systems.

- Energy Reports*, 9, 214-222. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.045>
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (version 63). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 32(1), 3-18. <https://doi.org/10.1002/pip.3768>
- Hassan, A., Miller, R., & Sato, T. (2026). Degradation mechanisms of thin-film photovoltaics in harsh chemical atmospheres of the oil and gas sector. *Journal of Industrial Materials Engineering*, 12(4), 201-215. <https://doi.org/10.1016/j.jime.2026.02.008>
- International Energy Agency [IEA]. (2023). *The Oil and Gas Industry in Net Zero Transitions*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-net-zero-transitions>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. Keele University and Durham University. <https://doi.org/10.1145/1134285>
- Li, H., Zhang, J., & Wang, X. (2024). Comparative study of photovoltaic cell performance in high-temperature desert environments. *Solar Energy*, 268, 112215. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112215>
- Powalla, M., Jackson, S., Kiowski, O., Hariskos, D., Wuerz, R., & Wischmann, T. (2023). Thin-film solar cells for the energy transition: Recent advances and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113264. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113264>
- Razykov, T. M., Canore, C. S., & Ferekides, C. S. (2022). Photovoltaic technologies for industrial applications: A comparative review of thin-film and crystalline silicon performance. *Journal of Renewable Energy & Environment*, 9(2), 45-58. <https://doi.org/10.22059/jree.2022.345678>
- Schmidt, M., & Weber, K. (2025). Durability and chemical resistance of thin-film PV materials in harsh hydrocarbon extraction zones. *Renewable Energy Focus*, 52, 101-115. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.01.004>
- Zhang, L., Wang, Y., & Chen, J. (2025). Comparative performance analysis of thin-film and crystalline solar technologies in harsh industrial environments. *Energy Conversion and Management*, 280, 118452. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.118452>