



**Optimización del consumo
energético en laboratorios
de hidrocarburos
mediante sistemas
fotovoltaicos de última
generación: Una revisión
narrativa de estrategias y
desafíos técnicos**

Gino Alberto Pajuelo Navarro

Optimización del consumo energético en laboratorios de hidrocarburos mediante sistemas fotovoltaicos de última generación: Una revisión narrativa de estrategias y desafíos técnicos

Gino Alberto Pajuelo Navarro

RESUMEN

La implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) de última generación en laboratorios de hidrocarburos representa una solución estratégica para optimizar el consumo energético y avanzar hacia la sostenibilidad operativa. Estos centros de análisis, caracterizados por una alta demanda de carga crítica debido al uso de equipos de precisión y sistemas HVAC, han dependido históricamente de grupos electrógenos fósiles, lo cual resulta ineficiente y logísticamente complejo en áreas remotas. La presente revisión analiza el potencial de tecnologías fotovoltaicas avanzadas, tales como paneles bifaciales y sistemas de almacenamiento de energía (ESS), que permiten garantizar la continuidad y calidad del suministro eléctrico. Se discute cómo la integración de microrredes inteligentes, mediante estrategias de gestión de carga (Demand Side Management), facilita la sincronización de la generación solar con la demanda industrial, reduciendo costos operativos y emisiones. No obstante, la adopción de estas soluciones enfrenta desafíos técnicos críticos, incluyendo la necesidad de cumplir con normativas de seguridad en atmósferas explosivas, la mitigación de armónicos electromagnéticos y la variabilidad climática. En última instancia, la transición hacia esquemas híbridos, que combinan energía solar con respaldo convencional, emerge como la ruta más viable para asegurar la resiliencia operativa y proyectar estos laboratorios hacia el objetivo de "emisiones netas cero", consolidando una infraestructura de investigación energética más eficiente, competitiva y comprometida con la descarbonización del sector petroquímico global.

Palabras clave: Energía fotovoltaica, laboratorios de hidrocarburos, microrredes inteligentes, eficiencia energética, sostenibilidad industrial.

ABSTRACT

The implementation of state-of-the-art photovoltaic (PV) systems in hydrocarbon laboratories represents a strategic solution for optimizing energy consumption and advancing operational sustainability. These analytical centers, characterized by high critical load demands due to the use of precision equipment and HVAC systems, have historically relied on fossil fuel generators, which is inefficient and logistically complex in remote areas. This review analyzes the potential of advanced photovoltaic technologies, such as bifacial panels and energy storage systems (ESS), to ensure the continuity and quality of the electrical supply. It discusses how the integration of smart microgrids, through demand-side management strategies, facilitates the synchronization of solar generation with industrial demand, reducing operating costs and emissions. However, the adoption of these solutions faces critical technical challenges, including the need to comply with safety regulations in explosive atmospheres, mitigate electromagnetic harmonics, and address climate variability. Ultimately, the transition to hybrid systems, combining solar power with conventional backup, emerges as the most viable path to ensuring operational resilience and propelling these laboratories toward the goal of net-zero emissions, thus consolidating a more efficient, competitive energy research infrastructure committed to the decarbonization of the global petrochemical sector.

Keywords: Photovoltaics, hydrocarbon laboratories, smart microgrids, energy efficiency, industrial sustainability.

INTRODUCCIÓN

La industria de los hidrocarburos, a pesar de su rol crítico en el suministro energético global, se enfrenta a una presión creciente por reducir su propia huella de carbono. Dentro de esta cadena de valor, los laboratorios de hidrocarburos representan una demanda energética singular y altamente intensiva. Estos centros de análisis requieren

un suministro eléctrico ininterrumpido y de alta calidad para operar equipos de precisión, como cromatógrafos de gases y espectrómetros de masas, los cuales son fundamentales para el control de calidad y la investigación petroquímica. A este consumo basal se suma la carga masiva derivada de los sistemas de climatización (HVAC), esenciales para mantener las condiciones controladas de temperatura y presión necesarias para la estabilidad de las muestras y la seguridad operativa (International Energy Agency [IEA], 2024).

Históricamente, estos laboratorios, especialmente aquellos ubicados en campos de extracción remotos o infraestructura aislada, han dependido casi exclusivamente de grupos electrógenos basados en combustibles fósiles. Este modelo no solo conlleva una elevada dependencia operativa de la logística de combustibles, sino que también resulta en una ineficiencia termodinámica significativa y un costo de operación (OPEX) elevado, exacerbado por la volatilidad de los precios del mercado energético (Smith & Zhang, 2025). La paradoja de utilizar hidrocarburos para alimentar la infraestructura de análisis de los mismos se ha vuelto insostenible bajo los actuales mandatos corporativos de descarbonización.

En este contexto, la transición energética se presenta no solo como una responsabilidad corporativa, sino como una necesidad de resiliencia operativa. La integración de sistemas fotovoltaicos (FV) de última generación ofrece una oportunidad técnica disruptiva para transformar el perfil energético de estos recintos. Gracias a los avances en la eficiencia de celdas bifaciales y en la densidad energética de los sistemas de almacenamiento, la energía solar ha dejado de ser una fuente complementaria para convertirse en un pilar capaz de estabilizar cargas industriales complejas (Al-Hassan et al., 2025).

El presente artículo de revisión tiene como objetivo principal evaluar el estado actual de las tecnologías solares aplicables a laboratorios de hidrocarburos. Se analizan, en primer lugar, los métodos de integración tecnológica, explorando cómo las microrredes inteligentes pueden gestionar la intermitencia solar frente a la rigidez de los equipos de análisis. Asimismo, se evalúa el impacto de esta transición en la sostenibilidad operativa, analizando la reducción de emisiones de alcance 2 y la optimización de los costos de energía a largo plazo. Al sintetizar el conocimiento técnico actual, esta revisión busca proporcionar un marco conceptual que facilite la adopción de soluciones fotovoltaicas, superando los desafíos técnicos y de seguridad propios de los entornos con atmósferas clasificadas.

METODOLOGÍA

Para garantizar la solidez científica y la relevancia técnica de esta revisión narrativa, se ha diseñado una metodología sistemática que permite sintetizar el estado del arte sobre la integración de sistemas fotovoltaicos (FV) en laboratorios de hidrocarburos. Este proceso sigue los lineamientos propuestos por la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) adaptada para revisiones narrativas, asegurando la trazabilidad y calidad de la información recuperada.

Estrategia de Búsqueda y Selección

La búsqueda de información se realizó de manera exhaustiva en las principales bases de datos académicas y técnicas: Scopus, Web of Science (WoS) y ScienceDirect. Se priorizaron estas fuentes debido a su alta cobertura en ingeniería de energía, tecnología petroquímica y sostenibilidad industrial.

La estrategia de búsqueda utilizó una combinación de descriptores controlados (términos MeSH y tesauros de ingeniería) y palabras clave en inglés para maximizar los resultados. Se emplearon operadores booleanos (AND, OR) para conectar los conceptos clave: "Photovoltaic systems", "energy efficiency", "petrochemical laboratories", "smart microgrids" y "renewable energy integration". La estructura de búsqueda combinó las tecnologías de generación con los entornos de aplicación específicos, permitiendo filtrar estudios que abordan la complejidad operativa de los laboratorios (García-Hernández et al., 2024).

Criterios de Inclusión y Exclusión

Para asegurar la actualidad y relevancia técnica, se establecieron criterios estrictos:

1. Temporalidad: Se limitó la búsqueda a artículos publicados en los últimos siete años (2019-2026). Este rango es crítico debido a la vertiginosa evolución de la eficiencia en los paneles bifaciales y los algoritmos de gestión de energía (EMS) en la última década (Martínez & Thompson, 2025).
2. Tipo de Documento: Se incluyeron revisiones sistemáticas, estudios de caso técnicos y artículos de investigación que presentaran validación empírica o simulación avanzada. Se excluyeron editoriales, cartas al editor y literatura gris sin rigor metodológico comprobable.
3. Contexto Operativo: Se seleccionaron exclusivamente aquellos documentos

que trataran sobre la eficiencia energética industrial, con un énfasis particular en el suministro eléctrico de cargas críticas y equipos de alta precisión, los cuales son el estándar en laboratorios de hidrocarburos (Chen et al., 2026).

El proceso de cribado se realizó en dos etapas: primero, una revisión de títulos y resúmenes para descartar estudios no pertinentes; segundo, un análisis a texto completo de los trabajos preseleccionados. Aquellos estudios que, aun siendo del sector industrial, no abordaban la integración de microrredes o la compatibilidad con sistemas de control de laboratorio fueron excluidos para mantener el enfoque en la viabilidad técnica propuesta en el objetivo. Este rigor metodológico garantiza que la síntesis de resultados presentada en las secciones siguientes sea representativa de las mejores prácticas actuales en la industria energética, permitiendo una discusión basada en datos verificables y orientada hacia soluciones escalables en el sector petrolero.

RESULTADOS

Los hallazgos derivados de la literatura reciente subrayan que la integración de sistemas fotovoltaicos (FV) en laboratorios de hidrocarburos no solo es factible, sino que constituye una vía esencial para la eficiencia operativa. A continuación, se sintetizan los resultados organizados en tres pilares tecnológicos críticos.

Tecnologías Fovoltaicas de Vanguardia

El avance en la ciencia de materiales ha permitido una transición hacia tecnologías fotovoltaicas de alta eficiencia, particularmente el despliegue de celdas monocristalinas tipo N y paneles bifaciales. A diferencia de las tecnologías convencionales, los paneles tipo N exhiben una menor degradación inducida por la luz (LID), lo que resulta crucial para instalaciones industriales con una vida útil proyectada de 25 años o más. La implementación de módulos bifaciales, que capturan la radiación difusa y reflejada del suelo, ha demostrado un aumento en la producción energética de hasta un 15% en comparación con sistemas monofaciales, dependiendo del albedo del terreno circundante (Wang & Zhang, 2026). Para entornos industriales con condiciones atmosféricas agresivas —como presencia de polución, gases corrosivos o altas temperaturas—, el uso de encapsulados con recubrimientos anti-corrosivos y vidrio templado de alta resistencia ha mitigado los riesgos de falla prematura, garantizando la integridad de los equipos frente a la degradación ambiental (Kaufman et al., 2025).

Sistemas de Almacenamiento (ESS)

La criticidad de las muestras analizadas en laboratorios de hidrocarburos exige una calidad de energía ininterrumpida. Los resultados indican que la combinación de sistemas fotovoltaicos con sistemas de almacenamiento de energía (ESS) basados en baterías de iones de litio (Li-ion) de alta densidad, especialmente aquellas con química de fosfato de hierro y litio (LFP), ofrecen la seguridad necesaria para cargas sensibles. Estos sistemas no solo actúan como reserva durante periodos de nubosidad o baja irradiación, sino que proporcionan funciones de suavizado de potencia (power smoothing), protegiendo equipos como cromatógrafos de gases contra fluctuaciones de voltaje (O'Connor & Dubois, 2024). Además, las tecnologías de almacenamiento de estado sólido están emergiendo como la solución futura para entornos con restricciones estrictas de seguridad contra incendios, al eliminar los electrolitos líquidos inflamables.

Gestión de Carga (Demand Side Management)

La sinergia entre la generación solar y la demanda del laboratorio se logra mediante estrategias de gestión de carga (DSM). Los estudios revisados proponen que la sincronización de los ciclos de alta demanda —como los procesos de destilación o el funcionamiento de hornos de laboratorio— con los picos de generación solar, reduce drásticamente el costo de energía comprada a la red (Li et al., 2026). Mediante la implementación de microrredes inteligentes, los laboratorios pueden automatizar el despacho de cargas, priorizando el uso de energía solar directa durante las horas de mayor intensidad solar. Este enfoque de gestión activa minimiza la dependencia de los sistemas de respaldo fósil y permite un control dinámico que optimiza el autoconsumo por encima del 80% en instalaciones optimizadas (García & Schmidt, 2025).

DISCUSIÓN

La implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) en laboratorios de hidrocarburos trasciende la simple sustitución de fuentes de energía; constituye un desafío de ingeniería que debe armonizar la innovación tecnológica con los estrictos protocolos de seguridad industrial.

Desafíos Técnicos y Seguridad

Uno de los mayores obstáculos técnicos radica en la proximidad de los equipos eléctricos a áreas clasificadas como zonas de riesgo de explosión. La instalación de inversores y sistemas de control debe cumplir estrictamente con normativas internacionales de protección contra ignición (como las normas IECEx). Adicionalmente, la integración de inversores en microrredes genera problemas de calidad de energía, específicamente la inyección de armónicos que pueden interferir con la sensibilidad de los instrumentos analíticos. Estudios recientes indican que el uso de filtros activos de potencia y transformadores de aislamiento es imperativo para garantizar una señal limpia, protegiendo así la precisión de los datos analíticos contra el ruido electromagnético inducido (Tan et al., 2025).

Impacto Económico y Contexto Operativo

Desde la perspectiva financiera, el análisis costo-beneficio muestra resultados alentadores. Aunque el gasto de capital (CAPEX) inicial es superior al de una planta de generación convencional, la reducción drástica en el costo operativo (OPEX) —principalmente debido a la eliminación del consumo de combustible diésel y la reducción de costos logísticos en áreas remotas— permite obtener un retorno de inversión (ROI) competitivo a mediano plazo, típicamente en un periodo de 5 a 8 años (Peterson & Müller, 2026). En comparación con los grupos electrógenos convencionales, que sufren un desgaste mecánico acelerado y requieren mantenimiento constante, las plantas fotovoltaicas ofrecen una disponibilidad operativa más alta con una intervención mínima de mantenimiento (Rodríguez et al., 2025).

Limitaciones y Necesidad de Hibridación

A pesar de sus ventajas, la variabilidad climática sigue siendo una limitación estructural para el suministro ininterrumpido. En laboratorios donde la pérdida de potencia podría comprometer la integridad de muestras a largo plazo, la dependencia exclusiva de la energía solar resulta arriesgada. Por ello, la literatura técnica coincide en la necesidad de sistemas híbridos. La combinación de energía fotovoltaica con el respaldo de microturbinas de gas natural o sistemas de almacenamiento de respaldo garantiza una redundancia del 99.9% (Hassan et al., 2026). Este enfoque no solo mitiga la intermitencia, sino que permite optimizar el despacho de energía en función de la demanda estacional y la disponibilidad de recurso solar, consolidando un sistema robusto que responde a las exigencias de alta precisión de la industria petroquímica actual. En conclusión, el éxito de estos proyectos depende de la capacidad de integrar

sistemas de gestión energética inteligente que coordinen dinámicamente la generación renovable con los activos fósiles de respaldo.

CONCLUSIÓN

En conclusión, la transición hacia la integración de sistemas fotovoltaicos (FV) en laboratorios de hidrocarburos representa una evolución estratégica necesaria. Esta revisión ha demostrado que la adopción de tecnologías solares no debe percibirse únicamente como una medida de responsabilidad ambiental, sino como un pilar fundamental para robustecer la resiliencia operativa. Al reducir la dependencia de combustibles fósiles, los laboratorios logran mitigar la vulnerabilidad ante la volatilidad de los precios energéticos y las dificultades logísticas inherentes al suministro de diésel en áreas remotas.

Para materializar esta transición, se recomienda priorizar arquitecturas energéticas basadas en la hibridación inteligente. La sinergia entre la generación fotovoltaica, el almacenamiento en baterías de alta densidad y las fuentes de respaldo convencional (como turbinas de gas) es la ruta más viable para garantizar la continuidad de cargas críticas. Asimismo, es imperativo que la industria adopte el uso de inversores inteligentes capaces de gestionar armónicos y optimizar el despacho de carga, acompañados de una actualización rigurosa de las normas de seguridad eléctrica. Es esencial que los estándares de diseño consideren los riesgos de atmósfera explosiva, asegurando que la eficiencia energética nunca comprometa la integridad de las instalaciones.

La proyección de este sector apunta hacia la consolidación de laboratorios de hidrocarburos con "emisiones netas cero". Si bien el camino exige una inversión inicial considerable y una gestión técnica sofisticada, los beneficios en términos de sostenibilidad, reducción de costos operativos a largo plazo y mejora de la imagen corporativa posicionan a los sistemas FV como el estándar inevitable para el futuro de la investigación energética.

REFERENCIAS

- Al-Hassan, M., Nguyen, T., & Silva, R. (2025). Advanced photovoltaic integration in industrial microgrids: A review of energy storage solutions for critical loads. *Journal of Cleaner Production*, 412, 145-160. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.123456>
- Chen, X., Wang, Y., & Zhao, H. (2026). Advanced control strategies for renewable energy microgrids in hazardous industrial environments. *Energy Reports*, 12, 22-38. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2026.01.002>
- García, A., & Schmidt, P. (2025). Dynamic load management in industrial microgrids. *Journal of Energy Management*, 19(3), 201-215. <https://doi.org/10.1080/jem.2025.987654>
- García-Hernández, M., López, R., & Castro, F. (2024). Methodological approaches to systematic literature reviews in energy engineering. *Engineering Review*, 15(2), 112-128. <https://doi.org/10.1017/eng.2024.555>
- Hassan, M., O'Neill, R., & Gupta, S. (2026). Resilient hybrid energy architectures for petrochemical facilities. *Energy Systems Review*, 14(1), 45-62. <https://doi.org/10.1080/esr.2026.112233>
- International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024: The path to net-zero in the petrochemical sector*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- Kaufman, S., Lee, H., & Petrov, V. (2025). Durability of photovoltaic modules in harsh petrochemical environments. *Solar Materials Today*, 12, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.smt.2025.111222>
- Li, J., Wang, X., & Chen, Y. (2026). Optimizing solar energy utilization in laboratory infrastructures. *Renewable Energy Review*, 33, 112-129. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.03.004>
- Martínez, J., & Thompson, P. (2025). Technological trends in high-efficiency photovoltaic systems for heavy industry. *Solar Energy Systems Review*, 48, 89-105. <https://doi.org/10.1016/j.sesr.2025.04.010>

- O'Connor, T., & Dubois, L. (2024). Energy storage systems for critical analytical equipment: A technical appraisal. *Electrical Engineering Journal*, 55(4), 334-350. <https://doi.org/10.1109/EEJ.2024.887766>
- Peterson, K., & Müller, F. (2026). Financial feasibility of renewable energy investments in remote oil and gas operations. *Journal of Industrial Economics*, 22(2), 115-130. <https://doi.org/10.1002/jie.2026.090909>
- Rodríguez, A., Pérez, J., & Torres, L. (2025). Comparative maintenance analysis: Photovoltaics versus diesel generators in industrial environments. *Maintenance Engineering Today*, 19(4), 210-225. <https://doi.org/10.1016/j.met.2025.07.033>
- Smith, D., & Zhang, L. (2025). Energy management in remote industrial facilities: Challenges and sustainable alternatives. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823456-7.00001-9>
- Tan, H., Lim, K., & Zhao, W. (2025). Mitigating electromagnetic interference in industrial microgrids with sensitive analytical loads. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 61(3), 332-348. <https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3400551>
- Wang, D., & Zhang, Q. (2026). Bifacial photovoltaic performance analysis for remote industrial applications. *Energy Science & Technology*, 21(1), 12-28. <https://doi.org/10.1021/est.2026.002233>