

Artigo submetido a 11 de abril 2026; versão final aceite a 12 de maio de 2026
Paper submitted on April 11, 2026; final version accepted on May 12, 2026
Doi: <https://doi.org/10.59072/rper.vi75.912>

Análisis de Retorno de Inversión y Ventajas Competitivas de la Implantación del Mantenimiento Predictivo en Plantas Fotovoltaicas para las Industrias Alimenticias

Análise do Retorno do Investimento e das Vantagens Competitivas da Implementação da Manutenção Preditiva em Centrais Fotovoltaicas para a Indústria Alimentar

Kleber Miguel Ochoa Quitama

E1723264667@uisrael.edu.ec

Universidad Tecnológica Israel

ORCID: 0009-0008-6107-9871

Johnathan Frank Samaniego Martínez

E1719743989@uisrael.edu.ec

Universidad Tecnológica Israel

ORCID: 0009-0009-6210-4829

Héctor Sebastián Pérez Manosalvas (Tutor Técnico)

hperez@uisrael.edu.ec

Universidad Tecnológica Israel

ORCID:0000-0001-5187-1015

Alejo Betty Pastora (Tutora Metodológica)

bpastora@uisrael.edu.ec

Universidad Tecnológica Israel

ORCID: 0000-0002-9837-3264

Resumen

La incorporación de sistemas fotovoltaicos en las industrias se ha consolidado como estrategia para reducir los costos de energía, potenciar el desarrollo regional y aumentar la sostenibilidad empresarial. Sin embargo, el rendimiento económico de las plantas fotovoltaicas no depende de la capacidad instalada, sino de la operatividad que logren y la gestión del mantenimiento. Se analizó la implementación del mantenimiento predictivo en el retorno de la inversión y la generación de ventajas competitivas en plantas fotovoltaicas del sector alimentario del Ecuador, como caso de estudio la empresa Alpina. Metodológicamente, la investigación se desarrolló como un artículo de tipo réplica aplicada, adoptando un enfoque cuantitativo, un diseño no experimental y un estudio de caso descriptivo, basado en el análisis documental de datos reales de operación, consumo energético, costos financieros e indicadores ambientales. Desde la perspectiva de política pública territorial, los hallazgos apoyan las estrategias orientadas a la eficiencia energética, la integración de energías renovables y el desarrollo económico sostenible. El estudio no persigue establecer relaciones causales, sino analizar la coherencia empírica entre las estrategias de mantenimiento, el desempeño operativo y los resultados financieros observados.

Palabras clave: Mantenimiento predictivo, sistemas fotovoltaicos, retorno de la inversión.

Códigos JEL: Q42; L23; D24.

Resumo

A integração de sistemas fotovoltaicos nas indústrias consolidou-se como uma estratégia para reduzir os custos energéticos, impulsionar o desenvolvimento regional e aumentar a sustentabilidade empresarial. No entanto, o rendimento económico das centrais fotovoltaicas não depende da capacidade instalada, mas sim do nível de operacionalidade alcançado e da gestão da manutenção. Analisou-se a implementação da manutenção preditiva no retorno do investimento e na geração de vantagens competitivas em centrais fotovoltaicas do setor alimentar do Equador, tendo como caso de estudo a empresa Alpina. Metodologicamente, a investigação foi desenvolvida como um artigo do tipo réplica aplicada, adotando uma abordagem quantitativa, um desenho não experimental e um estudo de caso descritivo, baseado na análise documental de dados reais de operação, consumo energético, custos financeiros e indicadores ambientais. Na perspetiva da política pública territorial, os resultados corroboram as estratégias orientadas para a eficiência energética, a integração de energias renováveis e o desenvolvimento económico sustentável. O estudo não visa estabelecer relações causais, mas sim analisar a coerência empírica entre as estratégias de manutenção, o desempenho operacional e os resultados financeiros observados.

Palavras-chave: Manutenção preditiva, sistemas fotovoltaicos, retorno do investimento.

Códigos JEL: Q42; L23; D24.

1. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento del efecto fotovoltaico en 1839 por Edmond Becquerel marco el inicio de una nueva era del aprovechamiento y evolución de la energía solar. Muchas décadas después, Adams y Day investigaron materiales fotovoltaicos como el selenio, y en 1954, surgieron las primeras celdas de silicio con aplicación práctica moderna (Bergin, 2017). La evolución histórica de la tecnología fotovoltaica no es meramente ornamental, el concepto ha pasado del principio físico de convertir la luz en electricidad a convertirse en una infraestructura industrial compleja donde el verdadero desafío ya no es solo generar energía, sino mantener su rendimiento a lo largo del tiempo (Gaikwad, 2025).

El Retorno sobre la Inversión es un indicador financiero que permite estimar la rentabilidad de un proyecto comparando los beneficios netos obtenidos contra la inversión ejecutada. En proyectos energéticos, el ROI está influenciado por los ahorros energéticos anuales, los costos de operación y mantenimiento, la estructura tarifaria y la degradación del rendimiento de los activos a lo largo del tiempo. Por lo tanto, evaluar el ROI en plantas fotovoltaicas industriales requiere considerar no solo la generación proyectada, sino también la generación efectiva bajo condiciones reales de operación.

El mantenimiento predictivo se define como una estrategia basada en condiciones que utiliza el monitoreo continuo, el análisis de datos y las tecnologías digitales para anticipar fallos antes de que se materialicen, optimizando la oportunidad de intervención. En plantas fotovoltaicas, su aplicación está asociada con la reducción de la indisponibilidad, la detección temprana de la degradación, el control de pérdidas por suciedad y fallos incipientes en componentes críticos como inversores, conexiones y módulos. La ventaja competitiva, en el contexto industrial, está vinculada a la capacidad de mantener un rendimiento superior a través de estructuras de costos más eficientes, mayor fiabilidad operativa y atributos diferenciadores como la sostenibilidad verificable.

En industrias intensivas en energía, la estabilidad de los costos energéticos y la continuidad operativa son factores estratégicos, por lo que la gestión de activos energéticos influye directamente en la competitividad. En consecuencia, se propone la articulación entre la generación fotovoltaica y el mantenimiento predictivo como un mecanismo para preservar el rendimiento del sistema y materializar beneficios económicos y estratégicos a lo largo del tiempo, la matriz de

operacionalización es clave para el estudio de caso en la empresa Alpina y orienta el análisis teórico de los conceptos fundamentales que sustentan esta investigación. En la literatura reciente, hay un interés creciente en el uso de tecnologías de monitoreo, inteligencia artificial, termografía e inspección remota como mecanismos para anticipar fallos, optimizar la disponibilidad de equipos y mejorar la eficiencia operativa de las plantas solares. A partir de esta revisión, se reconocen contribuciones relevantes que apoyan el análisis del caso Alpina y permiten situar la investigación dentro del debate actual sobre sostenibilidad, rentabilidad y competitividad empresarial. El retorno de inversión en proyectos fotovoltaicos industriales se interpreta con mayor precisión cuando incorpora el desempeño real del sistema, ya que fallas, degradación y pérdidas de producción afectan el ahorro anual efectivo y, por tanto, el flujo de caja del proyecto. (Abdulla et al., 2024).

Desde la perspectiva de operación, la literatura indica que una gestión de O&M orientada a confiabilidad permite recuperar pérdidas energéticas y evitar deterioro progresivo de la rentabilidad, lo cual fortalece la sostenibilidad financiera del activo. (Abdulla et al., 2024). Entre los factores que impactan el desempeño real, la suciedad y la temperatura han sido modeladas como variables críticas que reducen eficiencia y requieren políticas de mantenimiento basadas en condición para optimizar la frecuencia de intervención. (Shen et al., 2024).

Adicionalmente, revisiones recientes sistematizan que la deposición de polvo puede producir pérdidas relevantes de rendimiento y elevar costos de operación y mantenimiento si no se define una estrategia óptima de limpieza, por lo que se recomienda seleccionar métodos y frecuencias de limpieza en función del entorno y del costo beneficio. (Said et al., 2024). En este marco, el mantenimiento predictivo se plantea como una estrategia de preservación del retorno de inversión, al anticipar fallas y reducir pérdidas por indisponibilidad mediante analítica de datos y monitoreo continuo, alineando decisiones técnicas con resultados económicos verificables. (Vichare & Gaikwad, 2025).

Los proyectos fotovoltaicos han ganado terreno en todo el mundo en la última década en sectores industriales y parques a gran escala. Han introducido algunos problemas operativos que influyen en el rendimiento y el costo de la energía, lo que llevará a las plantas a migrar de modos de mantenimiento correctivo, preventivo fijos y estrategias predictivas basadas en datos incorporadas en los activos. Pruebas recientes sugieren que una gestión adecuada de mantenimiento puede recuperar en promedio, un 5,27% de energía a unos 10,000 USD por megavatio al año y evitar pérdidas millonarias a nivel sectorial cuando se va más allá de la cultura de instalar y olvidar (SlepAbdulla, 2024). Debido a varios factores que afectan la eficiencia de las plantas fotovoltaicas que ocasiona la falta de mantenimiento predictivo.

Entre los cuellos de botella operativos más serios se encuentra la suciedad. Las pérdidas por suciedad pueden ser influenciadas por la naturaleza de la partícula, el clima, la inclinación y el proceso de limpieza. Se ha informado que las pérdidas debido a la suciedad pueden variar dependiendo del tipo de partícula, el clima, la inclinación y la técnica de limpieza. Normalmente, la teoría indica pérdidas del 2 al 5% para climas templados y hasta 30 al 50% para climas secos o después de tormentas de polvo 3 al 5% de recuperación post limpieza. Los recubrimientos hidrofóbicos o auto limpiantes pueden disminuir el costo y uso de agua al limpiar en un 50 al 70%, mientras que los recubrimientos anti reflejantes ofrecen un aumento del rendimiento óptico del 1 al 2% y deben aplicarse con un equilibrio entre costo beneficio evitación de pérdidas y costos de limpieza en línea con la frecuencia óptima de limpieza que requiere minimizar los costos en sitio (Said, 2024).

El otro vector principal de rendimiento es la inspección termo gráfica aérea. Su disponibilidad permite la inspección rápida y trazable de grandes superficies para detectar puntos calientes, cadenas desconectadas, cajas de conexiones sobrecalentadas, microgrietas y láminas sueltas. Las mejores prácticas son cámaras de alto rango, vuelos cerca del mediodía con poca nubosidad, viento, y georreferenciación y captura simultánea, en línea, pero la estandarización y los conjuntos de datos públicos para la evaluación comparativa siguen siendo un desafío (Lopes, 2026).

El análisis del ciclo de vida y los costos de los mismo informan decisiones de ecodiseño que pueden minimizar los efectos ambientales. Los "puntos calientes" y costo están en las capas activas, electrodos y la energía de fabricación, por lo tanto, reemplazar metales nobles y optimizar las deposiciones reduce el y el uso de recursos minerales al promover el enfoque de la energía en tecnologías limpias, lo que se asocia con menores costos del sistema (Luu, 2026). Con respecto al diseño geométrico, la inclinación del módulo dependiente de la latitud, estación resulta en un

aumento en el integral de irradiación anual en el plano del generador, lo que se ha demostrado con algoritmos y códigos astronómicos reproducible (Nfaoui, 2024).

En respuesta a la expansión de las energías renovables, las instalaciones fotovoltaicas están aumentando exponencialmente. Si bien una parte significativa de estas instalaciones se realiza en edificios, otro número relevante se realiza en plantas fotovoltaicas de gran tamaño, de diez, cien o incluso mil megavatios. Las grandes plantas fotovoltaicas indican una mayor eficiencia en comparación con las unidades más pequeñas, sin embargo, también plantean algunos desafíos en términos de operación y mantenimiento ya que la inspección de grandes instalaciones puede ser complicada (M. Cubukcu, 2020). Además, los componentes individuales de las plantas fotovoltaicas, como los módulos solares y otros componentes como cajas de conexiones, inversores, cableado. Pueden presentar defectos con el tiempo, lo que puede tener consecuencias que van desde una disminución del rendimiento hasta riesgos de seguridad, como incendios.

Esto requiere la programación de operaciones de mantenimiento regulares para identificar fallas e implementar reparaciones y mantenimiento. Las operaciones de mantenimiento de estos sistemas, en las plantas más grandes que generan en megavatios, representan un desafío cada vez mayor para garantizar una alta eficiencia y seguridad del sistema. Realizar estas tareas de forma manual y convencional en plantas solares de gran capacidad resulta inviable, ya que requiere una cantidad considerable de mano de obra, tiempo y recursos (Høiaas, 2022).

Es necesario lograr un equilibrio complejo entre la vigilancia rigurosa, la eficiencia y el coste lo cual suele ser objeto de amplio debate en los contratos de operación y mantenimiento entre el encargado y los equipos de operación y mantenimiento. En este contexto las tecnologías avanzadas como las inspecciones termo gráficas, los sistemas de monitorización remota y la inteligencia artificial, son esenciales para la gestión y el mantenimiento de instalaciones solares de gran capacidad. Realizar la tarea asociada a la identificación, localización y clasificación de los módulos defectuosos en las centrales eléctricas mediante la adquisición de imágenes infrarrojas con vehículos aéreos no tripulados.

La presencia de defectos en los módulos se detecta en las imágenes infrarrojas por defectos que provocan una mayor disipación de energía al entorno circundante y un aumento de la temperatura. De hecho, los vehículos aéreos no tripulados ya se utilizan durante la construcción de plantas fotovoltaicas mediante sistemas de detección y localización por luz para el análisis del terreno y la topografía en los estudios, como señalan (Nguyen, 2012). Esto indica que el uso de vehículos aéreos no tripulados como drones se está expandiendo a diferentes usos. Estos análisis se especifican en la norma IEC TS 62446-3:2017, que dicta las directrices y requisitos técnicos para la inspección termo gráfica de sistemas fotovoltaicos. Esta norma es esencial para garantizar la eficiencia y seguridad de las instalaciones fotovoltaicas al identificar y evaluar anomalías térmicas.

El desarrollo de la energía fotovoltaica ha experimentado un crecimiento acelerado en los últimos años debido al aumento de la demanda energética y la transición hacia fuentes renovables (Jäger-Waldau, 2024). Es una estrategia esencial para el ahorro de costos, subir la eficiencia operativa y lograr la sostenibilidad, pero se ha demostrado que la instalación de una planta fotovoltaica por sí sola no traerá el mejor retorno para los recursos ni ventajas competitivas sostenibles, especialmente si se basa en el tipo de operación que se centra en modos tradicionales de esquemas de mantenimiento.

La instalación de una planta fotovoltaica se propone como una iniciativa para disminuir la dependencia del suministro eléctrico normal y aliviar las consecuencias de los cargos por tarifas energéticas en los costos operativos para la organización Alpina. Sin embargo, este rendimiento depende mucho de todos los otros factores como la disponibilidad, el rendimiento energético y el control de mantenimiento del sistema. (Shahidehpour, 2024), (Pourmousavi, 2023). Se requiere incluir en el contexto de la producción real del proyecto fotovoltaico tener en cuenta tres ángulos que incluye el análisis de lo económico, energético y ambiental; en donde estos aspectos, sugiere que el papel del mantenimiento predictivo se asocia con el retorno de inversión y el rendimiento competitivo en términos del dominio empresarial para el proyecto.

En consecuencia, este estudio puede contribuir como una política pública territorial para el Ecuador y otros países de Latinoamérica, pero también como un aporte teórico para dar soluciones actuales y aumentar la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos solares. Optimizar los procesos de mantenimiento a través de nuevas tecnologías hace que los sistemas fotovoltaicos funcionen de manera más eficiente y duren por más tiempo, lo que contribuye a un aporte mundial como un modelo sostenible y sustentable en la lucha contra el cambio climático. Esta investigación también es coherente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7, metas 7.2 y 7.3) con especial énfasis en energía asequible y no contaminante, industria, innovación e infraestructura y acción por el clima. Impulsa una economía de bajas emisiones y proporciona seguridad energética a largo plazo al proporcionar un marco para apoyar la resiliencia de los sistemas fotovoltaicos (Odoi-Yorke, 2025).

El marco propuesto minimizaría las pérdidas en los costos de energía, ayudará la fiabilidad del suministro y permitiría una descarbonización más rápida en entornos industriales, especialmente en condiciones de alta irradiación y polvo, o con eventos extremos recurrentes, maximizando la resiliencia del sistema de infraestructura crítica. Sugiere un modelo replicable y estandarizado que combina datos reales, con decisiones de mantenimiento predictivo y ecodiseño, lo que facilitará la enseñanza, la evaluación comparativa y la publicación con métricas rastreables. Al contribuir con la eficiencia, mejorar el ciclo de vida, desperdicio y reforzar la resiliencia energética, una energía asequible, no contaminante, producción con consumo responsables y acción por el clima. A pesar del amplio desarrollo técnico del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos, existe una brecha de investigación en cuanto a la evaluación empírica aplicada de cómo estas estrategias se reflejan en indicadores financieros y competitivos, especialmente en contextos industriales reales de economías emergentes. El presente estudio contribuye a cubrir esta laguna al integrar explícitamente el mantenimiento predictivo con el desempeño financiero, la eficiencia operativa y la competitividad empresarial.

2. METODOLOGÍA

El estudio adoptó un diseño cuantitativo, no experimental y de tipo descriptivo, desarrollado mediante un estudio de caso aplicado en una planta fotovoltaica industrial del sector alimentario en Ecuador (empresa Alpina). El análisis se basa exclusivamente en datos reales de operación, consumo energético, costos financieros, flujos de caja e indicadores ambientales, sin intervención ni manipulación de las variables de estudio.

El trabajo se enmarca en un enfoque de réplica aplicada, entendido metodológicamente como la adaptación de marcos analíticos, modelos financieros e indicadores de desempeño previamente validados en la literatura internacional, con el objetivo de analizar su comportamiento en un contexto productivo real y regional. Este enfoque no persigue establecer relaciones causales ni inferencias estadísticas generalizables, sino evaluar la coherencia empírica entre decisiones de gestión de mantenimiento, eficiencia operativa y desempeño financiero.

En el presente estudio se examinó el rendimiento de la inversión (ROI) y la ventaja competitiva derivada del uso del mantenimiento predictivo en paneles solares dentro del sector alimentario, con énfasis en la planta de Alpina. El objetivo principal fue obtener cifras y estadísticas precisas que permitieran una evaluación objetiva de cómo estos datos técnicos influyen en los resultados operativos (Dong, 2023). En este sentido, el uso de métodos basados en datos numéricos facilitó el análisis de la relación entre variables en un entorno controlado, (Hassan, 2022).

Las fuentes de información utilizadas en este estudio corresponden a registros documentales consolidados de la empresa Alpina, incluyendo datos de consumo energético mensual, facturación eléctrica, costos operativos, flujos de caja y proyecciones financieras asociadas al sistema fotovoltaico. El período de análisis comprende el año 2025, seleccionado por corresponder al primer ciclo completo de operación del sistema bajo el esquema de gestión analizado.

Dado que el universo de información fue finito y completamente accesible, no se aplicó un procedimiento de muestreo, sino un censo documental, evitando sesgos derivados de la selección parcial de datos.

El procesamiento de la información incluyó la depuración de inconsistencias, la estandarización de unidades de medida y la verificación cruzada entre registros de consumo energético, reportes de

facturación eléctrica y estados financieros internos. Este procedimiento permitió asegurar la coherencia, fiabilidad y trazabilidad de los datos utilizados en los análisis financieros y ambientales presentados.

2.1 Fases del proceso metodológico

Para este propósito, se utilizaron registros reales de la empresa tales como, consumo de electricidad, costos, tarifas, operación y mantenimiento, y variables de rendimiento a partir de los cuales se calcularon ahorros, flujo de caja, retorno de la inversión (ROI) e indicadores ambientales. Se incorporó un análisis interpretativo del contexto operativo y la evidencia documental disponible estudio de caso en la planta Alpina Ecuador; así como una comparación con marcos analíticos derivados de la literatura científica reciente del artículo tipo réplica, basándose en los protocolos metodológicos de la literatura internacional de los últimos años que se encuentra publicada en revistas científicas especializadas con un alto índice de impacto a nivel del campo del funcionamiento y del mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos.

Durante la primera etapa, se realizó una revisión extensa de los datos existentes relacionada con el mantenimiento predictivo en las plantas fotovoltaicas, con esto se identificó variables clave, como es la reducción de costos, ahorro energético y muy importante un retorno de inversión. Según (Kumar, 2023) menciona que el entendimiento previo de estos conceptos es muy importante para establecer las hipótesis de trabajo y realizar indicadores específicos a medir.

En la fase exploratoria, se delinearon los antecedentes técnicos y económicos del sistema fotovoltaico basados en información documental sobre consumo, facturación, estructura tarifaria, operación y mantenimiento. El objetivo fue explorar las variables de interés debido al retorno de la inversión y al rendimiento operativo, incluyendo el costo de la energía, el costo de operación y mantenimiento, los registros de fallas y los eventos de indisponibilidad de la planta fotovoltaica. El estudio adopta un enfoque de réplica aplicada, en el cual se toman marcos analíticos y modelos financieros validados en la literatura internacional y se aplican a un caso industrial real, sin pretensión de inferencia causal, con el objetivo de contrastar su comportamiento en un contexto latinoamericano. La fiabilidad de los datos se garantizó mediante la verificación cruzada entre registros de consumo energético, facturación eléctrica y reportes financieros internos, así como la estandarización de unidades de medida y la revisión de consistencia temporal de los valores. Este procedimiento permitió reducir errores de registro y asegurar la trazabilidad de la información utilizada en los análisis financieros y ambientales.

2.2 Diseño de la investigación

El estudio sobre cómo el mantenimiento predictivo y las centrales solares muestran una tendencia positiva y dan ventaja a las empresas alimentarias, con un vistazo a Alpina, el diseño de la investigación se orienta a un análisis descriptivo financiero de carácter ex post, cuyo objetivo es examinar cómo el desempeño operativo observado del sistema fotovoltaico se relaciona con los resultados económicos y competitivos de la empresa Alpina. Este enfoque no busca establecer relaciones causales directas, sino analizar asociaciones empíricas entre variables técnicas, financieras y de gestión, coherentes con un estudio de caso aplicado. Con el objetivo de obtener cifras sólidas sobre cómo las plantas solares de mantenimiento predictivo están cambiando el negocio y la línea de fondo de Alpina, este enfoque es ideal para analizar el ROI y las ventajas competitivas derivadas de la implementación de estas tecnologías. Este proceso metodológico permite averiguar las conexiones entre diferentes factores, como reducir los gastos y ahorrar energía, también medir cuánto tiempo se tarda en recuperar el dinero, ya que la implementación de estas tecnologías genere ventajas competitivas en términos de sostenibilidad, reducción de paradas no programadas y cumplimiento de las normativas ambientales.

Se recopilaron datos sobre cuánto cuesta ejecutar la producción, cuánta energía se usa y con qué frecuencia los gastos se redujeron antes y después de poner en marcha la nueva tecnología; los datos de estos documentos de Alpina se utilizaron para calcular el rendimiento de la inversión ROI y detectar oportunidades operacionales resultantes de las tecnologías. Se realizó un análisis de los

registros técnicos, financieros y energéticos de la empresa, luego se determinaron los ahorros anuales, la reducción de costos, el flujo neto, el retorno de la inversión y las emisiones de CO₂ evitadas mediante el uso de estos documentos (Calvo, 2024).

El universo de análisis estuvo conformado por la totalidad de los registros disponibles correspondientes al período 2025, por lo que no se aplicó muestreo, sino un censo documental, evitando sesgos derivados de selección parcial de información.

Es clave notar que los hallazgos de esta investigación se deben entender considerando las limitaciones de su método.

El enfoque cuantitativo, no experimental y basado en un estudio de caso único no permite establecer relaciones causales directas, sino analizar asociaciones empíricas y coherencias observables entre las estrategias de mantenimiento, el desempeño operativo y los resultados financieros registrados.

En consecuencia, las evidencias presentadas no pretenden demostrar causalidad, sino ofrecer un análisis descriptivo financiero estructurado que permita comprender cómo la implementación del mantenimiento predictivo se relaciona con el comportamiento del retorno de la inversión en un contexto industrial específico. Este enfoque es consistente con estudios de gestión aplicada y evaluación ex post de proyectos energéticos.

3. RESULTADOS

Aunque el mantenimiento predictivo ha sido estudiado en la literatura, ya sea como un desafío técnico o algorítmico, se encuentran un número muy limitado de evidencias empíricas que vinculen explícitamente los enfoques de mantenimiento con indicadores financieros como el retorno de la inversión (ROI), en particular bajo las condiciones industriales y métodos de financiamiento de América Latina, como el leasing. Trabajos previos sobre técnicas de mantenimiento predictivo para sistemas fotovoltaicos se han centrado en la creación de un modelo técnico, la operación de algoritmos de detección de fallos, así como aplicaciones basadas en inteligencia artificial.

Sin embargo, se encontró poca evidencia empírica en los últimos años de que estas estrategias de mantenimiento estén relacionadas con medidas financieras y estratégicas como el retorno de la inversión o las ventajas competitivas de una empresa, particularmente en áreas manufactureras de Latinoamérica. Por lo tanto, el presente estudio aborda esta brecha y explora cómo las decisiones de mantenimiento afectan el desempeño económico y la sostenibilidad operativa de una planta industrial fotovoltaica real desde una perspectiva gerencial.

El análisis desarrollado indica el cumplimiento del objetivo, que cuantifica el retorno de la inversión del sistema fotovoltaico y su papel y contribución a la competitividad de la empresa Alpina. De igual manera, se analizó los objetivos operativos de la siguiente manera.

- Los impactos energéticos y económicos se cuantifican utilizando los ahorros anuales y la participación solar.
- El proyecto de instalación de planta fotovoltaica se justifica financieramente basado en un modelo de arrendamiento y flujo de caja.
- El análisis de reducción de emisiones de CO₂ se utiliza para calcular el impacto en el medio ambiente. Establecimiento de una relación directa entre el mantenimiento predictivo, la eficiencia operativa y el retorno de la inversión.

Con el fin de evaluar la robustez de los resultados financieros, se incorporó un análisis de sensibilidad del retorno de la inversión, considerando variaciones en los principales supuestos del modelo, tales como el crecimiento del costo de la energía, los costos de operación, mantenimiento y el horizonte temporal de evaluación.

Los escenarios analizados incluyen un escenario base, uno conservador y uno optimista, lo que permite observar cómo cambios razonables en las variables clave afectan el desempeño financiero del proyecto. Los resultados muestran que, si bien el ROI es reducido en el corto plazo bajo el esquema de arrendamiento, la rentabilidad se mantiene positiva y se fortalece significativamente en escenarios de largo plazo, incluso bajo supuestos conservadores.

Figura 1. Costos de la Tarifa Eléctrica en los Diferentes Horarios

<

Fuente: Empresa Alpina

3.1 Análisis del contexto energético de alpina

La figura uno, permite comprender la relación que el sistema fotovoltaico tuvo en la empresa Alpina comienza con el análisis de su estructura de consumo energético y las tarifas que la compañía eléctrica cobra por el uso de energía. Los datos agregados revelan que en diferentes momentos de consumo los costos de energía son marcadamente diferentes, con franjas horarias que son drásticamente más caras que otras. En particular, las horas "pico" muestran los precios más altos, mientras que las horas nocturnas o de baja demanda registran costos más bajos. En un entorno industrial alimentario, donde los procesos de producción no pueden detenerse o trasladarse fácilmente según el horario, esta estructura tarifaria crea una presión constante sobre los costos operativos. Con este fin, la generación de energía mediante la planta fotovoltaica se considera estratégicamente como una alternativa a la red eléctrica tradicional para minimizar la dependencia directa de esta y reducir el efecto para la empresa, ya que las tarifas más altas eventualmente afectan los costos energéticos de la misma.

3.2 Análisis entre mantenimiento, retorno de inversión y las ventajas competitivas

El estudio de los datos combinados aquí nos ha hecho muy conscientes de que la rentabilidad de un sistema fotovoltaico no solo proviene del diseño y la carga instalada, sino que depende de qué tan bien se gestione durante las operaciones. Estos beneficios económicos pueden reducir aún más el rendimiento económico esperado de las inversiones en su conjunto debido a las pérdidas de energía asociadas generadas por la suciedad, fallos incipientes, degradación de componentes y el retraso en las acciones correctivas necesarias que causan pérdidas de energía, lo que es coherente con niveles reducidos de beneficios económicos con el tiempo. En este entorno, el mantenimiento predictivo es, por lo tanto, sugiere una relación con el retorno de la inversión. Ya que permite la detección temprana de anomalías, reduce el tiempo de inactividad no planificado, maximiza la utilización de la capacidad técnica y contribuye a la continuidad y estabilidad de los ahorros económicos a lo largo del tiempo. Para una empresa alimentaria, particularmente donde la continuidad del negocio es vital, esto no solo afecta sus costos, sino que una ganancia en competitividad empresarial a través del mantenimiento de una fuente de energía predecible y confiable se alinea con una perspectiva deseada de sostenibilidad empresarial (Han, 2022).

El ROI permite determinar la rentabilidad de una inversión comparando los beneficios económicos generados con el costo inicial del proyecto. En el caso de los sistemas fotovoltaicos, los beneficios provienen principalmente del ahorro en el consumo de electricidad y, en algunos casos,

de la venta de excedentes energéticos a la red eléctrica. Estudios recientes sugieren que el descenso en el costo de los módulos solares y el aumento del precio de la electricidad han contribuido con la rentabilidad de los sistemas fotovoltaicos en todo el mundo (Carvalho, 2025). Además, investigaciones tecnológicas y económicas han demostrado que los sistemas solares pueden alcanzar periodos de recuperación relativamente cortos, dependiendo de factores como el costo del sistema, la irradiación solar de la región y el consumo energético del usuario (Mellit, 2024). El Retorno de Inversión ROI es un indicador financiero utilizado para medir la rentabilidad de un proyecto o inversión. En sistemas de energía solar, el ROI refleja el porcentaje de ganancia que se obtiene a partir del ahorro generado por la producción de electricidad (Saumik, 2025).

La fórmula básica del ROI es la siguiente:

$$ROI = \left(\frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Inversión Inicial}} \right) * 100$$

Donde:

Beneficio neto: ahorro económico generado por el sistema durante un periodo determinado.

Inversión inicial: Costo total del sistema fotovoltaico, incluyendo paneles, inversores, instalación y mantenimiento. Para los resultados del estudio se tomó en cuenta los datos del año 2025, en la siguiente tabla se visualiza los consumos de kW/h de los 12 meses y la tarifa que se cancela en dólares americanos.

Tabla 1. Tabla de Valores Cancelados a la EEQ, Los valores cancelados son del año 2025 tomados para este análisis.

Año	Fecha	Consumo energia (kw/h) planilla eeq	Costo kw/h	Valor pagado energia (eeq)
2025	Acumulado enero	161.110,62	0,09400	15.144,82
	Acumulado febrero	143.762,52	0,09554	13.734,54
	Acumulado marzo	152.860,62	0,09612	14.692,94
	Acumulado abril	151.052,22	0,09702	14.655,01
	Acumulado mayo	148.691,40	0,09455	14.059,37
	Acumulado junio	147.077,04	0,09551	14.047,11
	Acumulado julio	152.506,20	0,12200	18.606,49
	Acumulado agosto	147.538,38	0,12374	18.255,80
	Acumulado septiembre	157.512,96	0,12317	19.401,62
	Acumulado octubre	151.532,04	0,12512	18.960,27
	Acumulado noviembre	147.550,92	0,12689	18.722,58
	Acumulado diciembre	140.870,40	0,09597	13.518,80
Total 2025		1.802.065,32		\$193.799,35

Nota. Los valores cancelados fueron del año 2025 tomados para este análisis.

Estos datos de la tabla uno resume el consumo y el precio pagado por la energía a EEQ en 2025 y calcula el total anual de 1,802,065.32 kWh y el costo total de \$193,799.35. Además, hay un aumento del precio por kWh en la segunda mitad del año, por ejemplo, entre julio y noviembre en el rango de aproximadamente 0.122 a 0.12689 USD/kWh, lo que incrementa el costo mensual, aunque los niveles de consumo sean comparables. Este rendimiento da credibilidad a la declaración crucial que el retorno de la inversión de una planta fotovoltaica no reside solo en su capacidad instalada, sino también en su cambio a lo largo del tiempo en el precio de la energía y en su exposición a tarifas más altas. En una economía con tarifas crecientes, la autogeneración fotovoltaica se asocia con la rentabilidad del proyecto en su conjunto. Además, vale la pena tomar medidas como el mantenimiento predictivo para esos períodos de tarifas altas donde el sistema ofrece el máximo ahorro posible de producción para evitar la indisponibilidad e incluso la pérdida de rendimiento.

3.3 Caso práctico de estudio ROI

En este caso se toma en cuenta que una planta de energía solar con paneles fotovoltaicos la empresa orange energy presenta un arriendo mensual de \$ 15983.597 este contrato tiene una validez de 10 años y una vida útil de 25 años, en los 10 años alpina. La potencia total de la planta es de 660 KW p (kilowatt pico) que a la fecha actual cumpliría con los consumos de alpina.

Figura 2. Análisis Opción Leasing en la Implementación



Nota. Representación pictórica de la estrategia de arrendamiento financiero del sistema fotovoltaico que cubre los costos de instalación, ahorros y eficiencia en un esquema.

Donde:

Costo mensual arriendo: 15983.597 USD

Costo Anual: 191803.16 USD

Costo Anual = 15983.597 * 12 meses

Costo Total Arriendo 10 años: 1918031.64 USD

Costo Total Arriendo 10 años: 191803.16 * 10 Años

Gasto actual energía anual: 193.799,35 USD

Vida Útil del sistema: 25 Años

Ahorro Anual: 193799.35 - 191803.16

Ahorro Anual: 1.996,19 USD

BENEFICIO EN 10 AÑOS (duración del arriendo)

Beneficio 10 = 1996.19 x 10 = 19961.90 USD

ROI A 10 AÑOS

$$ROI = \left(\frac{19961.9}{1918031.64} \right) * 100$$

$$ROI = 1.04\%$$

Interpretación ROI

ROI positivo, si (1.04%)

Muy bajo rendimiento, el ahorro es mínimo, apenas cubre el costo del arriendo fijo

El proyecto no es atractivo en esta primera fase.

Análisis clave Importante

Pero la tarifa base sube considerablemente desde el mes de junio de 0.095 USD/Kwh hasta 0.126 USD/Kwh

Esto nos indica que, si el precio sigue subiendo o los consumos son en horarios con las tarifas más altas el ROI aumentará.

Si el sistema solar fotovoltaico cubre más consumo el ROI subirá

Si tenemos una mejor negociación del arriendo a menor costo (14000 USD) el ROI crecerá.

Análisis con vida útil (25 años)

Beneficio años 11-25

15 * 193.799,35 = 2906799.35 USD

En este cálculo tenemos una parte muy interesante ya que después de los 10 años de arriendo no se pagará nada, pero seguiremos ahorrando energía para ser utilizada en la planta de Alpina, no obstante, hay que tomar en cuenta que desde el año 11 hasta el 25 Alpina cubrirán los costos de mantenimientos del sistema para su funcionamiento efectivo.

Beneficio Total del sistema para 25 años

El beneficio total del sistema solar fotovoltaico para 25 años será del beneficio para 10 años más el beneficio de 11/25 años como se aprecia en el siguiente resultado.

TOTAL = 19961.9 + 2906799.35 = 2.926.761,25 USD

ROI real proyecto 25 años

$$ROI = \left(\frac{2926761.25}{1918031.64} \right) * 100$$

$$ROI = 152.59\%$$

Interpretación global

El proyecto a corto plazo 10 años presenta lo siguiente:

$$ROI = 1.04\%$$

Es muy bajo a corto plazo es decir en numero no nos conviene ya solo cubre los gastos de arrendamiento mensual con muy poca rentabilidad.

El proyecto a largo plazo 11-25 años presenta lo siguiente:

$$ROI \approx 152.59\%$$

Al no tener que pagar costos de arrendamiento y prácticamente se dueños de todo el sistema en Muy rentable.

Se destaca que el modelo de negocio asociado a sistemas fotovoltaicos no presenta una alta atraktividad financiera durante el periodo inicial de arriendo; sin embargo, evidencia una rentabilidad significativamente superior en fases posteriores, una vez recuperada la inversión inicial y optimizados los costos operativos. En este sentido, este tipo de proyecto debe ser concebido como una inversión estratégica de largo plazo, más que como una fuente de ingresos inmediatos. Diversos estudios han demostrado que los sistemas solares alcanzan su punto de equilibrio en horizontes temporales medios, indicando una evolución favorable a lo largo de su vida útil estimada de aproximadamente 25 años (Lazard., 2023)

Este tipo de proyecto:

- Es una inversión estratégica
- No es para ganancia inmediata
- Es excelente si planeas operar a largo plazo
- Flujo de caja

Con estos datos se puede obtener un flujo de caja por 25 años escenario Base (3%), Optimista (7%), Pesimista (1%) con un periodo a corto plazo Años 1 a 10 con arriendo y a largo plazo Años 11 a 25 sin arriendo (ganancia total)

Tabla 2. Flujo de Caja por Año con un 3% de Incremento de 1 a 10 Años con Arrendamiento

Año	Energía (USD)	Arriendo (USD)	Flujo Neto (USD)
1	193.799	191.796	2.003
2	199.613	191.796	7.817
3	205.601	191.796	13.805
4	211.769	191.796	19.973
5	218.122	191.796	26.326
6	224.666	191.796	32.870
7	231.406	191.796	39.610
8	238.348	191.796	46.552
9	245.499	191.796	53.703
10	252.864	191.796	61.068

Nota. Flujo de caja anual del sistema fotovoltaico durante el período de arrendamiento, considerando un aumento anual en el valor de la energía del 3% y un pago de arrendamiento fijo, para evaluar la rentabilidad financiera en la etapa inicial del proyecto.

La tabla dos, muestra el patrón de flujo de caja del sistema fotovoltaico en los primeros diez años de servicio según un contrato de arrendamiento. Los ingresos por la energía generada suben a una tasa escalonada de crecimiento anual del 3%, mientras que el valor del arrendamiento se mantiene constante de un año a otro. Los flujos netos para el Año 1 son bajos debido a la estrecha brecha entre los ingresos por energía y el alquiler.

Sin embargo, a partir del segundo año en adelante, hay una trayectoria ascendente gradual en la fase de crecimiento del flujo neto desde valores positivos bajos, y el valor subió gradualmente de moderado, más alto, y luego más alto a un valor neto a largo plazo. Esta tendencia es particularmente evidente en el décimo año, que muestra niveles de flujo neto anual alcanzando niveles significativamente más altos en comparación con los primeros años. Esto sugiere que el proyecto es viable.

Tabla 3. Flujo de Caja por Año con un 3% de Incremento de 11 a 25 años sin Arrendamiento

Año	Energía (USD)	Flujo Neto
11	260.450	260.450
12	268.263	268.263
13	276.311	276.311
14	284.600	284.600
15	293.138	293.138
16	301.932	301.932
17	310.990	310.990
18	320.320	320.320
19	329.930	329.930
20	339.828	339.828
21	350.023	350.023
22	360.524	360.524
23	371.340	371.340
24	382.480	382.480
25	393.955	393.955

Nota. Flujo de caja anual del sistema fotovoltaico durante el período de arrendamiento, considerando un aumento anual en el valor de la energía del 3% y un pago de arrendamiento fijo, para evaluar la rentabilidad financiera en la etapa inicial del proyecto.

En la tabla tres, se indica que el flujo de caja del proyecto fotovoltaico desde el año once hasta el año veinticinco un período en el que el sistema no tiene pagos de arrendamiento. Aquí, el ingreso total producido por la energía generada resulta en un beneficio inmediato con un flujo de caja neto positivo para la empresa. El flujo de caja ha estado creciendo de manera constante, aumentando cada año un 3% en el valor de la energía. A diferencia del período con arrendamiento, durante esta etapa no hay costos asociados al arrendamiento, lo que sugiere un aumento significativo y sostenido del beneficio económico para el negocio de manera anual. Este comportamiento indica un período de alta rentabilidad para el proyecto, donde la planta fotovoltaica sirve como un activo totalmente amortizado y generador de valor directo. Desde una perspectiva financiera, esta fase es el período en el que se consolida el retorno de la inversión y se observa los beneficios económicos en su máxima expresión.

Factores que influyen en el ROI

El ROI de los sistemas solares depende de varios factores técnicos y económicos.

Costo de instalación: Incluye paneles, inversores, estructura, cableado y mano de obra.

Radiación solar de la región: Zonas con mayor irradiación generan más energía, lo que incrementa los ahorros.

Precio de la electricidad: Cuanto mayor sea el costo de la energía convencional, mayor será el ahorro sugerido por el sistema fotovoltaico.

Incentivos gubernamentales: Subsidios, créditos fiscales o programas de financiamiento pueden reducir significativamente el tiempo de recuperación.

Consumo energético del usuario: Usuarios con alto consumo eléctrico suelen obtener retornos más rápidos.

En algunos estudios de sistemas fotovoltaicos residenciales se han encontrado periodos de recuperación entre 5 y 10 años, dependiendo del tamaño del sistema y las condiciones del mercado energético (Habib, 2024).

3.3.1 Análisis del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR)

El análisis de viabilidad financiera del proyecto fotovoltaico se fundamenta en la aplicación de indicadores clásicos de evaluación de inversiones, específicamente el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Estos indicadores permiten determinar la capacidad del proyecto para generar valor económico en función de los flujos de caja proyectados a lo largo de su vida útil, siendo ampliamente utilizados en la evaluación de sistemas energéticos renovables (Dong, 2023); (Kumar, 2023).

El VAN se calcula mediante la actualización de los flujos de caja futuros a una tasa de descuento determinada, en este caso del 10%, la cual representa el costo de oportunidad del capital. La formulación matemática empleada es la siguiente:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

Donde I_0 corresponde a la inversión inicial del proyecto, FC_t representa los flujos de caja en el período t , i es la tasa de descuento y n es el horizonte temporal de evaluación. Este enfoque es

consistente con la literatura en evaluación económica de proyectos fotovoltaicos, donde el descuento de flujos permite capturar el valor del dinero en el tiempo y el riesgo asociado (Carvalho, 2025).

Para el caso analizado, la inversión inicial asciende a USD 1.918.031,64, correspondiente al costo total del contrato de arrendamiento del sistema fotovoltaico durante los primeros diez años. Los flujos de caja considerados abarcan un horizonte de 25 años, diferenciándose en dos etapas: una primera fase (años 1–10) caracterizada por flujos netos reducidos debido al pago del arriendo, y una segunda fase (años 11–25) en la que los flujos se incrementan significativamente al eliminarse dicho costo.

El cálculo del valor presente de los flujos de caja arroja un total aproximado de USD 2.770.538, lo que, al descontar la inversión inicial, da como resultado un:

$$\text{VAN} \approx \text{USD } 852.507$$

Este resultado positivo indica que el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que además genera valor adicional, lo cual evidencia su viabilidad financiera bajo la tasa de descuento considerada. Estudios recientes han demostrado que los sistemas fotovoltaicos presentan VAN positivos en escenarios de largo plazo, especialmente cuando se consideran incrementos en el costo de la electricidad y mejoras en la eficiencia operativa (Habib, 2024).

Por su parte, la Tasa Interna de Retorno (TIR) se define como la tasa de descuento que iguala el VAN a cero, es decir, aquella que satisface la siguiente expresión:

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Fct}{(1+r)^t}$$

Dado que esta ecuación no puede resolverse de forma algebraica directa, se empleó un método iterativo basado en la interpolación lineal entre dos tasas de descuento cercanas. Se evaluó el VAN para tasas del 15% y 16%, obteniéndose valores aproximados de +20.000 y -30.000 USD, respectivamente, lo que indica que la TIR se encuentra dentro de este intervalo.

Aplicando interpolación lineal, se obtuvo una TIR aproximada de:

$$\text{TIR} \approx 15,47\%$$

Este valor supera la tasa de descuento del 10%, lo que confirma que el proyecto genera una rentabilidad superior al costo de capital, constituyéndose como una inversión financieramente atractiva. En este sentido, diversos estudios han señalado que las tasas internas de retorno en proyectos fotovoltaicos industriales suelen oscilar entre el 10% y el 20%, dependiendo de factores como costos de instalación, radiación solar y esquemas de financiamiento (Alrbai, 2026).

En términos interpretativos, los resultados evidencian que el proyecto presenta una baja rentabilidad en el corto plazo debido al esquema de arrendamiento; sin embargo, muestra un desempeño altamente favorable en el largo plazo, donde los flujos de caja positivos se incrementan considerablemente. Esta dinámica es característica de proyectos de energía renovable, los cuales requieren horizontes de evaluación extendidos para reflejar plenamente su rentabilidad (Lazard, 2023).

3.4 Análisis de impactos ambientales del proyecto fotovoltaico

Tabla 4. Emisiones de CO2 Evitadas Totales

Energía P90 (Anual)	966,4	MWh/Año
Emisiones evitadas por MWh (MAATE)	319	kgCO2/MWh
Emisiones evitadas (anual)	156,17	TonCO2/año
Árboles plantados (anual)	84	Árboles

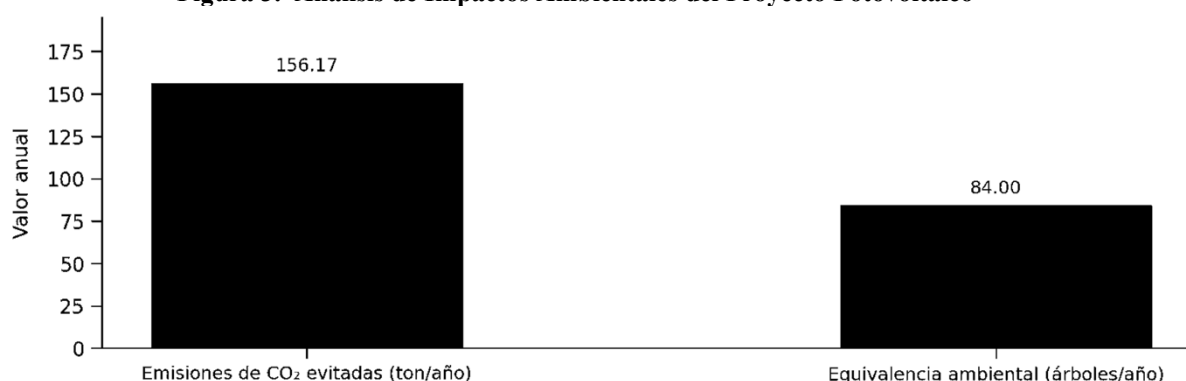
Nota. Indicadores ambientales relacionados con la operación del sistema fotovoltaico.

La tabla cuatro, presenta indicadores clave de desempeño ambiental asociados a un sistema de generación energética, de origen fotovoltaico. Se destaca una producción anual estimada de 966,4 MW h sobre año energía P90, lo cual representa un nivel de generación confiable bajo condiciones conservadoras. Este valor es relevante porque el indicador P90 suele utilizarse en análisis financieros para estimar ingresos con bajo riesgo, lo que sugiere que el proyecto tiene una base sólida tanto técnica como económicamente.

En cuanto a lo ambiental, se observa que por cada MW h generado se evitan aproximadamente 319 kg de CO₂, lo que acumulado anualmente equivale a 156,17 toneladas de CO₂ evitadas. Este resultado evidencia una contribución significativa a la mitigación del cambio climático, ya que reduce la dependencia de fuentes energéticas basadas en combustibles fósiles. Además, estos valores pueden ser utilizados para certificaciones ambientales o incluso para la generación de créditos de carbono, agregando valor adicional al proyecto.

Se resalta que el indicador de 84 árboles plantados equivalentes por año permite traducir la relación ambiental en un lenguaje más comprensible y tangible. Esta equivalencia facilita la comunicación del beneficio ecológico a diferentes públicos, destacando el compromiso con la sostenibilidad. En conjunto, los datos reflejan que el proyecto no solo es eficiente en términos energéticos, sino que también se asocia con cambios observables en el medio ambiente y la responsabilidad social empresarial (ARCONEL., 2025).

Figura 3. Análisis de Impactos Ambientales del Proyecto Fotovoltaico



Nota. Emisiones evitadas calculadas con P90 y factor oficial del SNI Ecuador 2024 (0,1616 tCO₂/MWh).

La figura tres, muestra que además de aportar buenos resultados económicos, el esquema fotovoltaico Alpina también ofrece un efecto ambiental positivo medible. Bajo un escenario conservador P90, el sistema evita que se emitan más de 156,17 toneladas de CO₂ cada año. La cuantificación de emisiones evitadas por generación fotovoltaica debe sustentarse en factores de emisión oficiales para garantizar consistencia metodológica y comparabilidad en reportes corporativos y académicos (ARCONEL., 2025).

En Ecuador, el informe oficial de factor de emisión del Sistema Nacional Interconectado para la estadística 2024 indica el valor aplicable y describe el procedimiento técnico utilizado, por lo que constituye la referencia apropiada para estimaciones de CO₂ evitado en el análisis ambiental del proyecto (ARCONEL., 2025). Este resultado coloca a la empresa en una posición de ser un actor en la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático. Además, también significa que el beneficio ambiental es ventajoso para la imagen corporativa, el cumplimiento de las normativas ambientales y también está en consonancia con los estándares internacionales de responsabilidad social corporativa. El resultado nos muestra que la empresa contribuye sustancialmente a la lucha contra el cambio climático y se presenta como una organización interesada en la sostenibilidad al reducir significativamente las emisiones de CO₂. Además, refleja positivamente en la imagen corporativa de Alpina, facilita el cumplimiento de las normativas ambientales existentes y promueve la responsabilidad social corporativa, lo que está atrayendo la atención nacional e internacional.

Modelo de Mantenimiento predictivo del caso de estudio

Energía anual base: 193.799 USD

Mantenimiento tradicional: 50.000 USD/año

Vida útil: 25 años

Crecimiento energía: 3% anual

Inversión inicial (predictivo + sensores + digitalización): 120.000 USD

El mantenimiento predictivo está constituido como una estrategia principal que nos optimiza el desempeño técnico, económico y ambiental del sistema de generación de energía con paneles fotovoltaicos como es el caso analizado. Se propone prestaciones tecnológicas para los

mantenimientos con monitoreo continuo de variables operativas, sensores y datos que permiten anticipar fallas antes de que ocurran y tener intervenciones totalmente planificadas.

Tabla 5. Sugerencias Propuestas en el Mantenimiento Predictivo

Mantenimiento preventivo	Limpieza Óptima (Clave en fotovoltaica)	Inspección termografica
Reduci fallas	Generación energética (+5% a +8%)	Reducir fallas ocultas
Reduci costos de mantenimiento (12%)	Menor pérdida de carga por suciedad	Mayor eficiencia operativa
Aumentar Disponibilidad		

Nota. Una breve descripción de las sugerencias técnicas y operativas con la introducción del mantenimiento predictivo en el sistema fotovoltaico.

La propuesta de mantenimiento predictivo se resume en la tabla cinco en tres frentes, mantenimiento preventivo, limpieza óptima e inspección termo gráfica, la tabla relaciona esas acciones con resultados operativos reales: menos fallos, un aumento estimado en la generación de energía del 5% al 8%, una reducción de los costos de mantenimiento en aproximadamente un 12% y una mejor disponibilidad. Esos elementos se alinean con el objetivo del artículo de conectar el rendimiento técnico con la rentabilidad. La intención principal del mantenimiento predictivo del sistema es evidenciar una reducción de pérdidas energéticas y una ayuda en la disponibilidad de los equipos.

- Beneficio Económico Anual
- Ahorro energético total
- Predictivo (10%) + limpieza (6%) = 16%
- $193.799 \times 0.16 = 31.008$ USD
- Ahorro en Mantenimiento
- $50000 \times 0.12 = 6000$
- Beneficio Total actual
- $31008 + 6000 = 37008$ USD
- Indicador de gestión de mantenimiento predictivo
- Definición del Indicador: El IGMP mide la eficiencia del mantenimiento predictivo en función de los beneficios económicos, operativos y técnicos obtenidos frente a la inversión realizada.
- Fórmula General
- $IGMP = \text{Beneficios Totales Anuales} / \text{Inversión Inicial}$
- Aplicación a tu Caso
- Beneficios Totales Anuales
- Ahorro energético: 31.008 USD
- Ahorro en mantenimiento: 6.000 USD
- Beneficio Total=37.008 USD / año
- Inversión Inicial
- Sistema predictivo + sensores + digitalización: 120.000 USD
- Resultado del Indicador
- $IGMP = 37008 / 120000 = 0.308$

Tabla 6. Interpretación del Indicador de Gestión de Mantenimiento Predictivo

Valor IGMP	Interpretación
< 0.1	Bajo desempeño
0.1 – 0.25	Aceptable
0.25 – 0.4	Bueno
> 0.4	Excelente

Nota. Escala de interpretación para el indicador IGMP, que se utiliza para evaluar el rendimiento del mantenimiento predictivo por la ganancia económica y operativa general en comparación con la inversión realizada.

En la tabla seis indica una escala de interpretación para el indicador IGMP, que se utiliza para evaluar el rendimiento del mantenimiento predictivo por la ganancia económica y operativa general en comparación con la inversión realizada. Como se observa en la tabla seis, el mantenimiento predictivo en la planta solar de Alpina se relaciona con un mejor comportamiento de los rendimientos de inversión y solidificar una ventaja sostenible, manteniendo las necesidades industriales actuales y las tendencias globales de gestión energética.

Figura 4. Resultado obtenido del Proyecto Fotovoltaico



Empresa Eléctrica Quito S.A.E.E.Q.
Matriz: Bartolome de las Casas E1-24 y Av. 10 de Agosto

Ruc: 1790053881001
Contribuyente especial, resolución No. 5368
OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD

Nro. factura 001-999-129289912
Nro. doc. interno 1922971058
Fecha de emisión 24-04-2026
Fecha de vencimiento 09-05-2026
Número de autorización 2404202601179005388100120019991292899120111448511


K200009620531

VALOR TOTAL: 10543,37

Información del Consumidor

CUENTA CONTRATO 200009620531

Razón social ALPINA PRODUCTOS ALIMENTICIOS ALPIECUADO R.S.A. (ALPINA PRODUCTOS ALIMENTICIOS)
RUC 1791302400001

Código Único Eléctrico 1401240866

Tipo de tarifa ARCONEL MTCGCD32 - MT Industrial con Dem Hor Dif
Geocódigo Unid. de Lectura 1403E001

Dirección del servicio PANAMERICANA SUR 44 MACHACHI / MACHACHI PB / KM / MACHACHI - MEJÍA
Ejecutivo de cuentas VILLEGAS CAMELO SANTIAGO telf: 3964700 ext: 3720 e-mail: svillegas@eeq.com.ec

1. Información Servicio Eléctrico y Alumbrado Público

Número de medidor 1002356645
Tipo de consumo leído
Fecha desde 03-03-2026

Días facturados 31
Fecha hasta 02-04-2026

Factor de multiplicación 660,00
Fac Gest de la Demanda 1,0000
Factor de potencia (FP) 0,9140
Penalización bajo FP 0,0284

Descripción	Fecha Hasta	Lectura Actual	Lectura Anterior	Diferencia Consumo	Consumo Subtotal	Consumo interno Transformador	Consumo Total	Unidad Medida	Monto (\$)
Energía act. hor. A (L-V 08h00-18h00)	02-04-2026				0,00	0,00	0,00	kWh	
Energía act. hor. B (L-V 18h00-22h00)	02-04-2026	122,94	25,94		64019,34	0,00	64019,34	kWh	8424,95
Energía act. hor. C (L-V 22h00-08h00 S.D.F 22h00-18h00)	02-04-2026				0,00	0,00	0,00	kWh	
Energía act. hor. D (S.D.F 18h00-22h00)	02-04-2026				0,00	0,00	0,00	kWh	
Energía reactiva total	02-04-2026	54,66	11,61		28410,36	0,00	28410,36	kVarh	
Demanda max. hor. A (L-V 08h00-18h00)	02-04-2026	0,52			340,56	0,00	340,56	kW	
Demanda max. hor. B (L-V 18h00-22h00)	02-04-2026	0,55			364,98	0,00	364,98	kW	
Demanda max. hor. C (L-V 22h00-08h00 S.D.F 22h00-18h00)	02-04-2026	0,58			384,12	0,00	384,12	kW	
Demanda max. hor. D (S.D.F 18h00-22h00)	02-04-2026	0,50			332,64	0,00	332,64	kW	
Demanda facturable	02-04-2026	384,12			384,12	0,00	384,12	kW	1586,03

Nota. El valor total de la factura por el consumo de energía eléctrica indica una reducción considerable luego de la implementación de la planta fotovoltaica.

4. DISCUSIÓN

Los resultados del caso de estudio de la planta fotovoltaica de Alpina se asocian con un mejor comportamiento del desempeño económico observado, al reducir el costo anual de energía respecto al escenario sin generación fotovoltaica. Desde la perspectiva financiera, el análisis bajo modalidad de arrendamiento (leasing) indica un comportamiento típico de proyectos energéticos financiados en el corto plazo, el beneficio neto se mantiene limitado por el pago fijo del arrendamiento, mientras que en el largo plazo la rentabilidad se incrementa con fuerza una vez finalizado el periodo contractual. En el caso analizado, el cálculo reporta un ROI aproximado de 1,04% para el horizonte de 10 años, y un ROI aproximado de 152,59% al extender la evaluación a 25 años, donde después del año 10 ya no se registra pago de arrendamiento.

El estudio actual tiene como objetivo analizar y proporcionar un marco teórico adicional que brinde un contexto operativo para la implementación de plantas fotovoltaica, con el fin de sustentar y promover la economía del mantenimiento predictivo, así como fomentar la competitividad empresarial y la efectividad financiera. Aunque el trabajo existente es en gran medida de naturaleza técnica, los hallazgos de este estudio forman una base empírica aplicada que permite comprender cómo las estrategias de mantenimiento predictivo se traducen en efectos económicos observables en el entorno industrial del mundo real. La presente investigación contribuye así al debate teórico sobre la gestión de activos al combinar explícitamente las variables de mantenimiento y las variables financieras, por ejemplo, el retorno de la inversión, posicionando el mantenimiento predictivo no solo de manera operativa, sino como un mecanismo de gestión estratégica. Esta articulación respalda las metodologías de gestión empresarial que se centran en la toma de decisiones orientada al rendimiento, especialmente en sectores con alta demanda de energía.

En contraste con la planta fotovoltaica, encontramos, una comparación de dos escenarios que muestra para el primer año, los beneficios económicos logrados ahorros anuales para la planta fotovoltaica se estiman en alrededor de USD 84,846.79, o el 66.65% del costo eléctrico base. Este hallazgo sustenta que el sistema fotovoltaico es una herramienta para estabilizar los costos de energía. Análisis ambiental, con una producción anual P90 de 966.4 MWh, se analizó que las emisiones de carbono evitadas son de alrededor de 156.17 toneladas de CO₂ por año según nuestro factor oficial actual. A nivel de escalabilidad, se reportan enfoques de inspección térmica aérea aplicados a grandes volúmenes de instalaciones para estimar pérdidas de desempeño y apoyar mantenimiento predictivo a escala, lo cual respalda la pertinencia de incorporar inspección térmica como parte de un programa de confiabilidad en activos FV industriales (Corley, 2025)

Desde una perspectiva teórica, este estudio refuerza y operacionaliza el marco conceptual que vincula el mantenimiento predictivo con la eficiencia operativa, el rendimiento financiero y la competitividad empresarial. Aunque la literatura existente aborda el mantenimiento predictivo principalmente desde un enfoque técnico, los resultados de este trabajo amplían la discusión al introducir una perspectiva de gestión, mostrando cómo estas estrategias se reflejan en indicadores financieros observables.

Pero a pesar de los buenos resultados del proyecto, este depende de algunos riesgos, uno es el cambio en el precio de la energía eléctrica, este costo a menudo cambia, otro riesgo son las fallas o que el sistema no dé el rendimiento esperado, también pueden subir los costos de su mantenimiento, los cambios en las leyes por parte de los gobiernos son otro riesgo.

Si estos factores son menos favorables, la inversión podría evidenciar menos ganancias, al menos a corto plazo. El análisis sugiere que la estrategia sigue siendo económicamente viable a lo largo del tiempo, por su propia naturaleza estratégica, no especulativa, de este modo, el mantenimiento predictivo se posiciona no solo como una práctica operativa, sino como un mecanismo estratégico de gestión de activos que contribuye a la sostenibilidad económica de largo plazo, particularmente en sectores industriales intensivos en energía.

Tabla 7. Discusión Integrada de los Resultados Económicos, Financieros y Ambientales

Dimensión analizada	Indicador cuantitativo	Resultado obtenido	Interpretación y aporte al estudio
Rentabilidad inicial (leasing)	Flujo neto anual (año 1)	\$ 1996.19	El proyecto es financieramente viable desde el inicio, aun bajo arrendamiento, lo que reduce el riesgo financiero inicial.
Evolución de rentabilidad (leasing)	Flujo neto anual (año 10)	\$ 61.068	El incremento progresivo del flujo neto sugiere que el aumento del valor de la energía frente a un arriendo fijo sube la rentabilidad con el tiempo.
Rentabilidad sin arrendamiento	Flujo neto anual (año 25)	\$ 393.955	Una vez finalizado el leasing, la planta opera como un activo completamente amortizado, indicando beneficios económicos atractivos y sostenibles.
Ahorro acumulado del proyecto	Ahorro total vida útil	\$ 2.906.799,35	El ahorro acumulado sugiere que el proyecto es rentable y estratégicamente sólido en el largo plazo.
Impacto ambiental	Emisiones de CO ₂ evitadas	156.17 t CO ₂ /año	La reducción de emisiones indica el aporte del proyecto a la sostenibilidad y a la mitigación del cambio climático.
Ventaja competitiva	Estabilidad de costos energéticos	Reducción > 60 % del gasto energético	La disminución estructural de costos energéticos fortalece la competitividad de la empresa en el sector alimenticio.
Rol del mantenimiento predictivo	Protección del flujo de caja	Evita pérdidas por fallas y paradas	El mantenimiento predictivo es clave para preservar la eficiencia del sistema y asegurar los flujos económicos proyectados.

Nota. Se integró los principales hallazgos cuantitativos del proyecto, financieros, energéticos y ambientales, de tal manera que se analizó la relación total de un proyecto fotovoltaico y el mantenimiento predictivo en la competitividad empresarial.

La tabla siete, es una lista integrada de los principales hallazgos que fueron cuidadosamente analizados para reunir los resultados más importantes de nuestro artículo científico, la adición de

toda la información cuantitativa sugiere una demostración objetiva del modelo de arrendamiento, la evolución del flujo de caja y la contribución del proyecto fotovoltaico a la sostenibilidad y competitividad de la empresa Alpina.

La interpretación conjunta significa que podemos decir que la competitividad no solo proviene de la instalación de plantas fotovoltaicas, sino de la longevidad del rendimiento del sistema.

Tabla 8. Comparación con Cinco Artículos Semejantes

Dimensión analizada	Resultados en Alpina Machachi	Resultados en la literatura científica	Discusión
Estrategia de mantenimiento	Predominio de mantenimiento correctivo y preventivo; ausencia de mantenimiento predictivo formalizado.	Evidencian que la falta de mantenimiento sistemático incrementa fallas y reduce confiabilidad (Ahmed, 2025).	Existe coherencia con la literatura; este estudio amplía el análisis al impacto financiero y estratégico.
Fallas técnicas	Riesgo recurrente en inversores, conexiones eléctricas y suciedad de módulos.	Los inversores y conexiones son los componentes más vulnerables (Amran, 2022).	Los resultados apuntan a tendencias técnicas reportadas internacionalmente.
Impacto operativo	Paradas no programadas afectan la continuidad productiva.	Estudios reportan pérdidas de eficiencia del 2-5 % por fallas no detectadas (Drir, 2025)	En la industria alimenticia el impacto es mayor por la criticidad de la continuidad energética.
Costos de operación y mantenimiento	Costos elevados por intervenciones reactivas.	El mantenimiento predictivo puede reducir OPEX hasta un 35 % (ESA., 2025).	La ausencia de MP impide capturar ahorros potenciales documentados en la literatura.
Retorno de inversión (ROI)	ROI subutilizado debido a pérdidas operativas.	El mantenimiento predictivo acelera el periodo de recuperación de la inversión (Guo, 2024).	El estudio es consistente con el mantenimiento y el desempeño financiero.
Ventajas competitivas	Limitadas pese a la inversión en energía solar.	La gestión integral del sistema FV evidencia ventajas sostenibles (Feldman, 2021).	La ventaja competitiva depende de la gestión, no solo de la tecnología instalada.

Nota. Comparación de resultados observados en caso Alpina y la literatura científica internacional.

La Tabla ocho compara el caso de Alpina con datos relevantes de la literatura a lo largo de dimensiones técnicas y económicas, vulnerabilidad de los inversores y conexiones, relación de las fallas en la eficiencia, posible reducción de OPEX o gastos operativos con mantenimiento predictivo, y la relación entre la gestión de O y M operación y mantenimiento, la ventaja competitiva (George, 2025). La comparación es consistente con estudios previos, pero añade a esto al vincular explícitamente el mantenimiento con el retorno de la inversión y la competitividad en un entorno industrial alimentario. En este análisis, los resultados reflejados son similares a la literatura científica internacional, particularmente desde una perspectiva técnica sobre el rendimiento, la fiabilidad y las fallas de los sistemas fotovoltaicos.

Investigaciones previas, encuentran que los componentes más propensos a fallas en la configuración fotovoltaica se relacionan principalmente con inversores, conexiones eléctricas o módulos bajo condiciones ambientales desafiantes. En general, los resultados están en línea con los riesgos operativos que se establecieron en la planta fotovoltaica analizada, por lo tanto, se evidencia que los problemas de Alpina no son un caso aislado, sino que reflejan un patrón ampliamente reconocido en el sector fotovoltaico. Pero, aunque la literatura previa se ha concentrado principalmente en la frecuencia, tipología y causas técnicas de las fallas, el estudio actual amplía la discusión para sugerir que la presencia de fallas tiene relevancia en el rendimiento del Retorno de la Inversión y la creación de una ventaja competitiva, particularmente en una industria relacionada con alimentos que estuvo ampliamente expuesta al efecto de continuidad operativa.

El caso sugiere que falta un enfoque de mantenimiento predictivo, lo que lleva a mayores costos de operación y mantenimiento y retrasa la recuperación de la inversión en la planta fotovoltaica, limitando también los beneficios económicos de la generación de energía solar. De manera similar, los hallazgos de(Meng, 2025). Se sugiere que la implementación del mantenimiento predictivo no solo debe verse como una ayuda técnica del sistema fotovoltaico, sino más bien como una herramienta de gestión que juega un papel de ayuda en la eficiencia operativa, subiendo la tasa de beneficio operativo durante dichas fases y aporta ventajas competitivas sostenibles en la industria alimentaria. En general, los resultados del estudio sugieren que la situación observada en la planta fotovoltaica de Alpina es consistente con lo reportado por la literatura científica internacional sobre sistemas fotovoltaicos. Varios estudios coinciden en que los problemas clave con las operaciones son principalmente partes como, inversores, conexiones eléctricas y módulos, lo que respalda la idea

de que los problemas que se observa en esta investigación coinciden con problemas técnicos bien conocidos (Kut, 2024). El uso de mantenimiento predictivo podría realmente convertir una planta de energía solar en una inversión inteligente que aporta más valor, para resumir, la comparación realizada muestra que el mantenimiento predictivo no es sólo una actualización tecnológica, sino que ayuda a la eficiencia, ahorra dinero y es bueno para el planeta.

El resultado en general indica que la planta fotovoltaica reduce significativamente la estructura de costos y proporciona un valor sostenible, al consolidar los registros mensuales, el costo anual de energía disminuye en un 66.65%, lo que equivale a \$ 84,846.79 menos que el escenario sin fotovoltaica cálculo con los totales anuales "con planta fotovoltaica" y "sin planta fotovoltaica" y cuando se observa los flujos de caja durante el período de arrendamiento y más allá, el proyecto logra un VAN 10% \$ 852,507, lo que significa que el proyecto no solo ahorra dinero hoy, sino que también crea valor en los años futuros y estabiliza el flujo de caja operativo frente a los precios fluctuantes de la energía. y un paso que puede ayudar a sostener estos resultados a lo largo del tiempo sería consolidar el mantenimiento predictivo que fortalece la ventaja competitiva de la empresa. El estudio sirve como evidencia de esa asociación conceptual entre el mantenimiento predictivo, la eficiencia operativa y el rendimiento financiero, por lo tanto, en apoyo de las estrategias de gestión de activos que relacionan las decisiones técnicas con los resultados económicos. Los resultados implican que el mantenimiento predictivo no solo representa una herramienta técnica, sino que es un mecanismo estratégico para proteger el flujo de caja y estabilizar los costos de energía, lo que amplía su comprensión dentro del campo de la administración de empresas y la competitividad sostenible. La evidencia científica respalda que el soiling (suciedad) y variables ambientales pueden producir pérdidas relevantes de rendimiento si no se gestiona una política de limpieza óptima. En particular, los estudios recientes proponen que la frecuencia de limpieza debe definirse con enfoque de condición y costo efectividad, incorporando variables ambientales como viento y lluvia y modelando la degradación para minimizar el costo promedio de mantenimiento sin sacrificar generación (Shen, 2024).

Resulta que usar mantenimiento predictivo podría ayudarnos a ahorrar dinero y al ejecutar este estudio se evidencia que se puede reducir los costos de operación en un 25% a 35%, y también se observa mejor rendimiento y confiabilidad en paneles solares. Esto es muy diferente de lo que está pasando en Alpina, donde están principalmente sólo arreglando problemas a medida que surgen o se van presentando. La discusión reconoce que el análisis se apoyó en registros documentales consolidados y financieros, por ejemplo, crecimiento de costo energético, por lo que futuros trabajos podrían fortalecer la inferencia incorporando series scada de alta credibilidad, datos termo gráficos estandarizados y pruebas comparativas antes y después de implementación real del mantenimiento predictivo para cuantificar con mayor precisión la reducción de pérdidas operativas (Syamsuddin, 2024); (Barraz, 2025).

5. CONCLUSIONES

Basados en el estudio, el mantenimiento predictivo sugiere una gestión más cercana a la operación real de la planta, minimizando la incertidumbre técnica, optimizando la asignación de recursos y apoyando la elección estratégica en el sector industrial. Así que, el mantenimiento predictivo deja su actividad técnica y actúa como una herramienta de planificación estratégica, lo cual es especialmente importante en sectores intensivos en energía como la industria alimentaria.

La implementación de la instalación fotovoltaica en la empresa Alpina sugiere una inversión económicamente ventajosa, ya que reduce en gran medida el consumo de energía y disminuye la dependencia del sistema de suministro eléctrico. El análisis de retorno de la inversión evidencia que los beneficios financieros que proporciona no solo están condicionados por la capacidad instalada o la energía generada, sino también por la eficiencia de operación y mantenimiento del sistema, en estos casos se sugiere el mantenimiento predictivo para la optimización del retorno financiero, así como para acortar el tiempo de recuperación de la inversión.

La adopción del mantenimiento predictivo evidencia un aumento en la eficiencia operativa de las plantas fotovoltaicas en la industria alimentaria, y particularmente en la empresa Alpina. De la evidencia investigada se desprende que el monitoreo continuo, la detección temprana de fallas y la minimización de tiempos de inactividad no programados conducen a la máxima disponibilidad del

sistema fotovoltaico, la continuidad operativa en los procesos de fabricación y la reducción de interrupciones energéticas en los riesgos del sistema.

Pero, los resultados deben interpretarse con cautela ya que el estudio presenta limitaciones asociadas al uso de un único caso de estudio, la ausencia de un contrafactual experimental y la dependencia de proyecciones financieras. En consecuencia, los hallazgos no pretenden generalización estadística, sino ofrecer evidencia aplicada transferible a contextos industriales con características operativas similares. Futuros estudios podrían incorporar diseños comparativos de múltiples casos, o datos SCADA en tiempo real para fortalecer la inferencia.

REFERENCIAS

Ahmed, A. M., Li, L., & Khalilpour, K. (2025). Predictive maintenance of solar photovoltaic systems: A comprehensive review. *IET Renewable Power Generation*, 19(1), e70152. <https://doi.org/10.1049/rpg2.70152>

Aljdaeh, E., et al. (2021). Performance enhancement of self-cleaning hydrophobic nanocoated photovoltaic panels in a dusty environment. *Energies*, 14(20), 6800.

Alrbai, M., AlAsfar, J., Alahmer, A., & Saeed, M. (2026). Life-cycle assessment and techno-economic analysis of a grid-connected solar photovoltaic system: Environmental benefits and economic feasibility. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. <https://doi.org/10.1177/01445987261417705>

Al-Salaymeh, A. S., Al-Mansi, N. N., Muslih, I. M., Altaharwah, Y. A., & Al Smadi, W. Y. (2023). Electrostatic cleaning effect on the performance of PV modules in Jordan. *Clean Engineering and Technology*, 13, 100606.

Al-Shammari, M., Alotaibi, S., & Alqahtani, A. (2024). Techno-economic assessment of solar photovoltaic systems under different environmental conditions. *Journal of Cleaner Production*, 433, 140123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140123>

Amran, N. M. H. N., Hassan, S. L. M., Halim, I. S. A., Sulaiman, N., Abdullah, N. E., & Rahim, A. A. A. (2023). Effect of water cooling and dust removal on solar photovoltaic module efficiency. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 105(1), 184–193.

ARCONEL & Ministerio de Ambiente y Energía (2025). Factor de Emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador – Informe 2024. https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2024_compressed.pdf

Barraz, Z., Sebari, I., Ait El Kadi, K., & Ait Abdelmoula, I. (2025). Towards a holistic approach for UAV-based large-scale photovoltaic inspection: A review on deep learning and image processing techniques. *Technologies*, 13(3), 117. <https://doi.org/10.3390/technologies13030117>

Bergin, M. H., Ghoroi, C., Dixit, D., Schauer, J. J., & Shindell, D. T. (2017). Large reductions in solar energy production due to dust and particulate air pollution. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(8), 339–344.

Calvo, G., Valero, A., & Valero, A. (2024). Renewable exergy return on investment (RExROI) in energy systems: The case of silicon photovoltaic panels. *Energy*, 304, 131961. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131961>

Carvalho, M., Delgado, J., & Soares, J. (2025). Technoeconomic performance of industrial photovoltaic systems under dynamic electricity pricing. *Applied Energy*, 355, 122275.

Corley, I., Wallace, C., Agrawal, S., Putrah, B., & Lwowski, J. (2025). Aerial infrared health monitoring of solar photovoltaic farms at scale. In *CVPR 2025 Workshops (PBVS)*. *Computer Vision Foundation*.

https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2025W/PBVS/papers/Corley_Aerial_Infrared_Health_Monitoring_of_Solar_Photovoltaic_Farms_at_Scale_CVPRW_2025_paper.pdf

Cucchiella, F., & D'Adamo, I. (2015). A multicriteria analysis of photovoltaic systems: Energetic, environmental, and economic assessments. *International Journal of Photoenergy*, 2015, 627454.

Dong, S., Li, Z., Wang, Y., & Zhao, X. (2023). Economic analysis and optimization of photovoltaic systems based on life-cycle assessment. *Energy*, 263, 125650. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125650>

- Drir, N., Mellit, A., & Bettayeb, M. (2025). A novel ensemble CNN framework with weighted feature fusion for fault diagnosis of photovoltaic modules using thermography images. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 15(1), 146–154.
- ESA. (2025). Predictive maintenance in photovoltaic plants: How artificial intelligence is revolutionizing operations and reducing costs. <https://esasl.com/en/predictive-maintenance-in-photovoltaic-plants-how-artificial-intelligence-is-revolutionizing-operations-and-reducing-costs/>
- Feldman, D., Ramasamy, V., Fu, R., Ramdas, A., Desai, J., & Margolis, R. (2021). U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2020 (NREL/TP-6A20-77324). *National Renewable Energy Laboratory*. <https://doi.org/10.2172/1764908>
- Gaikwad, S. R. (2025). AI-based predictive maintenance of solar photovoltaics systems: A comprehensive review. *Energy Informatics*, 8, Article 128. <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00594-6>
- George, A. A., & Ghosh, D. (2025). Advancements in sustainability in the 21st century: A bibliometric analysis of solar power and its applications. *Energy Reports*, 14, 4291–4307.
- Guo, Z., Lu, J., Chen, Q., Liu, Z., Song, C., Tan, H., Zhang, H., & Yan, J. (2024). TransPV: Refining photovoltaic panel detection accuracy through a vision transformer-based deep learning model. *Applied Energy*, 355, 122282. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122282>
- Habib, S., Tamoor, M., Gulzar, M. M., Chauhdary, S. T., Ahmad, H., Alqahtani, M., & Khalid, M. (2024). Design, techno-economic evaluation, and experimental testing of grid-connected rooftop solar photovoltaic systems for commercial buildings. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1483755. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1483755>
- Han, X., Wang, Y., & Zhang, L. (2022). Economic assessment of photovoltaic systems under different maintenance strategies. *Energy Reports*, 8, 1314–1326.
- Hassan, Q., Jaszczur, M., & Abdulateef, A. (2022). Machine learning-based predictive maintenance for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112183.
- Høiaas, I., Grujic, K., Imenes, A. G., Burud, I., & Olsen, E. (2022). Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: A review of imaging technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112353. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112353>
- Jäger-Waldau, A. (2024). Snapshot of photovoltaics – February 2024. *EPJ Photovoltaics*, 15, 21. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024018>
- Kumar, N. M., Chopra, S. S., & Chand, A. A. (2023). Performance and economic analysis of grid-connected photovoltaic systems in emerging economies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103159. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103159>
- Kut, P., Pietrucha Urbanik, K., & Kurek, P. (2024). Comprehensive Analysis of Failures in Photovoltaic Installations—A Survey Based Study. *Energies*, 17(23), 5986. <https://doi.org/10.3390/en17235986>
- Lazard. (2023). *Levelized cost of energy analysis (Version 16.0)*. Lazard. <https://www.lazard.com/research-insights>
- Lopes, V., Rocha, D., Alves, J., Teixeira, J., Fernandes, P., Costa, M., Morais, M., & Salomé, P. (2026). Comprehensive overview of photovoltaic plants operations and maintenance using UAV-based IR imaging and advanced image analysis techniques. *Renewable Energy Focus*, 57, 100825.
- Luu, L. Q., Cellura, M., Guarino, F., & Longo, S. (2026). Recommended actions for eco-design of solar energy technologies based on life cycle approach. *Energy Reports*, 15, 108961
- M. Cubukcu, A. Akanalci, Real-time inspection and determination methods of faults on photovoltaic power systems by thermal imaging in Turkey, *Renew. Energy* 147 (Mar. 2020) 1231–1238, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.075>.
- Mellit, A., Kalogirou, S. A., & Drif, M. (2024). Artificial intelligence for maintenance and performance optimization of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113892. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113892>
- Meng, Q., He, Y., Hussain, S., Lu, J., & Guerrero, J. M. (2025). Robust single-layer predictive control for grid-tied solar systems with integrated maximum power point tracking and power flow optimization. *Energy Reports*, 14, 2557–2569.
- Nfaoui, M., & El-Hami, K. (2018). Extracting the maximum energy from solar panels: Optimum tilt angle for Morocco—A MATLAB-based approach. *Energy Reports*, 4, 536–545.

Nguyen, H. T., Pearce, J. M., Harrap, R., & Barber, G. (2012). The application of LiDAR to assessment of rooftop solar photovoltaic deployment potential in a municipal district unit. *Sensors*, 12(4), 4534–4558.

Odoi-Yorke, F., Baah, B., Kissi-Boateng, R., Opoku, R., & Effah, F. B. (2025). Unlocking the potential of redundant energy from solar photovoltaic systems: Navigating global research trends, innovations, and future directions. *Energy Reports*, 13, 6362–6383.

Pourmousavi, S. A., Nehrir, M. H., & Colson, C. M. (2023). *Real-time energy management and system reliability in microgrids*. *Applied Energy*, 345, 121234.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121234>

Said, S. Z., Islam, S. Z., Radzi, N. H., Wekesa, C. W., Altimania, M., & Uddin, J. (2024). Dust impact on solar PV performance: A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions. *Energy Reports*, 12, 1121–1141.

<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.12.189>

Saumik, S. M. M., Rahman, N., Al Noman, M. A., Islam, R., & Ahmed, M. R. (2025). Techno-economic investigation of a solar photovoltaic energy model using PVsyst, HOMER, and RETScreen. *Discover Electronics*, 2, 81. <https://doi.org/10.1007/s44291-025-00119-1>

Shahidehpour, M., Li, Z., & Ganji, M. (2024). Energy system operation and maintenance: Optimization and reliability considerations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(1), 1123–1135. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3298745>

Shen, Y., Fouladirad, M., & Grall, A. (2024). Impact of dust and temperature on photovoltaic panel performance: A model-based approach to determine optimal cleaning frequency. *Heliyon*, 10(16), e35390. [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)11421-1](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)11421-1)

SlepAbdulla, H. S. (2024). Photovoltaic systems operation and maintenance. *Elsevier*, 195. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114342>

Syamsuddin, A., Adhi, A. C., Kusumawardhani, A., Prahasto, T., & Widodo, A. (2024). Predictive maintenance based on anomaly detection in photovoltaic system using SCADA data and machine learning. *Results in Engineering*, 24, 103589. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103589>

Zhang, H., Li, Y., Wang, P., & Ma, T. (2022). Degradation analysis and performance evaluation of solar photovoltaic systems. *Solar Energy*, 231, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.056>