

MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y SMART FACTORY EN SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

REYNALDO CONDORI YUCRA
JUNIOR TORRES YUCRA
VILMA SARMIENTO MAMANI
NORMAN JESÚS BELTRÁN CASTAÑÓN



MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y SMART FACTORY EN SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

REYNALDO CONDORI YUCRA
JUNIOR TORRES YUCRA
VILMA SARMIENTO MAMANI
NORMAN JESÚS BELTRÁN CASTAÑÓN



Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI
Prof. Dr. Astor João Schönell Júnior - IFFAR
Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR
Prof. Dr. Allan Diêgo Rodrigues Figueiredo - UESPI
Profa. Dra. Andréia Bulaty - UNESPAR
Profa. Dra. Carla da Conceição de Lima - UFVJM
Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - UNISC
Profa. Dra. Clarice Caldeira Leite - UFRGS
Profa. Dra. Cecilia Decarli - UFRGS
Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - UNICID
Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - UFCE
Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - UFMA
Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - UEL
Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio - UFRGS
Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - FASESP
Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - UERN
Profa. Dra. Elen Gomes Pereira - IFBA
Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - UFN
Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - IFCE
Prof. Dr. Francisco Ricardo Miranda Pinto - UFCAT
Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - UCB
Prof. Dr. Ismar Inácio dos Santos Filho - UFAL
Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch - UFSM
Profa. Dra. Liziany Müller Medeiros - UFSM
Profa. Dra. Marcela Mary José da Silva - UFRB
Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - UFSM
Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - UFMS
Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - UNICENTRO
Prof. Nilton David Vilchez Galarza - UPLA
Prof. Dr. Olavo Barreto de Souza - UEPB
Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - UFABC
Prof. Dr. Roberto Araújo da Silva Vasques Rabelo - UNISANTOS
Prof. Dr. Rodrigo Toledo - USCS
Prof. Dr. Rodolfo Rodrigues de Souza - UERJ
Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - UFSM
Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - UFOB
Prof. Dr. Tomás Raúl Gómez Hernández - UCLV

Editor Chefe: Ivanio Folmer

Bibliotecária: Eliane de Freitas Leite

Projeto gráfico e Diagramação: Gabriel Eldereti Machado

Imagem capa: www.canva.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Mantenimiento predictivo y smart factory en
sistemas de energía solar fotovoltaica [livro
eletrônico] / Reynaldo Condori Yucra...[et al.].
-- Santa Maria, RS : Arco Editores, 2025.
PDF

Outros autores: Junior Torres Yucra, Vilma
Sarmiento Mamani, Norman Jesús Beltrán Castañón.
Bibliografia.
ISBN 978-65-5417-468-8

1. Energia - Fontes alternativas 2. Energia solar
fotovoltaica 3. Manutenção I. Condori Yucra,
Reynaldo. II. Torres Yucra, Junior. III. Sarmiento
Mamani, Vilma. IV. Beltrán Castañón, Norman Jesús.

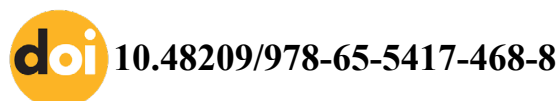
25-274598

CDD-621.47

Índices para catálogo sistemático:

1. Energia solar fotovoltaica : Engenharia 621.47

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415



Este livro é o resultado de uma pesquisa científica em atividades de ciência e tecnologia.

O trabalho foi revisado por pares acadêmicos externo antes de ser publicado.



CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO I.....	14
FUNDAMENTOS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	14
1.1. Conceptos básicos del mantenimiento predictivo.....	15
1.1.1. Tipos de mantenimiento.....	16
1.1.2. Monitoreo de activos en tiempo real.....	17
1.2. Técnicas principales del mantenimiento predictivo.....	18
1.2.1. Análisis de vibraciones.....	19
1.2.2. Análisis de temperatura.....	19
1.2.3. Análisis de ultrasonido.....	20
1.2.4. Análisis de aceites.....	20
1.2.5. Análisis de corriente eléctrica.....	21
1.2.6. Análisis de presión.....	21
1.3. Gemelos digitales en el mantenimiento predictivo.....	22
1.3.1. Motivaciones y beneficios de la implementación de gemelos digitales	23
1.3.2. Aplicaciones de los gemelos digitales en sistemas fotovoltaicos.....	24
1.4. Implementación del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos.....	26
1.4.1. Proceso del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos.....	27
1.4.2. Tecnologías para el mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos.....	28
1.5. Impacto y futuro del mantenimiento predictivo en energía fotovoltaica.....	29
1.5.1. Ventajas y beneficios del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos.....	30

<i>1.5.2. Innovaciones y desafíos en sistemas fotovoltaicos</i>	31
CAPÍTULO II	34
ASPECTOS ESENCIALES DE LA SMART FACTORY	34
2.1. Nociones generales de la smart factory	35
<i>2.1.1. Elementos de la smart factory</i>	36
<i>2.1.2. Smart Factory en la industria 4.0</i>	37
2.2. Metodología y niveles de la smart factory	38
<i>2.2.1. Metodología para la planificación de smart factory</i>	38
<i>2.2.2. Madurez digital en smart factory</i>	41
2.3. Avances tecnológicos en I4.0 y smart factories	42
<i>2.3.1. IA e IoT en automatización y optimización de procesos</i>	42
<i>2.3.2. Tecnologías de detección en una smart factory</i>	43
2.4. Smart factory en la producción de sistemas fotovoltaicos	45
<i>2.4.1. Digitalización en la producción fotovoltaica</i>	46
<i>2.4.2. Automatización en sistemas fotovoltaicos</i>	47
2.5. Impacto y futuro de la smart factory en la generación fotovoltaica	49
<i>2.5.1. Tendencias y avances tecnológicos en sistemas fotovoltaicos</i>	50
<i>2.5.2. Beneficios y desafíos en sistemas fotovoltaicos</i>	51
CAPÍTULO III	54
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Y SU IMPORTANCIA EN LAS ENERGÍAS RENOVABLES	54
3.1. Fundamentos básicos de los sistemas fotovoltaicos	55
<i>3.1.1. Instalaciones y equipamiento de sistemas fotovoltaicos</i>	56
<i>3.1.2. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos</i>	58
3.2. Tecnología de módulos fotovoltaicos	58
<i>3.2.1. Primera generación (silicio cristalino)</i>	59
<i>3.2.2. Segunda generación (capa fina - thin film)</i>	60
<i>3.2.3. Tercera generación (tecnologías emergentes)</i>	61
3.3. Factores que afectan el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos	62
<i>3.3.1. Factores ambientales</i>	62
<i>3.3.2. Factores operativos</i>	64
3.4. Energía fotovoltaica en el marco de la transición energética	65
<i>3.4.1. Impacto y tipos de recursos energéticos</i>	67

3.5. Sistemas fotovoltaicos y su contribución al desarrollo sostenible..	70
3.5.1. Reducción de emisiones y mitigación del cambio climático.....	71
3.5.2. Rol de la ingeniería en la optimización de energías renovables.....	72
CAPÍTULO IV.....	74
MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y SMART FACTORY EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS: UNA REVISIÓN INTEGRATIVA.....	74
4.1. Metodología	78
4.2. Resultados.....	80
4.3. Discusión.....	86
4.4. Conclusiones.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
SOBRE LOS AUTORES.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Semejanzas y diferencias entre los tipos de mantenimiento.....	16
Tabla 2. Elementos de una fábrica inteligente.....	36
Tabla 3. Características y ventajas de los sistemas on-grid y off-grid.....	58
Tabla 4. Documentos incluidos en la revisión.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases del mantenimiento predictivo.....	27
Figura 2. Energía fotovoltaica en edificios.....	32
Figura 3. Niveles de madurez digital en smart factory.....	41
Figura 4. Energía fotovoltaica en hogares.....	52
Figura 5. Mantenimiento de paneles solares.....	53
Figura 6. Principales fuentes de energías renovables.....	67
Figura 7. Principales fuentes de energías no renovables.....	69
Figura 8. Funciones de la ingeniería para la optimización de energías renovables.....	73
Figura 9. Estructura básica de un sistema fotovoltaico conectado (SFC).....	75
Figura 10. Flujograma de las etapas para la selección de artículos.....	78
Figura 11. Flujograma del proceso de investigación según el protocolo PRISMA.....	79
Figura 12. Tendencia del número de publicaciones por año.....	85

RESUMEN

En el contexto contemporáneo, el mantenimiento predictivo (PdM, por sus siglas en inglés) es una alternativa efectiva para el monitoreo continuo, la detección de fallos y la conservación de los medios y equipos innovadores. En ese sentido, el objetivo de este estudio fue explorar la bibliografía actualizada sobre la aplicación del mantenimiento predictivo en la *smart factory* (fábrica inteligente) y en los sistemas fotovoltaicos conectados (SFC). La metodología empleada, de alcance descriptivo, está sustentada en una revisión integrativa de la documentación relacionada con el PdM en la *smart factory* (SF) y en los sistemas fotovoltaicos conectados. Fue llevada a cabo teniendo en cuenta el periodo 2015-2025 y se consideraron estudios de enfoque cuantitativo, cualitativo y mixto. Los resultados de la búsqueda en las bases de datos Google Scholar, Refseek y Scopus precisaron —luego de la aplicación de los criterios de selección— un número de 15 artículos para la revisión integrativa. Las conclusiones resaltan que los SFC necesitan, como mínimo, una herramienta de PdM imparcial y lista para optimizar su funcionamiento, rendimiento y el retorno de la inversión. De igual manera, la misma debe minimizar el riesgo de reclamo de garantía en las instalaciones. Por otro lado, se destaca que la Industria 4.0 —donde se ubican las SF— se caracteriza principalmente por el análisis de datos y los métodos de aprendizaje automático, los que están destinados a mejorar los procedimientos de producción. Por ello, la ejecución del PdM contribuye a minimizar el tiempo de inactividad de las máquinas y los costos, así como también mejorar el control y la calidad de la producción.

Palabras clave: mantenimiento predictivo, monitoreo continuo, *smart factory*, sistemas fotovoltaicos conectados, aprendizaje automático.

ABSTRACT

In the contemporary context, predictive maintenance (PdM) is an effective alternative for continuous monitoring, failure detection and preservation of innovative means and equipment. In this sense, the objective of this study was to explore the updated literature on the application of predictive maintenance in the smart factory and connected photovoltaic systems (CFS). The methodology employed, descriptive in scope, is supported by an integrative review of the documentation related to PdM in the smart factory (SF) and in connected photovoltaic systems. It was carried out considering the period 2015-2025 and studies of quantitative, qualitative and mixed approach were considered. The results of the search in Google Scholar, Refseek and Scopus databases specified - after the application of the selection criteria - a number of 15 articles for the integrative review. The conclusions highlight that SFCs need, as a minimum, an unbiased and ready PdM tool to optimize their operation, performance and return on investment. Likewise, it should minimize the risk of warranty claims at the facility. On the other hand, it should be noted that Industry 4.0 - where SFs are located - is mainly characterized by data analysis and machine learning methods, which are aimed at improving production procedures. Therefore, the execution of PdM contributes to minimize machine downtime and costs, as well as to improve production control and quality.

Keywords: predictive maintenance, continuous monitoring, smart factory, connected photovoltaic systems, machine learning.

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento predictivo y las fábricas inteligentes han cobrado creciente relevancia en la optimización de los sistemas fotovoltaicos, al punto de consolidarse como tecnologías clave en la transición energética. El mantenimiento predictivo permite anticipar fallos y mantener la operatividad de los equipos sin interrupciones, mientras que las fábricas inteligentes —impulsadas por los principios de la Industria 4.0— integran herramientas como la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las cosas (IoT) para perfeccionar los procesos de producción y gestión energética. En conjunto, estas innovaciones contribuyen a una mayor eficiencia operativa y sostenibilidad en los sistemas industriales actuales.

En cuanto al mantenimiento predictivo, destacan diversas técnicas, como el análisis de vibraciones, temperatura y corriente eléctrica, las cuales facilitan la supervisión constante y en tiempo real de los equipos. Esto no solo perfecciona la respuesta operativa, sino que también prolonga la durabilidad de los sistemas al prevenir fallos imprevistos y minimizar tiempos de inactividad. La incorporación de gemelos digitales en estos procesos potencia aún más los resultados, permitiendo una visualización precisa y dinámica del comportamiento de los activos.

De otro lado, las fábricas inteligentes —con su enfoque digital y automatizado— transforman la producción de módulos fotovoltaicos. Por una parte, la implementación de tecnologías avanzadas mejora la precisión y la calidad, mientras que, por otra, los sistemas de control inteligente contribuyen a un manejo eficaz de los recursos y la energía. Estas innovaciones optimizan los procesos de fabricación, ayudan a disminuir los gastos operativos y aumentan la competitividad en el campo de las energías sostenibles.

En el contexto de las energías renovables, los sistemas fotovoltaicos juegan un papel determinante al ser una alternativa sostenible y eficiente frente a los desafíos energéticos actuales. Su integración con tecnologías de

mantenimiento predictivo y fábricas inteligentes facilita una operación más confiable, maximizando la eficiencia y la longevidad de los equipos. Esta sinergia impulsa la adopción de energías limpias e interviene significativamente en la reducción de emisiones, propiciando el avance hacia una matriz energética más responsable con el medio ambiente.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El mantenimiento predictivo ha emergido como una estrategia clave en la gestión de activos, especialmente en sectores que demandan un nivel elevado de fiabilidad y eficiencia, como el de la energía fotovoltaica. Esta metodología se sustenta en la observación permanente de los equipos y permite identificar fallos antes de que se materialicen, lo cual ayuda a minimizar costos y tiempos de inactividad. De ese modo, el mantenimiento predictivo —a través del análisis de diversos parámetros operativos— incrementa la eficiencia operativa y, al mismo tiempo, prolonga la durabilidad de los sistemas.

En este marco, es fundamental tener en cuenta los distintos tipos de mantenimiento, como el correctivo, el preventivo y el predictivo. Por ejemplo, el correctivo se centra en intervenir solo después de un fallo o en intervalos preestablecidos, mientras que el predictivo permite anticipar problemas basándose en datos obtenidos en tiempo real. Este enfoque proactivo se convierte en una ventaja competitiva, especialmente en sistemas fotovoltaicos, donde el desempeño continuo y sin interrupciones es fundamental para asegurar una producción energética óptima.

Asimismo, las técnicas empleadas en el mantenimiento predictivo, como el análisis de vibraciones, temperatura y aceites, entre otras, son esenciales para identificar posibles anomalías en el funcionamiento de los sistemas. Estas herramientas avanzadas permiten una evaluación precisa del estado de los activos, lo que ayuda a tomar decisiones fundamentadas y oportunas. En el ámbito fotovoltaico en particular, el monitoreo constante de los equipos hace posible una intervención temprana, evitando fallos mayores y prolongando la utilidad de los sistemas.

En suma, la implementación del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos mejora la eficiencia operativa y genera nuevas alternativas para la innovación. El avance de tecnologías como la de los gemelos digitales ha

transformado la manera en que se gestionan estos sistemas, aportando beneficios significativos en términos de control y optimización. De cara al futuro, el mantenimiento predictivo se perfila como una herramienta primordial para garantizar la sostenibilidad y el crecimiento del sector de la energía renovable, ya que ofrece soluciones cada vez más eficientes y adaptadas a las necesidades del mercado.

1.1. Conceptos básicos del mantenimiento predictivo

El mantenimiento como tal se refiere a la supervisión y gestión permanente de las estructuras, así como de los elementos que conforman un producto o servicio. Asimismo, abarca las labores de inspección y corrección necesarias para velar por el desempeño ideal y la adecuada conservación de un sistema de producción. En ese sentido, estas acciones se aplican tanto a infraestructuras fijas y móviles como a equipos, maquinarias y edificaciones industriales, comerciales o de servicios. Su propósito principal es evitar interrupciones inesperadas, potenciar la eficiencia productiva y garantizar el cumplimiento de las expectativas del cliente (Pinzón, 2023).

En este contexto, el mantenimiento predictivo se basa en estrategias y métodos diseñados para detectar fallos antes de que ocurran a fin de minimizar riesgos y costos operativos. En los últimos años, la integración de técnicas avanzadas, como el aprendizaje automático y profundo, ha permitido mejorar la detección de anomalías y optimizar la gestión del mantenimiento. Así, esta metodología facilita la identificación temprana de problemas y refuerza la determinación de decisiones en entornos industriales. De este modo, se logra una mayor fiabilidad en los sistemas productivos y se evitan pérdidas económicas derivadas de paradas imprevistas (Campos-Olivares *et al.*, 2024).

Asimismo, el mantenimiento predictivo contribuye significativamente a mejorar el desempeño de los equipos. Su implementación permite una detección más eficiente de anomalías, lo que asegura la continuidad operativa y prolongan el ciclo vital de los activos. De esa forma, se fortalece la estabilidad de los procesos productivos y se minimizan las interrupciones inesperadas, mejorando con ello la rentabilidad empresarial. Igualmente, posibilita asignar

recursos de manera más eficiente al evitar reparaciones costosas y prolongados tiempos de inactividad (Buestán-Andrade *et al.*, 2023).

Por otro lado, la implementación de tecnologías como la IA y el IoT ha impulsado la adopción del mantenimiento predictivo en la industria. La aplicación de algoritmos de aprendizaje automático potencia la detección de fallos y mejora la precisión en la predicción de averías. Como campo de estudio, este enfoque fomenta el desarrollo de nuevas metodologías que aumentan la eficiencia operativa y facilitan la toma de decisiones estratégicas en el mantenimiento industrial. A largo plazo, la implementación de estas tecnologías contribuye a la sostenibilidad empresarial y al incremento de la competitividad en el mercado (Paredes & Romero, 2025).

1.1.1. Tipos de mantenimiento

De acuerdo con Pinzón (2023), el mantenimiento es un proceso vital para asegurar el rendimiento óptimo y seguro de los equipos. Comprender sus semejanzas y diferencias optimiza la gestión operativa y minimiza los costos asociados a fallos o interrupciones. Existen distintos tipos de mantenimiento, cada uno con características, objetivos y métodos específicos cuya aplicación depende de factores como la naturaleza del sistema, el nivel de criticidad de los equipos y los recursos disponibles.

Tabla 1. *Semejanzas y diferencias entre los tipos de mantenimiento*

Criterio	Mantenimiento predictivo	Mantenimiento preventivo	Mantenimiento reactivo
Momento de intervención	Antes de que ocurra una falla (según el estado real del equipo)	Antes de que ocurra una falla (según calendario o uso)	Después de que ocurre una falla
Base de acción	Monitoreo continuo, análisis de datos e inteligencia artificial	Tiempo de uso, recomendaciones del fabricante	Fallo inesperado del equipo
Ventajas	Reduce tiempos de inactividad, optimiza recursos	Alarga la vida útil de los activos, reduce fallos imprevistos	No requiere planificación previa ni tecnología avanzada

Desventajas	Requiere inversión en tecnología y personal especializado	Puede generar mantenimiento innecesario si las piezas están en buen estado	Puede provocar paradas prolongadas y altos costos
Nivel tecnológico requerido	Alto	Medio	Bajo
Aplicación recomendada	Sistemas críticos con capacidad de monitoreo	Equipos de uso constante o con programas de mantenimiento establecidos	Equipos no críticos o donde hay limitaciones presupuestarias

Nota. Adaptado de Pinzón (2023).

En resumen, los tipos de mantenimiento presentan enfoques distintos que responden a necesidades y contextos específicos. Mientras el predictivo apuesta por la tecnología y la anticipación, el preventivo se basa en la planificación periódica, en tanto que el reactivo actúa tras la falla. Cada uno ofrece ventajas y desventajas según los recursos disponibles y la criticidad de los equipos. La elección adecuada dependerá de los objetivos operativos de la organización (Pinzón, 2023).

1.1.2. Monitoreo de activos en tiempo real

El monitoreo de activos es un procedimiento que permite controlar de manera remota los bienes físicos con el empleo de dispositivos tecnológicos y sofisticados *softwares*. En cuanto a las soluciones basadas en la tecnología IoT, estas ofrecen datos detallados en tiempo real sobre la identificación, localización y estado de los activos. Además, facilitan la planificación del mantenimiento y alertan a los responsables sobre posibles fallos. Su implementación es fundamental en áreas como la construcción, la manufactura, la logística, la atención médica, entre otros. Gracias a estas herramientas, las empresas pueden optimizar sus operaciones y reducir riesgos operativos (Cruz & Lara, 2022).

En muchas empresas, la ausencia de un sistema para analizar la eficiencia de los activos ocasiona la pérdida de información valiosa. Las inspecciones presenciales, al no generar registros automatizados, impiden el control detalla-

do del estado y funcionamiento de los equipos. Por ello, contar con un monitoreo adecuado posibilita extender la durabilidad de los recursos y minimizar las paradas operativas mediante mantenimientos ejecutados de manera anticipada. Asimismo, facilita la identificación de patrones de uso y prever necesidades futuras de mantenimiento (Gualapuro *et al.*, 2025).

Con el paso del tiempo, han surgido innovaciones tecnológicas que optimizan la gestión de los activos. El Internet de las Cosas (IoT), por ejemplo, posibilita la interconexión de diversos dispositivos por medio de la red, lo que mejora la productividad y minimiza costos operativos. Su implementación facilita la detección temprana de fallos y evita interrupciones en los procesos. Para ello, se utilizan protocolos de comunicación como MQTT, OPC UA y RESTful HTTP, los cuales garantizan una transmisión eficiente de datos para su posterior análisis. Estas tecnologías han transformado la forma en que las empresas administran y supervisan sus activos (Cruz & Lara, 2022).

Un sistema de monitoreo recopila información proveniente de los activos y la envía a la nube para su procesamiento y visualización en paneles de control con indicadores clave de rendimiento (KPI, por sus siglas en inglés). Adoptar un *software* de gestión de activos ayuda a prevenir problemas graves y gastos innecesarios, como la sustitución de componentes o equipos completos debido a fallos no detectados a tiempo. Por lo tanto, la automatización del monitoreo es una estrategia clave para mejorar la eficiencia operativa y la toma de decisiones en las empresas, que así pueden garantizar un mejor control y optimización de sus recursos (Bhanji *et al.*, 2021).

1.2. Técnicas principales del mantenimiento predictivo

Conforme a Mafla *et al.* (2022), el mantenimiento predictivo emplea diversas técnicas para detectar fallas en equipos antes de que ocurran, con lo que mejoran su rendimiento y vida útil. Estas técnicas permiten realizar diagnósticos precisos mediante mediciones avanzadas como las siguientes:

1.2.1. Análisis de vibraciones

Es una de las prácticas más recurridas en el mantenimiento predictivo, especialmente en equipos rotativos como motores, generadores y bombas. Se basa en cuantificar la frecuencia y la intensidad de las vibraciones para identificar desbalances, desalineaciones o fallas en los rodamientos por medio de sensores especializados. A través de esta técnica, es posible anticipar fallos estructurales, lo que reduce tiempos de inactividad y evita daños severos en los equipos.

El uso de herramientas como acelerómetros y softwares de análisis espectral sirve para detectar patrones anormales en el comportamiento mecánico de las máquinas, cuya interpretación permite determinar la severidad del problema y planificar mantenimientos antes de que se produzca una avería crítica. Gracias a esta técnica, las empresas pueden perfeccionar el rendimiento operativo, disminuir los gastos de mantenimiento y extender la durabilidad de los equipos. Asimismo, facilita la toma de decisiones estratégicas en la gestión del mantenimiento industrial.

1.2.2. Análisis de temperatura

Es una herramienta esencial para la detección anticipada de fallas en los componentes eléctricos y mecánicos. Una elevación anormal en la temperatura puede indicar problemas como fricción excesiva, sobrecarga eléctrica o fallas en el sistema de refrigeración. Para este tipo de análisis, se utilizan sensores térmicos y cámaras infrarrojas con el fin de identificar puntos calientes en tiempo real sin necesidad de contacto directo. Así, se pueden tomar acciones correctivas antes de que ocurra una avería mayor.

En sistemas eléctricos, una mala conexión o un deterioro en los conductores pueden generar sobrecalentamientos que, de no ser detectados, podrían provocar fallas catastróficas o incendios. En equipos mecánicos, la temperatura elevada puede advertir sobre un problema de lubricación o desgaste en los componentes. Al implementar esta técnica, se optimiza la eficiencia energética, se reducen riesgos operativos y se disminuye la necesidad de mantenimientos

correctivos inesperados. También contribuye a prolongar la vida útil de los sistemas eléctricos y mecánicos.

1.2.3. Análisis de ultrasonido

Permite detectar fallas en equipos mediante la captación de sonidos de alta frecuencia imperceptibles para el oído humano. Esta técnica se utiliza para localizar fugas de aire comprimido, problemas en rodamientos y descargas eléctricas parciales en sistemas de alta tensión. Por medio del uso de detectores ultrasónicos, los técnicos pueden identificar irregularidades en el rendimiento de los equipos sin necesidad de detener la producción. Su aplicación facilita un mantenimiento más eficiente y reduce los costos operativos.

El análisis de ultrasonido resulta de gran valor también en el mantenimiento de sistemas hidráulicos y neumáticos, ya que ayuda a identificar obstrucciones o fugas en tuberías. En el ámbito eléctrico, se emplea para detectar arcos eléctricos o fallos en aisladores, evitando con ello riesgos de cortocircuitos y accidentes. Gracias a su capacidad de detección temprana, contribuye a mejorar la seguridad en los entornos industriales y a reducir pérdidas energéticas derivadas de fugas o fallos en los equipos. Además, favorece el máximo aprovechamiento de recursos energéticos y materiales.

1.2.4. Análisis de aceites

Es una técnica fundamental en la supervisión del estado de lubricantes utilizados en motores, engranajes y sistemas hidráulicos. Su objetivo consiste en detectar la presencia de contaminantes, degradación del aceite o partículas metálicas que puedan indicar desgaste en los componentes mecánicos. A través de pruebas como la espectrometría y la medición de viscosidad, se pueden obtener datos precisos sobre el estado del lubricante y prevenir fallas prematuras. Esto permite implementar estrategias de mantenimiento basadas en la condición real del equipo.

En tal sentido, un aceite contaminado o degradado puede afectar el rendimiento de la maquinaria, generando mayor fricción y sobrecalentamiento

en los componentes. Por ello, con el análisis periódico del lubricante, es posible determinar el momento adecuado para cambiarlo, lo que favorece el mantenimiento de los equipos. Implementar esta técnica ayuda a prolongar la durabilidad de la maquinaria, disminuir costos operativos y potenciar la eficiencia del sistema de lubricación. En adición a lo anterior, contribuye a la sostenibilidad al reducir el desperdicio de aceites industriales y minimizar el impacto ambiental.

1.2.5. Análisis de corriente eléctrica

Se centra en la medición de magnitudes eléctricas como el voltaje, la corriente y la resistencia en motores, generadores y transformadores. Se utiliza para detectar anomalías en el consumo de energía, identificando problemas como sobrecargas, cortocircuitos o desgaste en el aislamiento. Mediante herramientas como analizadores de redes y osciloscopios, se pueden registrar variaciones en el suministro eléctrico para anticipar fallos. Con ello se mejora la seguridad eléctrica y se previenen paradas costosas en la producción, a la vez que se optimiza el rendimiento y la estabilidad del sistema eléctrico.

Un comportamiento anómalo en el consumo de energía puede ser indicativo de conexiones defectuosas o problemas en los devanados de los motores eléctricos. La implementación de esta técnica no solo mejora el uso de energía, sino que ayuda a prevenir fallos inesperados que podrían afectar la operatividad de los equipos. Igualmente, reduce el riesgo de daños eléctricos graves al proteger la infraestructura industrial y evitar interrupciones en la producción. También permite realizar ajustes preventivos en los sistemas eléctricos para optimizar su rendimiento.

1.2.6. Análisis de presión

Resulta clave en el mantenimiento de sistemas hidráulicos y neumáticos, ya que posibilita detectar fugas, bloqueos o fallos en válvulas y bombas. Los sensores de presión registran variaciones en tiempo real, proporcionando datos que ayudan a diagnosticar problemas antes de que generen fallos significati-

vos. Un descenso repentino en la presión puede señalar una fuga en el sistema, mientras que un incremento anormal puede señalar una obstrucción en las tuberías. Gracias a este monitoreo, se aumenta el rendimiento de los equipos y se reducen los tiempos de inactividad.

En sistemas industriales, mantener una presión adecuada constituye un aspecto fundamental para garantizar el desempeño adecuado de los equipos. Un monitoreo constante ayuda a evitar pérdidas de energía y daños en los componentes, prolongando la vida útil de los sistemas. Implementar esta técnica disminuye los gastos de mantenimiento correctivo y optimiza la seguridad operativa al evitar fallos que podrían comprometer la producción. También mejora la regulación de los sistemas hidráulicos y neumáticos para maximizar su eficiencia, asegurando así un desempeño más estable y confiable en los procesos industriales.

1.3. Gemelos digitales en el mantenimiento predictivo

Los gemelos digitales, también denominados plantas virtuales, representan un concepto que ha evolucionado considerablemente con el tiempo. Basándose en el modelado y la simulación de procesos para mejorar diversas operaciones, un gemelo digital consiste en una réplica virtual, ya sea total o parcial, de un proceso o sistema físico que se actualiza de manera constante en sincronización con su equivalente real. Gracias a su sofisticada arquitectura y funcionalidades avanzadas, mejora aspectos clave de los procesos industriales (de Prada *et al.*, 2022).

En el campo de la cadena de suministro 4.0, la adopción de gemelos digitales ha supuesto una transformación significativa de las operaciones industriales, ya que posibilita la creación de representaciones virtuales exactas de productos, sistemas y procesos. Al facilitar la supervisión, simulación y análisis en tiempo real, esta tecnología se ha tornado en un factor básico para incrementar la eficacia operativa, reforzar la sostenibilidad y robustecer la capacidad de respuesta de las cadenas de producción, lo que deriva en una mejor adaptación a los desafíos del entorno empresarial (Castillo *et al.*, 2024).

En el sector servicios, los gemelos digitales están redefiniendo la gestión de activos y los procesos de mantenimiento, ya que el uso de modelos tridimensionales combinados con datos en tiempo real facilita a las empresas monitorear de manera exhaustiva el estado y desempeño de su infraestructura. Este enfoque optimiza la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y reduce la incidencia de interrupciones inesperadas, lo que resulta especialmente crucial en sectores como el energético y el de servicios públicos, donde cada interrupción puede acarrear consecuencias económicas y operativas significativas (Guzmán & Hincapié, 2024).

De este modo, el mantenimiento predictivo es uno de los campos en donde los gemelos digitales han demostrado mayor impacto, pues su capacidad para anticipar fallos y mejorar la planificación de intervenciones técnicas permite reducir costos operativos y minimizar los tiempos de inactividad. Además, al prever problemas antes de que ocurran, esta tecnología prolonga la vida útil de los equipos y disminuye el impacto ambiental asociado con reparaciones y sustituciones no planificadas, promoviendo así una operación más sostenible y eficiente dentro de cualquier entorno industrial o de servicios (Castillo *et al.*, 2024).

1.3.1. Motivaciones y beneficios de la implementación de gemelos digitales

De acuerdo con Álvarez *et al.* (2023), la transformación digital ha impulsado el empleo de herramientas innovadoras que perfeccionan la gestión y el desempeño de diversos sistemas. Entre estas tecnologías, los gemelos digitales se destacan como modelos virtuales avanzados que replican con precisión sistemas físicos, facilitando su monitoreo y optimización en tiempo real. Dado su potencial, hay varias razones para implementar estas detalladas representaciones digitales como una herramienta esencial dentro de los procesos de digitalización.

En primer lugar, los gemelos digitales permiten realizar simulaciones previas a la construcción de un sistema físico, posibilitando la predicción y comprensión de su funcionamiento. Gracias a esta capacidad, resulta posible anticipar errores, aprovechar al máximo los recursos y reducir costos asociados

al diseño y desarrollo. Asimismo, facilitan una gestión eficiente durante todo el ciclo de vida de un producto o proceso, desde su concepción hasta su implementación y eventual desmantelamiento, garantizando una toma de decisiones fundamentada. De esta manera, se incrementa la precisión en la planificación y ejecución de proyectos tecnológicos.

En segundo lugar, la integración de sensores en los sistemas físicos posibilita el recojo de datos en tiempo real, proporcionando información fundamental respecto a su estado y desempeño. En consecuencia, este flujo continuo de datos actualiza el gemelo digital de manera dinámica, mejorando con ello la supervisión y el manejo de los procesos. Estos modelos digitales ayudan en la toma de decisiones estratégicas y optimizan los sistemas en distintos sectores. Como resultado, se consigue una mayor eficiencia operativa y una respuesta más ágil ante eventos inesperados.

En tercer lugar, el análisis de datos en tiempo real permite anticipar cambios en el funcionamiento de un sistema y detectar posibles fallos antes de que afecten su rendimiento. Mediante algoritmos de aprendizaje automático, los gemelos digitales son capaces de anticipar variaciones en las condiciones operativas y ajustar automáticamente su respuesta. Esta capacidad de adaptación no solo mejora la eficiencia y la confiabilidad del sistema, sino que también reduce los tiempos de inactividad y mejora la sostenibilidad de los procesos en el largo plazo. Adicionalmente, esto fomenta una mayor innovación en la automatización de procesos industriales y tecnológicos.

1.3.2. Aplicaciones de los gemelos digitales en sistemas fotovoltaicos

Durante la última década, la expansión y perfeccionamiento de los sistemas de suministro eléctrico se llevan a cabo de manera integral, incorporando nuevas tecnologías dentro del marco de la denominada Industria 4.0, lo que ha permitido el desarrollo de soluciones avanzadas para la eficiencia y sostenibilidad del sector. Dentro de este escenario, una de las innovaciones que ha adquirido mayor relevancia es la tecnología de gemelos digitales, la cual permite mejorar el desempeño, la gestión y el seguimiento en tiempo real de los sistemas energéticos (Álvarez *et al.*, 2023).

Estos modelos digitales representan una herramienta clave para la transición de un sistema energético dependiente de combustibles fósiles a uno alimentado por fuentes renovables. Debido a que este cambio implica múltiples desafíos, resulta primordial contar con soluciones precisas e innovadoras. En este sentido, los gemelos digitales contribuyen a racionalizar la eficiencia energética, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y asegurar un abastecimiento eléctrico constante. Igualmente, facilitan la identificación de oportunidades de inversión en infraestructura y refuerzan la resiliencia del sistema eléctrico (Ghenai *et al.*, 2022).

El efecto fotovoltaico, fundamento del funcionamiento de los paneles solares, permite transformar la energía solar en electricidad de corriente continua, que luego se convierte en corriente alterna antes de ser integrada a la red de baja tensión. En los últimos años, el uso de baterías eléctricas ha cobrado mayor importancia, pues posibilitan el almacenamiento de energía para su consumo en momentos estratégicos, generando tanto beneficios económicos, debido a la variabilidad de las tarifas eléctricas, como de eficiencia energética, al adaptarse a los patrones de consumo de los usuarios. Por ello, gestionar de manera óptima la energía fotovoltaica se ha tornado en un aspecto elemental dentro del sector eléctrico (Castellano *et al.*, 2024).

Así, el papel de los gemelos digitales es fundamental para maximizar la confiabilidad, la eficiencia y la rentabilidad de los sistemas eléctricos. Además, su integración con simuladores digitales resulta clave, ya que estos permiten modelar la red eléctrica de forma virtual, posibilitando la evaluación y validación de las estrategias adoptadas en un entorno seguro. A partir de estas simulaciones, se evidencia cómo los prosumidores pueden gestionar el intercambio de energía de manera eficiente, reduciendo costos asociados a la dependencia de la red principal y demostrando la viabilidad de las decisiones optimizadas por el gemelo (Álvarez *et al.*, 2023).

1.4. Implementación del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos

El mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos ha llegado a ser una estrategia crucial para maximizar el rendimiento y prolongar la vida útil de estos sistemas. A diferencia de otros enfoques tradicionales, con esta metodología se pueden anticipar posibles fallas por medio del procesamiento de datos en tiempo real, facilitando una mejor gestión de los recursos energéticos. Como resultado, las empresas del sector han logrado reducir costos operativos y mejorar la disponibilidad de sus instalaciones (Quiñonez & Trujillo, 2024).

En la actualidad, la adopción de sensores inteligentes y plataformas de monitoreo ha facilitado la supervisión continua del estado de los componentes fotovoltaicos. A través del uso de algoritmos de aprendizaje automático, es posible identificar patrones de comportamiento anómalos y tomar decisiones basadas en evidencia. Asimismo, el análisis de datos históricos contribuye a la detección temprana de factores que podrían afectar el desempeño del sistema. De esta manera, se potencia el uso de la energía solar y se garantiza una producción más estable a lo largo del tiempo (Almarza *et al.*, 2016).

Por otro lado, la integración del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos representa una oportunidad para incrementar la sostenibilidad en la generación de energía renovable. Al minimizar intervenciones correctivas innecesarias, se reduce el impacto ambiental asociado con la reposición prematura de componentes. Adicionalmente, la optimización de la eficiencia energética contribuye a una mayor rentabilidad para los operadores de plantas solares. En consecuencia, la implementación de este enfoque es ventajoso tanto en términos económicos como medioambientales. Asimismo, esta estrategia fomenta una transición energética más responsable y alineada con los objetivos de desarrollo sostenible (Sandoval-Ruiz, 2024).

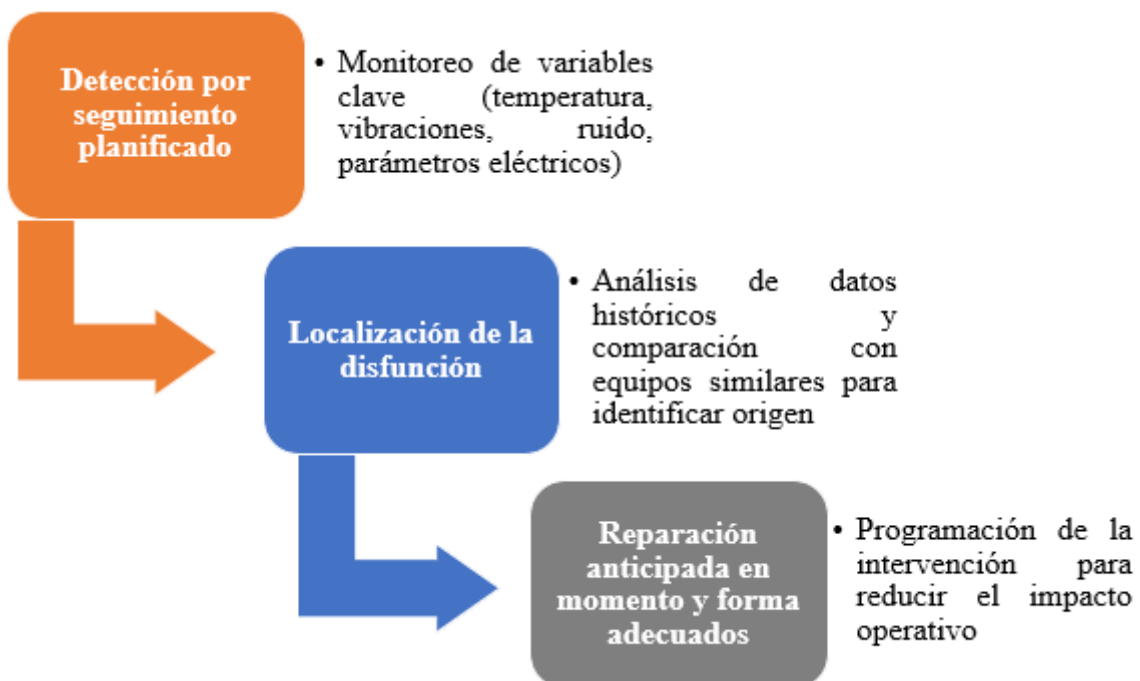
En última instancia, el crecimiento de la industria fotovoltaica exige la incorporación de soluciones innovadoras que mejoren la fiabilidad de los sistemas. En este contexto, el mantenimiento predictivo se presenta como una herramienta fundamental para garantizar la continuidad del suministro energé-

tico. La combinación de tecnologías emergentes con estrategias de monitoreo avanzado facilita un mayor control sobre el desempeño de las instalaciones. Por ello, su implementación coadyuva a la consolidación de un modelo energético más resiliente y adaptado a las demandas del futuro (Almarza *et al.*, 2016).

1.4.1. Proceso del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos

Conforme a Sancho *et al.* (2023), el mantenimiento de los equipos tiene como finalidad evitar fallos que puedan comprometer su funcionamiento. En ese sentido, el mantenimiento predictivo se distingue por no intervenir directamente en los componentes, sino por analizar distintas variables físicas, mecánicas o eléctricas con el propósito de reconocer posibles fallas previo a que ocurran. Mediante este enfoque, se pueden detectar anomalías y tomar medidas con antelación para evitar daños mayores. Este proceso se estructura en tres fases.

Figura 1. Fases del mantenimiento predictivo



Nota. Adaptado de Sancho (2023) .

De esta manera, por medio del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos se puede anticipar fallos mediante un enfoque estructurado y

tecnológico. A través de la detección temprana, localización precisa de disfunciones y reparación planificada, se optimiza la operatividad del sistema, se minimizan las interrupciones y se reducen los costos asociados a fallas imprevistas. Además, contribuye a extender la vida útil de los equipos y mejora la eficiencia energética. Su correcta implementación requiere una estrategia basada en datos y personal capacitado. En conjunto, representa una solución eficaz para garantizar el rendimiento sostenible de la infraestructura fotovoltaica (Sancho, 2023).

1.4.2. Tecnologías para el mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos

Según Laisequilla (2025), el mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos se apoya en tecnologías avanzadas con las que se recopila información sobre el estado de los equipos y analizarla en tiempo real. Estas permiten supervisar continuamente el rendimiento de los componentes y detectar fallas potenciales, mejorando con ello la eficiencia operativa, reduciendo gastos de mantenimiento y prolongando la vida útil de los sistemas. Algunas de estas herramientas son las siguientes:

1.4.2.1. Sensores Iot. El uso de sensores inteligentes basados en el Internet de las cosas (IoT) está dirigido a monitorear continuamente el estado de los equipos. Estos dispositivos capturan datos en tiempo real de variables cruciales como temperatura, vibración, presión y velocidad. La información obtenida es enviada a un sistema centralizado donde se analiza para detectar posibles anomalías. Gracias a esta supervisión constante, se pueden identificar patrones inusuales que podrían indicar el inicio de una falla, lo que facilita adoptar medidas preventivas previo a que afecten el rendimiento del sistema.

1.4.2.2. Análisis de datos y *big data*. Fundamental en el mantenimiento predictivo, pues permite procesar grandes volúmenes de información recopilada por los sensores. Mediante herramientas de *big data*, se identifican patrones en el comportamiento de los equipos, facilitando la predicción de posibles fallas. Este enfoque ayuda a reducir intervenciones innecesarias y optimiza la toma de decisiones, ya que permite actuar con base en datos concretos. Como

resultado, las operaciones de los sistemas fotovoltaicos se vuelven más eficientes y confiables, minimizando riesgos y reforzando la continuidad del suministro energético.

1.4.2.3. Inteligencia artificial (IA) y *machine learning* (ML). Desempeñan un papel clave en la mejora del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos. Los algoritmos de IA analizan datos históricos y aprenden de las condiciones operativas de los equipos, ajustando sus predicciones con el tiempo para aumentar su precisión. Esta capacidad de autoaprendizaje permite una detección temprana más eficaz de posibles fallos, reduciendo la incidencia de errores y optimizando los recursos de mantenimiento. De esta manera, la combinación de IA y mantenimiento predictivo garantiza una mayor estabilidad y eficiencia en la generación de energía solar.

1.5. Impacto y futuro del mantenimiento predictivo en energía fotovoltaica

Conforme a Zarco (2023), el crecimiento acelerado de la energía fotovoltaica a nivel global representa una oportunidad clave en la transición energética, aunque también plantea grandes retos en su mantenimiento. A partir del 2030, se estima que se incorporarán anualmente entre 300 y 500 GW de nueva capacidad solar, alcanzando un total de 9,5 TW para mediados de siglo. En este contexto, el mantenimiento de plantas a gran escala resulta fundamental para garantizar su eficiencia operativa y sostenibilidad financiera.

Por otra parte, el mantenimiento en plantas solares ha experimentado una evolución significativa, pasando de estrategias correctivas centradas en la reparación tras una falla, a enfoques preventivos basados en inspecciones periódicas. No obstante, el autor señala que el mantenimiento predictivo ha surgido como la alternativa más eficiente, pues posibilita anticiparse a los problemas antes de que ocurran. Por medio del uso de datos operacionales avanzados y algoritmos inteligentes, este método permite detectar posibles fallos, mejorando los tiempos de intervención y reduciendo costos. Sin embargo, a pesar del creciente interés en la profesionalización de las prácticas de mantenimiento, su implementación aún enfrenta retos importantes (Zarco, 2023).

En ese sentido, para que el mantenimiento predictivo logre una máxima efectividad, es imprescindible disponer de datos precisos y estructurados sobre el rendimiento de las plantas solares. Según Zarco (2023), la generación de energía, el estado de los componentes y los registros de mantenimiento son componentes elementales en la elaboración de modelos de aprendizaje automático. No obstante, la calidad de estos registros varía considerablemente entre instalaciones, lo que dificulta la creación de sistemas predictivos confiables. Ante esta problemática, se están impulsando estándares unificados que buscan mejorar tanto la recopilación como el análisis de información.

Finalmente, iniciativas como el proyecto industrial conjunto (JIP, por sus siglas en inglés), liderado por expertos del sector, buscan establecer un marco común para la documentación del mantenimiento en plantas solares. La implementación de registros estandarizados y el desarrollo de modelos predictivos avanzados contribuirán a minimizar tiempos de inactividad, facilitar la toma de decisiones y mejorar la rentabilidad de los proyectos fotovoltaicos. Con la creciente demanda de energías renovables, esta metodología se perfila como un pilar esencial para garantizar la sostenibilidad del sector (Zarco, 2023).

1.5.1. Ventajas y beneficios del mantenimiento predictivo en sistemas fotovoltaicos

De acuerdo a Laisequilla (2025), con la implementación del mantenimiento predictivo en plantas solares se potencia la eficiencia operativa y se disminuyen costos. Esta metodología mejora la gestión de recursos, asegurando un rendimiento óptimo de los paneles fotovoltaicos. A continuación, se detallan sus principales ventajas y su impacto en la industria energética.

1.5.1.1. Reducción de tiempos inactivos no planificados. Anticipar fallos con antelación reduce la posibilidad de que ocurran interrupciones imprevistas en la producción. Al programar intervenciones sin afectar el flujo de trabajo, se mejora la planificación operativa y se evitan posibles pérdidas económicas por tiempos muertos.

1.5.1.2. Optimización en costos de mantenimiento. Identificar y enfrentar fallos antes de que se agraven evita gastos elevados en reparaciones

de emergencia. Además, disminuye el reemplazo prematuro de componentes, maximizando el uso de materiales. Por ello, con un mantenimiento eficiente se reducen costos operativos a largo plazo.

1.5.1.3. Incremento de vida útil de los equipos. Detectar y corregir problemas a tiempo previene el desgaste acelerado de la maquinaria industrial. De ese modo, se extiende su funcionamiento óptimo y se disminuye la frecuencia de reemplazo. La inversión en tecnología predictiva garantiza un mejor rendimiento y mayor rentabilidad.

1.5.1.4. Mejora de calidad productiva. Un funcionamiento eficiente de los equipos garantiza estabilidad en los procesos productivos. Esto evita defectos en los productos finales y mejora los estándares de fabricación. Como resultado, se incrementa la satisfacción del cliente y la competitividad del mercado.

1.5.1.5. Reducción en riesgos de lesiones y accidentes. Prevenir fallos críticos en la maquinaria disminuye situaciones peligrosas para los operarios. Con ello se consigue un entorno laboral más seguro y se reducen los accidentes e imprevistos. La implementación de estrategias predictivas refuerza el cumplimiento de normativas de seguridad.

1.5.1.6. Mejora de la sostenibilidad operacional. El mantenimiento predictivo promueve un uso eficiente de materiales y energía en las operaciones, lo cual ayuda a reducir el impacto ambiental y el desperdicio de recursos naturales. A largo plazo, las empresas mejoran así su responsabilidad ecológica y su sostenibilidad corporativa.

1.5.2. Innovaciones y desafíos en sistemas fotovoltaicos

Conforme a Barrero (2025), los sistemas fotovoltaicos han experimentado un avance notable en los últimos años, y su adopción a escala global se sigue impulsando gracias a la actual innovación tecnológica. Sin embargo, también enfrentan ciertos desafíos que deben ser superados para lograr una implementación más eficiente y sostenible. A continuación, se destacan algunas de las innovaciones y desafíos más importantes en este campo.

1.5.2.1. Fotovoltaica integrada en edificios. Se refiere a la incorporación de módulos solares directamente en la arquitectura de los edificios, como, por ejemplo, en techos y fachadas. Con esta tecnología se genera energía renovable sin comprometer el diseño o la estética. No obstante, su alto costo inicial y optimización en espacios limitados siguen siendo desafíos importantes.

Figura 2. *Energía fotovoltaica en edificios*



Nota. Tomado de Freepik (2025a)

1.5.2.2. Sistemas de predicción de energía renovable. Basados en IA y *big data*, permiten prever la producción solar en función de las condiciones climáticas. Esto facilita la inclusión de la energía solar en las redes eléctricas. El desafío radica en la necesidad de datos de alta calidad y la constante actualización de los modelos.

1.5.2.3. OyM (operación y mantenimiento). Incluye el uso de drones para inspección, sistemas automatizados de limpieza y monitoreo remoto. Estos avances mejoran la eficiencia y reducen costos, pero su implementación en áreas remotas o de difícil acceso puede incrementar los costos y la complejidad operativa.

1.5.2.4. Reciclaje de paneles. Se centra en mejorar la recuperación de materiales valiosos como silicio y vidrio. El principal desafío es crear un sistema económico y escalable para el reciclaje, ya que las tecnologías actuales son costosas y no están lo suficientemente desarrolladas para manejar grandes volúmenes de paneles obsoletos.

1.5.2.5. Fotovoltaica flotante. Consiste en instalar paneles solares sobre cuerpos de agua, como lagos o embalses, sin ocupar terreno. Esta tecnología tiene el beneficio de mantener los paneles a una temperatura más baja, con lo cual se mejora su rendimiento. No obstante, enfrenta desafíos en la durabilidad de los materiales y la complejidad de la instalación y mantenimiento en entornos acuáticos.

Así, estas innovaciones reflejan el dinamismo del sector fotovoltaico y su potencial para transformar el panorama energético. A medida que la tecnología avanza, se abren nuevas posibilidades para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia. El compromiso con la investigación y la adaptación será clave en los próximos años (Barrero, 2025).

CAPÍTULO II

ASPECTOS ESENCIALES DE LA SMART FACTORY

El concepto de *smart factory* (fábrica inteligente) ha ganado relevancia dentro del contexto de la Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0), acelerada por el progreso de tecnologías como la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las cosas (IoT). Las fábricas inteligentes se caracterizan por la integración de sistemas automatizados conectados y capaces de tomar decisiones en tiempo real, lo cual optimiza los procesos productivos. La digitalización de las plantas de producción facilita una mayor versatilidad, eficiencia y adaptabilidad a los cambios del mercado, aspectos esenciales para competir en un entorno industrial cada vez más dinámico.

Uno de los elementos clave en la implementación de *smart factories* son los sistemas de automatización y control, que permiten la interconexión de dispositivos y equipos a través de plataformas digitales. En este contexto, la Industria 4.0 introduce una nueva forma de gestionar la producción a partir del uso de datos masivos generados por sensores y dispositivos inteligentes. Así, se dinamizan los procesos y la toma de decisiones, reduciendo tiempos de inactividad y mejorando la calidad del producto final, mientras que mejora en la eficiencia operativa.

Por otro lado, mediante el enfoque de madurez digital se puede evaluar el grado de desarrollo y adopción de tecnologías en las fábricas inteligentes. Este modelo es fundamental para identificar las áreas de mejora y definir una ruta estratégica hacia la digitalización plena. Los niveles de madurez digital proporcionan una guía para implementar cambios progresivos, partiendo de un estado inicial hasta alcanzar la optimización total de los procesos productivos. Así, cada nivel permite evaluar la integración de tecnologías emergentes y su influencia en la productividad y rendimiento de la planta.

Finalmente, la aplicación de las *smart factories* no se limita a la industria manufacturera, sino que se extiende a sectores como la producción

fotovoltaica. La automatización y digitalización en la fabricación de sistemas fotovoltaicos han transformado la forma en que se gestionan los procesos de producción y montaje, mejorando la calidad y reduciendo los costos. No obstante, este avance trae consigo ciertos desafíos, como la necesidad de inversión en infraestructura tecnológica y la capacitación continua de los operarios, lo que requiere un enfoque integral para maximizar los beneficios y mitigar los riesgos asociados.

2.1. Nociones generales de la smart factory

La smart factory es un modelo de fabricación avanzado que integra tecnologías digitales como la IA, el IoT, el big data y la automatización para maximizar la producción. Representa la etapa culminante de la Cuarta Revolución Industrial, y se ha consolidado como una estrategia clave para potenciar la productividad, la calidad y la flexibilidad en un entorno altamente competitivo. Mediante este modelo, la producción se gestiona de manera autónoma, lo que facilita la obtención de diagnósticos remotos y la predicción de condiciones operativas futuras. Este enfoque engloba todo el ciclo de vida del producto, desde su concepción y fabricación hasta la distribución y eliminación (Jung et al., 2021).

Dado el carácter hiperdinámico de la manufactura moderna, tanto la automatización como la optimización continua se han vuelto imprescindibles. En este contexto, la *smart factory* mejora el empleo de la mano de obra y los recursos de producción a través de la integración de inteligencia artificial en todos los procesos. Esto reduce los tiempos de inactividad, mejora la precisión en la producción y minimiza los costos operativos, garantizando una mayor eficiencia en la gestión industrial. Asimismo, la interconexión de los sistemas de producción facilita la detección de anomalías en tiempo real, potenciando la determinación de decisiones (Milošević et al., 2020).

Paralelamente, desafíos como la disminución del consumo energético y la fabricación ecológica han cobrado relevancia global. A partir de ello, las investigaciones se han centrado en mejorar la eficiencia energética, incorporar criterios ecológicos en la producción y diseñar sensores para evaluar el impacto

ambiental. No obstante, la mayoría se enfoca en medir el consumo energético y la contaminación, sin abordar estrategias más integrales. Por eso, es crucial implementar modelos de producción sostenibles que armonicen rentabilidad y responsabilidad ambiental (Jung *et al.*, 2021).

Así, la smart factory busca soluciones óptimas para la preparación de la producción y la prevención de errores antes de que ocurran. Basada en la manufactura en la nube, emplea servicios inteligentes potenciados por IA. Entre sus herramientas destacan algoritmos de búsqueda y metaheurísticas inspiradas en la naturaleza, cuya implementación ha crecido significativamente en los últimos años. A medida que estas tecnologías avanzan, su adopción se expande a sectores industriales diversos, promoviendo la competitividad global (Milošević *et al.*, 2020).

2.1.1. Elementos de la smart factory

De acuerdo con Jung *et al.*, (2021), el concepto de fábrica inteligente implica aplicar un método adecuado en términos de costo y escala para adaptarlo a la situación en la que se utiliza la tecnología. Su objetivo es llegar a construir una fábrica inteligente con funciones esenciales, pero fácil de operar y de bajo costo. Estos son algunos de sus elementos.

Tabla 2. Elementos de una fábrica inteligente

Elemento	Descripción
Esenciales	Se refiere a la elección de tecnologías adecuadas a las funciones que la empresa necesita. Incluir especificaciones innecesarias puede generar sistemas más costosos. Por ejemplo, no se requiere una computadora de alto rendimiento para datos simples. En su lugar, se pueden usar microcontroladores como Arduino o Raspberry Pi.
Asequibles	La implementación tecnológica debe ser económicamente viable. Las empresas deben considerar si pueden asumir la inversión sin afectar su sostenibilidad. Una mala planificación puede generar bajo retorno sobre la inversión (ROI). Por ello, se busca que las inversiones sean rentables a largo plazo.
Simples	Las soluciones tecnológicas deben ser fáciles de instalar, operar y mantener. Si requieren expertos o infraestructura adicional, los costos se incrementan. Por eso, es clave que el sistema sea comprensible por el personal disponible. Así, se garantiza eficiencia sin gastos innecesarios.

Interoperables

La tecnología debe funcionar con diferentes *hardwares*, sistemas operativos y estándares. Esto evita crear sistemas separados que aumenten los costos. La interoperabilidad permite una integración más eficiente con los recursos existentes. Es fundamental para mantener el rendimiento y reducir gastos.

Nota. Adaptado de Jung *et al.* (2021) .

En resumen, una fábrica inteligente debe integrar tecnología que, además de funcional, sea accesible, sencilla y compatible con distintos sistemas, lo que optimiza los procesos productivos y asegura la sostenibilidad financiera. En este punto, la adecuada selección de herramientas facilita un uso más eficiente de los recursos disponibles, reduce los costos innecesarios y evita complicaciones técnicas. Por consiguiente, una planificación estratégica bien estructurada resulta clave para lograr una implementación exitosa y sostenible (Jung *et al.*, 2021).

2.1.2. Smart Factory en la industria 4.0

En los últimos años, el concepto *Industria 4.0*, también denominado Cuarta Revolución Industrial, ha generado un gran interés tanto en el plano académico como en el campo profesional. Esta propuesta aparece a partir de la introducción de nuevas tecnologías que inciden en una amplia gama de procesos, como la producción, la eficiencia, la gestión de datos, la relación con los consumidores y la competitividad en las empresas, lo que las impulsa a adaptarse a un entorno digitalizado y automatizado. En ese contexto, el impacto de la Industria 4.0 es profundo, debido a que está destinado a transformar la forma en que las empresas gestionan su producción y servicios (Grabowska, 2020).

Dentro de la Industria 4.0, una de las principales innovaciones la constituye la *smart factory*, que representa un sistema de fabricación totalmente interconectado. En este modelo, las fábricas operan con mínima participación humana, creando, transfiriendo y manejando los datos necesarios para realizar todas las actividades de producción. De esta manera, la automatización mejora la eficiencia y precisión de los procesos, transformando las fábricas en entornos altamente autónomos y, sobre todo, adaptativos (Osterrieder *et al.*, 2020).

La producción global ha tenido así un impacto significativo y duradero desde la transición de la fabricación tradicional a la inteligente. La Industria 4.0 busca reducir los ciclos de vida de los productos y permitir una personalización masiva de manera rentable. Para ello, la *smart factory* integra tecnologías físicas y cibernéticas para maximizar los procesos de fabricación en términos de rendimiento, calidad, control y transparencia. No obstante, a pesar de sus ventajas, muchas empresas aún enfrentan desafíos relacionados con los recursos y el conocimiento necesarios para implementar estas tecnologías de manera efectiva (Shi *et al.*, 2020).

De este modo, la Industria 4.0 —con sus potentes tecnologías emergentes— está redefiniendo el panorama industrial. En consecuencia, las empresas se ven presionadas para potenciar su celeridad y adaptarse a las crecientes demandas de producción personalizada y modular. En este marco, la *smart factory* asume un rol relevante, ya que integra procesos interconectados a través de sistemas ciberfísicos, el Internet de las cosas y las tecnologías digitales avanzadas. Esta convergencia de tecnologías promete transformar la producción y, a la vez, mejorar la competitividad y sostenibilidad de las industrias a largo plazo (Ryalat *et al.*, 2023).

2.2. Metodología y niveles de la *smart factory*

La implementación de una *smart factory* requiere de una metodología estructurada que guíe la transformación digital de los procesos industriales. Por otro lado, la evolución de una *smart factory* se mide a través de niveles de madurez digital que reflejan su grado de conectividad, análisis de datos y capacidad de adaptación. Estos niveles van desde la simple digitalización hasta la autonomía absoluta en la determinación de decisiones, optimizando la eficiencia y competitividad en la industria (Magnus, 2023).

2.2.1. Metodología para la planificación de *smart factory*

Conforme a Resman *et al.* (2021), para aumentar la competitividad en la producción, las fábricas modernas deben diseñarse siguiendo los principios de las *smart factories*. Para ello, se deben considerar las necesidades de diversos

actores del sector industrial, quienes colaboran en proyectos orientados a la transformación digital y la mejora de los procesos de manufactura. Este enfoque se estructura en ocho pasos clave para garantizar una integración eficiente de las tecnologías avanzadas:

1. Talleres en la empresa. Consiste en definir si se transformarán los procesos y sistemas de producción existentes o si se construirá una *smart factory* desde cero. Para ello, se realizan talleres en grupos pequeños de empleados, que luego se integran en un grupo mayor. Este proceso permite determinar el tipo y nivel de cambios deseados, el modelo de producción, las especificaciones de los productos y la cantidad de producción, facilitando la transición hacia la digitalización.

2. Explicación de términos asociados a I4.0. Implica la definición precisa de los términos relacionados con la Industria 4.0 (I4.0), que son fundamentales para su implementación. Es crucial que todos los involucrados, tanto expertos como clientes, compartan una comprensión común de estos conceptos. Entre otros se incluyen términos clave como *fábrica digital*, *gemelo digital*, *sistemas ciberfísicos*, *big data*, *inteligencia artificial* y otros, que abarcan tecnologías esenciales como la realidad aumentada, el IoT y la integración horizontal y vertical.

3. Competencias. Es necesario ajustar las competencias de los empleados, ya sea contratando personal cualificado o formando al existente. Estas competencias se enfocan en áreas como las tecnologías de la información, la electrónica y el procesamiento de datos. A medida que las tareas se automatizan, los empleados deben desarrollar habilidades sociales, personales y profesionales, como adaptabilidad, liderazgo y capacidad para tomar decisiones complejas y resolver problemas.

4. Grado de industrialización. Permite identificar las modificaciones requeridas para llegar al nivel de Industria 4.0. Esto se puede hacer a través de talleres o mediante cuestionarios que abordan nueve dimensiones de madurez, entre las cuales se encuentran la estrategia, el liderazgo y las operacionales. Al comprender el grado de industrialización, la empresa puede recibir asesora-

miento sobre las modificaciones que debe implementar para avanzar hacia la digitalización y optimización de sus procesos.

5. Conectividad inteligente. Se logra por medio de un modelo arquitectónico que interconecta las tecnologías clave de la Industria 4.0, como los gemelos digitales y los agentes digitales. Esto permite la visualización en tiempo real y el intercambio bidireccional de datos, lo que favorece la toma de decisiones y el control de los procesos. Los gemelos digitales, junto con los agentes digitales, facilitan la supervisión y ajustes de los procesos de producción. Además, el recojo de datos mediante sensores inteligentes permite identificar errores y solucionarlos automáticamente.

6. Gemelos digitales en diferentes capas. Estos pueden ser modelos de simulación, sombras digitales o, precisamente, gemelos digitales, que son los más avanzados al ofrecer actualizaciones automáticas y retroalimentación en tiempo real al sistema real. Los gemelos digitales se estructuran en distintos niveles: desde el gemelo digital del proceso local, pasando por el de la célula de producción, hasta el gemelo digital de la fábrica completa. Esta organización permite una respuesta rápida a problemas locales y globales, optimizando la eficiencia de los procesos productivos.

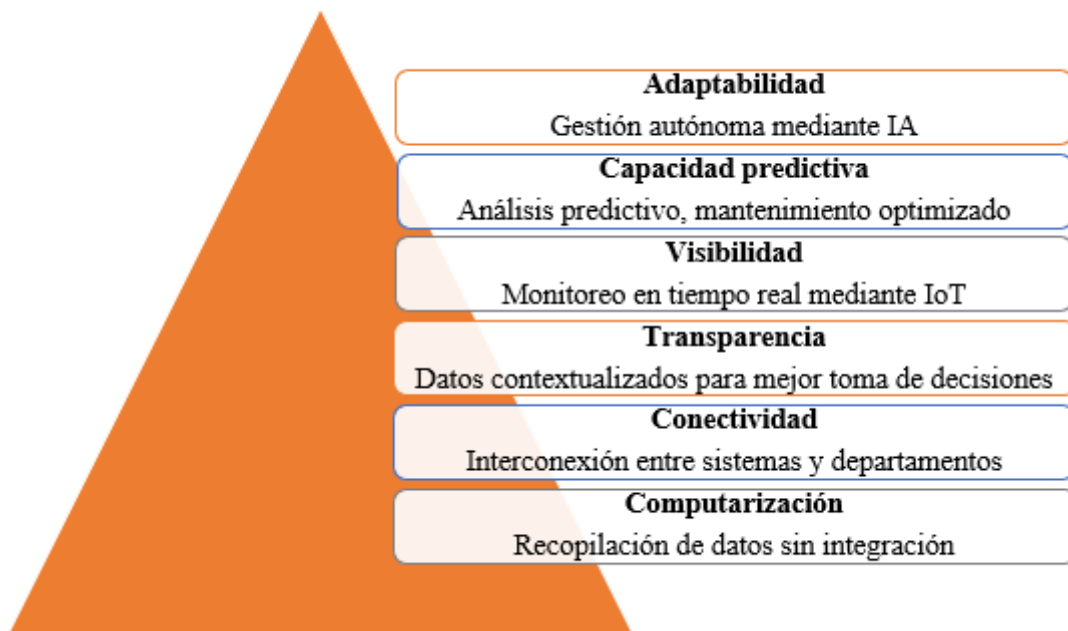
7. Visualización. Implica la actualización de gemelos digitales en entornos virtuales, facilitando la interacción mediante *softwares* de realidad virtual (VR) y realidad aumentada (AR). Mientras que la VR permite crear recorridos virtuales por la fábrica antes de su construcción y la manipulación de datos complejos, la AR mejora el desarrollo de productos, el mantenimiento y la formación de los empleados. Esta última agiliza la colaboración, hace posible identificar fallos en equipos y facilita la capacitación mediante clones virtuales, optimizando así los procesos en la producción.

8. Fábrica en el mundo real. Consiste en implementar la fábrica en un entorno real. Mediante varias iteraciones, se desarrolla un plan de producción óptimo, se identifican las tecnologías clave de la I4.0 y los enlaces de comunicación necesarios entre los sistemas. Como resultado, se obtiene una *smart factory* operativa plenamente conectada con su gemelo digital, con lo cual se asegura su funcionalidad en el mundo real.

2.2.2. Madurez digital en smart factory

De acuerdo con da Rocha *et al.* (2020), el rediseño de los sistemas de medición en las organizaciones es fundamental para reflejar su entorno y las estrategias, lo que facilita a los gerentes la identificación de las fortalezas y las debilidades. Al medir el índice de nivel de madurez, las organizaciones pueden obtener una visión general que funcione como un radar para anticiparse a problemas y mejorar su competitividad. El modelo Acatech Industrie 4.0 (AI4MI) + AHP ofrece una guía para la transformación empresarial que evalúa debilidades y otorga una base para la determinación estratégica de decisiones.

Figura 3. Niveles de madurez digital en smart factory



Nota. Adaptado de da Rocha (2020).

Así, los niveles de madurez digital representan una evolución progresiva hacia una mayor eficiencia y autonomía. Inicialmente, en la fase de computarización, se realiza la recopilación de datos, aunque sin integración, lo que marca el primer paso hacia la digitalización. Luego, con la conectividad, se logra una interconexión entre sistemas, lo cual facilita la coordinación de los procesos. A medida que se avanza hacia la transparencia y visibilidad, aumenta la capacidad de tomar decisiones informadas mediante datos contextualizados y monitoreo en tiempo real. Finalmente, la capacidad predictiva y la adaptabilidad

permiten anticipar fallos y gestionar las operaciones de forma autónoma. La implementación de estos niveles optimiza recursos y mejora la productividad y competitividad de las fábricas (da Rocha *et al.*, 2020).

2.3. Avances tecnológicos en I4.0 y *smart factories*

La transformación de la fabricación tradicional a la fabricación inteligente despierta un gran interés debido a su impacto profundo y duradero en el futuro de la producción mundial. En este contexto, la Industria 4.0 se concibió con el objetivo de impulsar la fabricación masiva de productos y el desarrollo de artículos personalizados para satisfacer las necesidades de los consumidores. De este modo, la *smart factory* integra tecnologías físicas y cibernéticas, lo que conlleva un incremento considerable de la complejidad y precisión de las tecnologías involucradas. Esto, a su vez, mejora la eficiencia, la calidad, el control, la administración y la claridad de los procesos de producción (Shi *et al.*, 2020).

2.3.1. IA e IoT en automatización y optimización de procesos

La automatización ha transformado significativamente los procesos de fabricación, pero la incorporación del IoT y la IA ha llevado estos procesos a un nivel avanzado. En tal sentido, las máquinas y los sistemas ciberfísicos se combinan con la automatización para favorecer la toma de decisiones complejas que anteriormente requerían intervención humana. Como resultado de esta evolución, se han integrado las decisiones operativas de las plantas con la cadena de suministro, dando lugar a lo que conocemos como las *smart factories* (Kalsoom *et al.*, 2020).

La implementación de estas tecnologías mejora la eficiencia, la calidad del producto y la sostenibilidad al integrar equipos industriales que se comunican entre sí y con los usuarios, lo que promueve una adaptación dinámica y maximiza la eficiencia operativa. De igual manera, esta interconexión permite una comunicación en tiempo real entre la planta y el mercado, lo que asegura una producción más ágil y alineada con las demandas del entorno, otorgando

una mayor flexibilidad en el ajuste de la producción según las necesidades del cliente (Sjödin *et al.*, 2018).

En suma, la revolución digital ha propiciado una transición de sistemas de fábrica centralizados a descentralizados, favoreciendo la autooptimización de las máquinas y su capacidad para adaptarse a las variaciones en los pedidos y las condiciones operativas. De acuerdo con ello, el núcleo de las *smart factories* radica en tecnologías como los sensores inteligentes y los sistemas robóticos, los cuales permiten una recopilación precisa de datos para optimizar los procesos de producción y garantizar una mayor eficiencia en tiempo real, lo que a su vez contribuye a una reducción de los costos operativos (Kalsoom *et al.*, 2020).

2.3.2. Tecnologías de detección en una smart factory

Conforme a Kalsoom *et al.*, (2020), las *smart factories* integran máquinas, dispositivos y equipos de control avanzados para la supervisión constante de parámetros esenciales en los procesos de fabricación. Estas innovaciones no solo han transformado la infraestructura de la fábrica, sino que han facilitado una interacción fluida y precisa entre las máquinas, mejorando la eficiencia operativa. Por otro lado, el incremento de la automatización ha elevado las exigencias en cuanto a la fiabilidad de los sensores utilizados, lo que ha generado una creciente demanda de tecnologías de medición precisas y robustas. Entre los más empleados en las *smart factories* se encuentran las siguientes:

2.3.2.1. Sensores pasivos. Operan sin necesidad de un estímulo externo, pues el estímulo físico ya está presente en el entorno. Estos sensores detectan señales naturales —como la radiación infrarroja emitida por objetos debido a su temperatura— sin requerir energía adicional para su activación. Un ejemplo son los sensores infrarrojos, que responden a la radiación térmica. Esta característica les permite ser más eficientes energéticamente, ya que no necesitan suministrar energía adicional para generar la señal. Los sensores pasivos son fundamentales en aplicaciones de monitoreo ambiental y control de procesos industriales, donde la precisión y la reactividad son claves.

2.3.2.2. Sensores activos. A diferencia de los pasivos, los sensores activos requieren un estímulo externo para funcionar —como la luz o una señal eléctrica— y poder captar datos relevantes. Un ejemplo claro son los sensores de identificación de colores, que necesitan luz visible para iluminar el objeto que van a detectar. Este tipo de sensores se utiliza principalmente en sistemas de visión artificial, donde la interacción directa con el entorno es esencial para el análisis y control de procesos. Los sensores activos proporcionan información precisa y detallada, aunque requieren mayor consumo energético para funcionar en comparación con los pasivos.

2.3.2.3. Sensores inteligentes. Este tipo de sensores han transformado los sensores tradicionales al integrar capacidades de cálculo complejo mediante el IoT y la informática. Son más pequeños, flexibles e incorporan algoritmos y acondicionamiento de señales, lo que les permite realizar funciones avanzadas como detección, análisis y comunicación en tiempo real. Gracias a su capacidad para transmitir datos digitales, pueden predecir escenarios y tomar decisiones correctivas instantáneamente. Permiten, asimismo, la combinación de información de múltiples dispositivos para identificar problemas, como la detección de fallas mecánicas, mediante la correlación de datos de temperatura y presión.

2.3.2.4. Sensores nucleares. Aunque valiosos en aplicaciones especializadas, son relativamente poco comunes debido a dos factores principales: su alto costo y las estrictas regulaciones de seguridad que rigen su uso. Estos sensores requieren de fuentes de radiación que, por su naturaleza, deben manejarse con sumo cuidado. Sin embargo, los avances tecnológicos recientes han permitido que las fuentes de radiación de bajo nivel sean más accesibles y seguras, lo que ha incrementado su disponibilidad para usos industriales y científicos. Estos sensores se emplean principalmente en aplicaciones que requieren medición precisa de radiación o análisis de materiales a nivel molecular. A pesar de sus ventajas en precisión y fiabilidad, su costo elevado y la complejidad de su manejo limitan su uso generalizado.

2.3.2.5. Microsensores. También conocidos como sensores MEMS por estar fabricados mediante tecnología de sistemas microelectromecánicos

(MEMS, por sus siglas en inglés), constituyen una parte fundamental de dichos sistemas. Diseñados con estructuras micromecanizadas que operan a escala microscópica, estos sensores convierten señales mecánicas en señales eléctricas. Su reducido tamaño, bajo consumo de energía y alta capacidad de integración los hacen ideales para aplicaciones en automatización, salud, energía y electrónica de consumo.

2.3.2.6. Nanosensores fabricados con tecnología NEMS. Representan el desarrollo más avanzado en tecnología de detección basada en los principios de la nanotecnología. Estos sensores, integrados en sistemas nanoelectromecánicos (NEMS, por sus siglas en inglés), son capaces de detectar variaciones a escalas extremadamente pequeñas, lo que les permite medir parámetros a nivel molecular. Además de funciones de detección, pueden incorporar nanoactuadores que posibilitan la manipulación precisa de materiales en la escala nanométrica. Gracias a su alta sensibilidad, los nanosensores se aplican en campos como el monitoreo ambiental, la biomedicina y la investigación de nuevos materiales. Su capacidad para interactuar con sistemas en escalas reducidas abre nuevas posibilidades en la detección temprana de enfermedades, el análisis celular y el desarrollo de dispositivos más inteligentes y autónomos.

2.4. Smart factory en la producción de sistemas fotovoltaicos

Las *smart factories* asumen un rol elemental dentro de la producción de sistemas fotovoltaicos al integrar tecnologías avanzadas para optimizar la productividad operativa y gestionar mejor los recursos. De esta manera, en las plantas fotovoltaicas, la automatización y el control preciso de los procesos minimizan los gastos y aumentan la calidad del producto, lo que se traduce en una mayor efectividad en la producción de energía solar. Este enfoque permite maximizar el rendimiento de las plantas de producción al adaptarse a las exigencias del mercado y a las necesidades energéticas del futuro (Urbano & Martínez, 2020).

En la producción fotovoltaica, las *smart factories* se benefician del uso de gemelos digitales que mapean los procesos de fabricación en modelos virtuales. Con esta tecnología se pueden simular y ajustar las operaciones en tiempo

real, mejorando los procesos de producción y reduciendo el tiempo de inactividad por mantenimiento. Gracias a estos avances, las plantas fotovoltaicas logran una mayor eficiencia en la producción de células y módulos solares, contribuyendo así a alcanzar una fabricación más ecológica y competitiva a nivel global (Sasidharan *et al.*, 2019).

Adicionalmente, la implementación de sistemas inteligentes de gestión energética, como las centrales eléctricas virtuales (VPP), constituye un componente relevante en las *smart factories* de fotovoltaica. Las VPP permiten gestionar de manera eficiente los recursos energéticos, incluyendo las instalaciones de generación solar y los sistemas de almacenamiento, lo que optimiza el uso de la energía dentro de la planta. Como consecuencia, no solo se consigue disminuir los costos operativos, sino que se mejora la sostenibilidad de la producción fotovoltaica y se logra una mejor integración con el mercado energético (Urbano & Martínez, 2020).

En conclusión, la transición hacia *smart factories* en la producción de sistemas fotovoltaicos requiere la modernización de los equipos de producción para que sean compatibles con las tecnologías de la denominada Industria 4.0. A medida que las fábricas fotovoltaicas incorporan tecnologías como la automatización avanzada y el análisis de datos, se incrementa la capacidad de adaptación a las demandas del mercado. Este proceso de actualización mejora la eficiencia y competitividad, a la vez que asegura la sostenibilidad de la producción fotovoltaica a largo plazo (Sasidharan *et al.*, 2019).

2.4.1. Digitalización en la producción fotovoltaica

De acuerdo con Sasidharan *et al.* (2019), la digitalización en la producción fotovoltaica está transformando los procesos tradicionales mediante la incorporación de tecnologías de vanguardia. En este contexto, la Industria 4.0 ha promovido un cambio significativo a través de la interconexión entre máquinas, sistemas y datos en tiempo real. La convergencia entre la tecnología de operaciones y la tecnología informática da lugar a una producción más eficiente y adaptable a las necesidades del mercado. En consecuencia, el sector fotovoltaico

co se beneficia de una mayor optimización en el uso de recursos, mejorando la rentabilidad y la sostenibilidad.

2.4.1.1. Integración de tecnologías avanzadas. La implementación del IoT, la IA y la robótica ha generado un ecosistema digital más avanzado. Asimismo, posibilitan la automatización de procesos, el monitoreo remoto y el análisis predictivo para mejorar la eficiencia de las plantas fotovoltaicas. Además, la integración de sistemas de control y planificación, como MES, ERP y SCADA, facilita la gestión de la producción en tiempo real. Como resultado, las empresas logran disminuir los costos operativos y elevar la calidad de los productos fotovoltaicos.

2.4.1.2. Rol del gemelo digital. Los gemelos digitales han cobrado gran relevancia en la producción fotovoltaica, ya que posibilitan la simulación de procesos antes de su implementación. Estos modelos virtuales replican el comportamiento de los activos físicos, con lo que se puede detectar fallos, ajustar parámetros y predecir el rendimiento de los sistemas. En consecuencia, las empresas pueden reducir el tiempo de inactividad y potenciar la productividad. Esta tecnología ya se emplea en sectores como el automotriz y de semiconductores, donde muestra su capacidad para optimizar la fabricación.

2.4.1.3. Optimización mediante el análisis de datos. La digitalización en la producción fotovoltaica abre nuevas oportunidades para la gestión inteligente de datos. La recolección y análisis de grandes volúmenes de información permiten la optimización de la cadena de producción, mejorando la trazabilidad y adaptabilidad de los sistemas. Igualmente, el uso de modelos analíticos y técnicas de autoaprendizaje favorece la toma de decisiones basada en datos, lo que incrementa la competitividad del sector. En definitiva, la digitalización no solo transforma la producción fotovoltaica, sino que también impulsa su eficiencia y sostenibilidad en el futuro.

2.4.2. Automatización en sistemas fotovoltaicos

Conforme a Sasidharan *et al.* (2019), la automatización en los sistemas fotovoltaicos ha revolucionado la producción de energía solar al integrar tecnologías avanzadas que maximizan la eficiencia y reducen costos opera-

tivos. A través de la interconexión de equipos, sensores y plataformas digitales, los procesos de fabricación y mantenimiento de paneles solares pueden gestionarse con mayor precisión. De la misma forma, la implementación de sistemas automatizados minimiza errores humanos y mejora la trazabilidad en cada etapa de producción. La automatización se convierte así en un pilar clave para la evolución y sostenibilidad de la industria fotovoltaica.

2.4.2.1. Automatización y control automatizado. Uno de los mayores beneficios de la automatización en sistemas fotovoltaicos es la interconectividad entre equipos, lo que permite un control preciso y en tiempo real de los procesos productivos. Sensores avanzados y sistemas de supervisión garantizan que cada componente del sistema funcione dentro de los parámetros óptimos, reduciendo pérdidas y mejorando la calidad de los productos. La automatización facilita, asimismo, la implementación de estándares de comunicación, posibilitando la integración de maquinaria de distintos fabricantes sin comprometer la eficiencia operativa.

2.4.2.2. Gemelos digitales y optimización de procesos. El uso de gemelos digitales en la automatización de sistemas fotovoltaicos ha permitido potenciar la gestión y el rendimiento de la producción. Estas representaciones virtuales de equipos y procesos capturan datos en tiempo real, facilitando el análisis y la predicción de fallos. Además, con la automatización basada en gemelos digitales se puede simular escenarios y optimizar parámetros antes de su aplicación en la producción real, asegurando una mayor eficiencia en la conversión de energía solar y una reducción en los costos de mantenimiento.

2.4.2.3. Autoaprendizaje y mejora continua. La integración de algoritmos de autoaprendizaje en la automatización de sistemas fotovoltaicos contribuye al mejoramiento continuo de los procesos. Por medio del análisis de grandes volúmenes de datos, las fábricas pueden detectar patrones de desempeño y realizar ajustes en tiempo real para maximizar la eficiencia energética. Del mismo modo, herramientas de visualización avanzadas, como CAD, facilitan la supervisión y toma de decisiones estratégicas. En ese sentido, la automatización mejora la productividad de los sistemas fotovoltaicos y, al mismo tiempo, impulsa su innovación y sostenibilidad a largo plazo.

2.5. Impacto y futuro de la *smart factory* en la generación fotovoltaica

De acuerdo con Renewable Energy (2025), en la evolución de la industria fotovoltaica, las *smart factories* han cobrado gran relevancia al incorporar tecnologías innovadoras para potenciar la eficiencia y sostenibilidad en la producción de sistemas fotovoltaicos. La automatización y digitalización de los procesos permiten optimizar los recursos, reducir costos y minimizar el impacto ambiental. Dentro de este marco, las empresas del sector buscan desarrollar soluciones avanzadas que garanticen una producción más eficiente y adaptable a las condiciones del mercado global.

En primer lugar, la implementación de tecnologías inteligentes en las *smart factories* fotovoltaicas permite mejorar el desempeño de los sistemas de generación solar. Innovaciones como los seguidores solares avanzados mejoran la captación de energía, pues se ajustan a diversas condiciones climáticas y topográficas. Estos avances no solo incrementan la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, sino que también reducen la necesidad de intervenciones manuales y contribuyen al mantenimiento de los equipos. Asimismo, el empleo de la IA facilita la detección temprana de fallos, mejorando la durabilidad y confiabilidad de los sistemas.

En segundo lugar, la adaptación de tecnologías a diferentes mercados fortalece la competitividad de las *smart factories* en la producción fotovoltaica. Empresas del sector han desarrollado soluciones que reducen tiempos y costos de instalación al integrar algoritmos avanzados que mejoran el rendimiento energético en distintas condiciones. Este enfoque permite que las fábricas inteligentes sean más flexibles y puedan operar de manera eficiente en entornos exigentes, garantizando una producción continua y de alta calidad. Además, la personalización de los sistemas según las necesidades locales contribuye a una mayor aceptación e inclusión de la energía solar en diversas regiones.

En tercer lugar, la expansión global y la diversificación de mercados han sido estrategias clave en la consolidación de las *smart factories* en la industria fotovoltaica. Su presencia en diferentes regiones favorece la mitigación de ries-

gos asociados a fluctuaciones económicas y regulaciones específicas. De esta manera, las fábricas inteligentes continúan evolucionando y adoptando nuevas tecnologías para fortalecer la producción de sistemas solares, contribuyendo así a un futuro energético más eficiente y sostenible. En este sentido, la inversión en investigación y desarrollo resulta fundamental para mantener la innovación y garantizar el liderazgo en el sector.

2.5.1. Tendencias y avances tecnológicos en sistemas fotovoltaicos

Según Sotema (2024), la industria de la energía solar ha evolucionado significativamente en los últimos años debido a progresos tecnológicos y transformaciones en las tendencias del mercado. La creciente demanda de soluciones energéticas sostenibles ha conducido al desarrollo de sistemas fotovoltaicos más eficientes y accesibles. En este contexto, la integración de tecnologías nuevas, la mejora en los procesos de almacenamiento de energía y la integración de sistemas inteligentes han sido factores clave para potenciar el uso de la energía solar. A continuación, se presentan tres aspectos fundamentales que están marcando el rumbo de esta industria:

1. Paneles solares de última generación. Son fundamentales para el futuro de la energía solar, ya que incorporan innovaciones que incrementan su eficiencia y desempeño para una mayor captura de energía incluso en condiciones complicadas. La utilización de materiales semiconductores avanzados, como las células fotovoltaicas de silicio monocristalino y policristalino, mejora esta eficiencia y optimiza el rendimiento a largo plazo. Gracias a las alianzas con fabricantes líderes, se puede acceder a estos avances que maximizan la producción de energía solar, lo cual promueve la sostenibilidad y la eficiencia energética.

2. Sistemas de almacenamiento de energía. Hacen posible capturar y guardar la sobreproducción de energía generada por los paneles solares en momentos de alta radiación. Esta energía almacenada se utiliza posteriormente cuando la demanda es mayor o las condiciones para generar energía solar no son favorables. Las baterías de iones de litio se han convertido en la opción preferida por su elevada densidad energética y prolongada vida útil. Estas so-

luciones avanzadas aseguran un suministro de energía constante y confiable, incluso durante espacios de baja radiación o picos de demanda. De esa forma, se maximiza el aprovechamiento del potencial de la energía solar.

3. Tecnologías emergentes. Están transformando el sector de la energía solar. La IA, el IoT y la robótica se están utilizando cada vez más para optimizar el desempeño de los sistemas fotovoltaicos, mejorar la gestión de la energía y reducir los costos operativos. Estas innovaciones, como los algoritmos avanzados para el seguimiento solar y los sistemas de monitoreo remoto en tiempo real, brindan soluciones solares más inteligentes, eficientes y rentables. Así, se logra un aprovechamiento más efectivo de la energía solar, impulsando la sostenibilidad y la reducción de costos.

2.5.2. Beneficios y desafíos en sistemas fotovoltaicos

De acuerdo con Gualoto y Mendoza (2024), los sistemas fotovoltaicos han ganado protagonismo en los últimos años como una alternativa viable y sostenible para la generación de energía. La reducción en los costos de las células fotovoltaicas y el aumento de su eficiencia han hecho que esta tecnología sea cada vez más accesible tanto para hogares como para empresas.

2.5.2.1. Beneficios. Uno de los beneficios primarios de los sistemas fotovoltaicos es la reducción de las emisiones de carbono, lo que contribuye al cuidado del medio ambiente. De igual forma, estos sistemas permiten la diversificación de la energía, disminuyendo la dependencia de fuentes no renovables. También ofrecen ventajas económicas al reducir el costo del uso de energía en los hogares y mejorar la capacidad de generación de energía localmente, lo que puede generar ahorros a largo plazo.

Figura 4. *Energía fotovoltaica en hogares*



Nota. Tomado de Freepik (2025a).

2.5.2.2. Desafíos. Pese a los beneficios, la puesta en marcha de sistemas fotovoltaicos presenta ciertos desafíos. Los altos costos iniciales y el mantenimiento pueden ser una barrera para adoptar estos sistemas, aunque en la mayor parte de los casos los beneficios a largo plazo compensan ampliamente esta inversión. En este punto, factores como la localización, el clima y la infraestructura existente son determinantes para valorar la factibilidad de emplearlos en un lugar específico.

Figura 5. *Mantenimiento de paneles solares*



Nota. Tomado de Freepik (2025b)

Considerando sus ventajas, los sistemas fotovoltaicos representan una solución tecnológica viable y prometedora para la generación de energía, con un efecto favorable tanto en la sostenibilidad ambiental como en la economía de los usuarios. No obstante, es fundamental tener en cuenta los factores mencionados al evaluar su implementación en diferentes contextos (Gualoto & Mendoza, 2024).

CAPÍTULO III

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Y SU IMPORTANCIA EN LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Los sistemas fotovoltaicos han emergido como una de las tecnologías más relevantes en el sector de las energías renovables al permitir la conversión de la energía solar en electricidad mediante paneles fotovoltaicos. Su adopción a escala global está motivada por la urgencia de encontrar energías disminuir las emisiones de carbono y aliviar los efectos del cambio climático. Por ello, comprender su funcionamiento y sus componentes resulta indispensable para aprovechar su potencial contra los problemas ambientales.

Para lograr un rendimiento óptimo, las instalaciones fotovoltaicas deben contar con un equipamiento adecuado y ser clasificadas según su aplicación, tamaño y modo de conexión a la red eléctrica. De hecho, existen diversos tipos de sistemas fotovoltaicos, que varían desde los más simples hasta los más complejos según las necesidades y condiciones de cada instalación. Esta diversidad permite integrar soluciones fotovoltaicas tanto en entornos residenciales como industriales, lo que facilita su incorporación a distintas escalas de generación de energía.

Además de la clasificación adaptativa, la tecnología de los módulos fotovoltaicos ha evolucionado considerablemente. Mientras que la primera generación —basada en silicio cristalino— ha sido predominante debido a su eficiencia, las generaciones posteriores, como los módulos de capa fina y las tecnologías emergentes, ofrecen alternativas más económicas y accesibles. Estas innovaciones aumentan la disponibilidad de la energía solar y permiten una mayor flexibilidad en su implementación, facilitando su adopción a nivel global.

Sin embargo, el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos no depende únicamente de la tecnología utilizada, sino también de factores ambientales

y operativos. Las condiciones climáticas, la orientación de los paneles y su mantenimiento son aspectos clave que influyen en su eficiencia. En consecuencia, el papel de la ingeniería se vuelve fundamental para optimizar estos sistemas y mejorar su integración en el marco de la transición energética. Así, la energía fotovoltaica contribuye a la reducción de emisiones, a la vez que favorece el desarrollo sostenible al ofrecer una fuente de energía limpia y accesible para todos.

3.1. Fundamentos básicos de los sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos representan una tecnología que transforma la energía solar en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Este fenómeno se basa en la interacción de la radiación solar con un material semiconductor dopado que genera un campo eléctrico dentro de la célula fotovoltaica. La energía de los fotones, que son partículas de luz, es transferida a los electrones del semiconductor, lo que permite que estos se liberen y circulen dentro del material produciendo una corriente eléctrica que es aprovechable (Gruezo-Valencia & Solis-Mora, 2022).

El rendimiento de estos sistemas depende de la intensidad de la radiación solar que incide sobre los paneles. Este factor está estrechamente relacionado con variables como la latitud, el momento del día y las condiciones climáticas, que afectan la cantidad de energía aprovechable. En términos generales, la irradiancia en la superficie terrestre es de aproximadamente 1000 W/m² en condiciones óptimas de radiación. En este punto, se debe mencionar que el desempeño de los sistemas fotovoltaicos se ve influenciado por la eficiencia del material utilizado y la correcta instalación de los paneles, que deben estar orientados y colocados de manera que maximicen la absorción de energía solar (Barberá, 2015).

En algunas regiones la irradiación solar media es considerablemente alta debido a su ubicación geográfica, lo que convierte al área en un lugar con un gran potencial para la generación de energía fotovoltaica. Una irradiancia promedio de entre 3 y 4 kWh/m²/día son condiciones que favorecen la implemen-

tación de tales sistemas. No obstante, es importante tener en cuenta que la inclinación y orientación de los paneles solares juegan un rol crucial en la captación de energía, por lo que se recomienda que se ubiquen en un ángulo que coincida con la latitud del lugar. Estos aspectos técnicos deben ser considerados en cualquier proyecto de instalación de energía solar para garantizar su eficiencia y rentabilidad (Gruezo-Valencia & Solis-Mora, 2022).

En este sentido, el desarrollo tecnológico en el ámbito de la energía fotovoltaica ha sido clave para la expansión y sostenibilidad de esta fuente de energía. Con el avance de los materiales y las técnicas de fabricación de los paneles solares, la eficiencia de estos sistemas ha mejorado notablemente, lo que contribuye a una mayor producción de electricidad a partir de la radiación solar. Este desarrollo ha sido fundamental para la generación de energía a nivel local y, al mismo tiempo, para impulsar el cambio hacia un modelo de transformación energética global que favorezca la sostenibilidad y la reducción de la dependencia de fuentes de energía no renovables (Barberá, 2015).

3.1.1. Instalaciones y equipamiento de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos requieren de varios componentes interrelacionados, como los paneles fotovoltaicos, las baterías, el regulador y el inversor solar, los que trabajan en conjunto para generar y gestionar la energía. Los módulos fotovoltaicos son responsables de captar la radiación solar y convertirla en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico, proceso donde la luz incide sobre ciertos materiales y libera electrones, creando así una corriente eléctrica. Este proceso se logra manipulando la luz de manera que sea capaz de liberar electrones de un material sólido para generar energía eléctrica (Gruezo-Valencia & Solis-Mora, 2022).

Los paneles fotovoltaicos se componen de células fotovoltaicas, y aunque existen diferentes materiales para su fabricación, el silicio es el más utilizado debido a su alta eficiencia y bajo costo. El rendimiento de estos paneles se mide mediante la relación entre la máxima potencia generada y la cantidad de radiación luminosa que reciben. Las baterías juegan aquí un papel preponderante al almacenar la energía generada, asegurando el suministro en momentos

en los que la radiación solar no está disponible, como durante la noche o en días nublados (Abou & Hossain, 2022).

Por otro lado, el regulador de carga desempeña una función primordial al graduar la intensidad y el voltaje de la energía generada por los paneles antes de que sea transferida a las baterías. Esto es básico para proteger la vida útil de las baterías durante los ciclos de carga y descarga. El inversor solar tiene en este caso un papel vital al cambiar la corriente continua generada por los paneles (o almacenada en las baterías) a corriente alterna, que es la forma adecuada para el consumo doméstico o para la conexión a la red eléctrica. Así, el inversor adapta la energía generada a las necesidades del usuario final y también facilita la interconexión con la red eléctrica (Gruezo-Valencia & Solis-Mora, 2022).

En conclusión, la generación fotovoltaica implica la obtención directa de electricidad a partir de la radiación solar mediante la disposición de paneles fotovoltaicos. Estos paneles, organizados en arreglos, permiten cubrir cargas específicas, y su potencia varía entre 80 y 200 vatios por panel. Las aplicaciones de esta tecnología son diversas, ya que pueden implementarse en grandes instalaciones conectadas a la red, en sistemas aislados o incluso en aplicaciones más particulares, como los satélites. La energía fotovoltaica se adapta de ese modo a diferentes necesidades energéticas, dependiendo el entorno y las condiciones específicas de cada instalación (Abou & Hossain, 2022).

3.1.2. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos

De acuerdo con Hassan (2021), los sistemas fotovoltaicos pueden agruparse en dos tipos según su conexión con la red eléctrica: los sistemas conectados a la red (*on-grid*) y los sistemas fuera de la red (*off-grid*). Cada uno tiene características particulares que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones y contextos. Mientras que los *on-grid* permiten la integración con la red eléctrica convencional, los *off-grid* funcionan de manera autónoma. A continuación, se detallan ambos sistemas:

Tabla 3. Características y ventajas de los sistemas on-grid y off-grid

Aspecto	Sistema <i>on-grid</i> (conectado a la red)	Sistema <i>off-grid</i> (fuera de la red)
Conexión	Conectado a la red eléctrica convencional	Independiente de la red eléctrica convencional
Funcionamiento	Funciona en sincronía con la red; inyecta excedentes de energía solar	Opera de manera autónoma; genera y almacena su propia energía
Almacenamiento de energía	No requiere baterías; la red actúa como “almacén virtual”	Requiere baterías u otro sistema de almacenamiento para asegurar el suministro continuo
Ubicación ideal	Zonas con acceso a la red eléctrica	Zonas remotas o sin acceso a la red
Costo inicial	Menor costo de instalación y mantenimiento	Mayor costo inicial por necesidad de baterías
Ventajas económicas	Posibilidad de obtener créditos o ingresos por excedentes de energía	A largo plazo, ofrece autosuficiencia energética
Confiabilidad	Depende de la estabilidad de la red eléctrica	Otorga suministro continuo sin depender de la red
Aplicación principal	Áreas urbanas o con buena infraestructura eléctrica	Áreas rurales aisladas o con problemas de conexión eléctrica

Nota. Adaptado de Hassan (2021) .

Como se aprecia, estos sistemas ofrecen ventajas y limitaciones. La elección entre uno u otro varía, por ejemplo, según aspectos como la posición geográfica, la disponibilidad de la red eléctrica o las necesidades energéticas específicas. Desde esa perspectiva, ambos contribuyen significativamente al uso eficiente de la energía solar, ofreciendo soluciones adaptadas a distintos contextos y necesidades (Hassan, 2021).

3.2. Tecnología de módulos fotovoltaicos

Conforme a González y Guerrero (2013), la evolución de las tecnologías fotovoltaicas ha dado lugar a diversas generaciones de células solares, cada una con características y niveles de eficiencia diferenciados. La primera generación destaca por su estabilidad y rendimiento. La segunda generación

introdujo tecnologías de capa fina, lo que redujo costos y mejoró la flexibilidad. Finalmente, la tercera generación incorpora innovaciones emergentes con el potencial de superar las limitaciones anteriores.

3.2.1. Primera generación (silicio cristalino)

Basada en silicio cristalino, ha sido la generación más utilizada por su alta eficiencia y estabilidad. Las células solares de primera generación aprovechan el silicio en su forma más pura, lo que les permite ofrecer un rendimiento óptimo durante un largo periodo de tiempo. Sin embargo, su producción suele ser más costosa en comparación con las tecnologías más recientes debido al proceso de fabricación y la pureza del material utilizado.

3.2.1.1. Monocristalinas. Estas células solares son conocidas por su alta eficiencia y longevidad, ya que están fabricadas a partir de un solo cristal de silicio. Este proceso de fabricación les posibilita alcanzar altos niveles de conversión de energía solar en electricidad, lo que las convierte en una opción perfecta para lugares con espacio reducido. A pesar de ser más caras que otras variantes, su rendimiento superior justifica la inversión en aplicaciones residenciales y comerciales de alta demanda energética.

3.2.1.2. Policristalinas. Están compuestas por varios cristales de silicio, lo que las hace menos costosas de producir en comparación con las monocristalinas. Aunque su eficiencia es ligeramente inferior, estas células solares siguen siendo una opción popular debido a su buen rendimiento y menor precio. Son ideales para proyectos a gran escala, donde la relación costo-beneficio es un factor crucial, como en instalaciones solares comerciales e industriales, donde son comunes.

3.2.1.3. Amorfos. A diferencia de las monocristalinas y policristalinas, no tienen una estructura cristalina definida, lo que les confiere mayor flexibilidad y capacidad de adaptarse a diversas superficies. Aunque su eficiencia es notablemente más baja, su costo de fabricación también es mucho menor. Esto las convierte en una opción atractiva para aplicaciones donde el presupuesto es limitado y el espacio para instalar paneles solares es amplio, como en dispositivos portátiles o en techos de gran extensión.

3.2.2. Segunda generación (capa fina - thin film)

Basadas en tecnologías de capa fina, esta generación de células solares ha permitido una significativa reducción de costos y una mayor flexibilidad en su aplicación. Se fabrican utilizando materiales semiconductores más delgados que las de silicio cristalino, lo que no solo hace posible una producción más económica, sino que también facilita su integración en una variedad de superficies y entornos.

3.2.2.1. Telururo de Cadmio (CdTe). Es uno de los materiales más comunes en la tecnología de capa fina por su reducido costo y su sencilla manufactura. Estas células solares ofrecen una eficiencia competitiva en comparación con otras tecnologías de capa fina, y su producción es relativamente barata. Además, el CdTe tiene la ventaja de ser abundante, lo que favorece su viabilidad para aplicaciones a gran escala, como en plantas solares de grandes dimensiones. No obstante, uno de los desafíos de estas células es su toxicidad, ya que el cadmio es un material peligroso para la salud.

3.2.2.2. Seleniuro de cobre, indio y galio (CIG, CIGS). Estas células se caracterizan por su gran eficacia en la conversión de energía solar, lo que las hace una opción prometedora dentro de las tecnologías de capa fina. El uso de estos materiales semiconductores permite un mayor rendimiento en comparación con el CdTe, aunque su costo de producción es un poco más elevado. Sin embargo, su versatilidad y eficiencia energética, junto con la posibilidad de integrarlas en aplicaciones de baja energía, las posicionan como una opción atractiva para proyectos solares residenciales y comerciales.

3.2.2.3. Arseniuro de galio (GaAs). Es un material semiconductor que, aun cuando es más caro, ofrece una eficiencia superior a muchas otras tecnologías fotovoltaicas, incluyendo las de capa fina. Su gran rendimiento en condiciones de baja irradiación y su capacidad para operar en un rango amplio de temperaturas lo hacen ideal para aplicaciones de alta demanda energética y en entornos difíciles. Por tal motivo, son comúnmente utilizadas en sectores de alta tecnología, como la industria aeroespacial.

3.2.2.4. Heterojunction with intrinsic thin layer (HIT). Mezcla las ventajas de las células solares de silicio con las que ofrecen las tecnologías de capa fina. En este caso, se utiliza una capa fina de material amorfo sobre el silicio cristalino para mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas energéticas. Con este diseño se obtienen células solares con mayor rendimiento y menor costo de fabricación, lo que las convierte en una opción eficiente para aplicaciones residenciales y comerciales. Además, presentan mayor estabilidad ante la degradación y mejores características de desempeño a largo plazo.

3.2.3. Tercera generación (tecnologías emergentes)

Está constituida por tecnologías emergentes que buscan superar las limitaciones de eficiencia y costos de las generaciones anteriores. Las innovaciones que presenta se centran en nuevos materiales y estructuras que optimizan la conversión de la energía solar, además de mejorar la flexibilidad y la sostenibilidad de los dispositivos. A medida que avanzan las investigaciones, estas tecnologías prometen revolucionar la industria solar con mayores rendimientos a costos más bajos.

3.2.3.1. Células fotovoltaicas de concentración. Aprovechan lentes o espejos para enfocar la luz solar sobre células solares de alta eficiencia, lo que les posibilita producir mayor cantidad de energía utilizando un área menor. Este enfoque mejora el rendimiento energético, especialmente en regiones con alta irradiación solar. No obstante, requieren un sistema de seguimiento solar para maximizar su eficiencia, lo que incrementa los costos y la complejidad de la instalación.

3.2.3.2. Células orgánicas. Están compuestas por materiales basados en carbono, como polímeros o pequeñas moléculas, lo que les permite ser más ligeras y flexibles en comparación con las tecnologías convencionales. A pesar de que su eficiencia aún es menor, estas células ofrecen considerables ventajas en términos de costos de producción y versatilidad en aplicaciones como dispositivos portátiles o superficies curvas. Es de destacar que la investigación continúa para mejorar su estabilidad y rendimiento, a fin de hacerlas competitivas a gran escala.

3.2.3.3. Células de perovskita. Estas han experimentado avances significativos en los últimos años debido a su alta eficiencia y bajo costo de fabricación. Utilizan materiales que adoptan la estructura cristalina de la perovskita, lo que permite una excelente absorción de la luz solar. Aunque su durabilidad y estabilidad aún se encuentran en fase de investigación, su potencial para transformar la industria fotovoltaica es notable, ya que podrían ofrecer altos rendimientos a precios competitivos.

3.2.3.4. Células híbridas. Combinan materiales de diferentes tipos, como silicio y perovskita, para aprovechar las ventajas de cada uno. Este enfoque permite mejorar la eficiencia de conversión de energía al utilizar los beneficios de materiales orgánicos y semiconductores convencionales en una sola célula. Las células híbridas tienen un gran potencial debido a que podrían ofrecer importantes rendimientos a un costo relativamente bajo. Son una de las tecnologías emergentes más prometedoras en el campo de la energía solar.

3.3. Factores que afectan el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos

De acuerdo con Martín y Fernández (2019), el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos está influenciado por diversos factores que afectan su eficiencia y vida útil. Entre los factores ambientales, la irradiancia y la temperatura son determinantes, ya que pueden modificar la capacidad de producción energética de los módulos. Igualmente, condiciones generales como la humedad y la presencia de polvo impactan en la eficiencia de los paneles. Por otro lado, los factores operativos, como el sombreado parcial y la acumulación de suciedad, también repercuten en la reducción del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos.

3.3.1. Factores ambientales

Desempeñan un rol vital en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos porque las condiciones externas afectan directamente la eficiencia de conversión de la energía solar. Entre estos factores, la irradiancia, la temperatura y el clima influyen de manera considerable en el funcionamiento de los paneles

solares. Estos elementos determinan la cantidad de energía que los módulos fotovoltaicos pueden generar y su durabilidad a largo plazo, lo que incide en el diseño y la ubicación de las instalaciones solares. Es esencial conocer estos factores para maximizar el desempeño y extender la durabilidad de los sistemas fotovoltaicos, lo que a fin de cuentas optimiza la eficiencia y minimiza los costos operativos.

3.3.1.1. Efecto de la irradiancia en los módulos. La irradiancia, o la intensidad de luz solar que llega a los módulos, tiene un efecto directo sobre la cantidad de energía que una instalación fotovoltaica puede generar. A medida que la irradiancia aumenta, los paneles solares son capaces de convertir más luz en electricidad, lo que mejora su eficiencia. Sin embargo, este efecto no es lineal, ya que la eficiencia de los módulos solares también está influenciada por otros factores, como la temperatura y la posición de los paneles. Por lo tanto, para maximizar el rendimiento es primordial tener en cuenta la ubicación geográfica, las condiciones de la luz a lo largo del día y las estaciones del año.

3.3.1.2. Influencia de la temperatura en el rendimiento. La temperatura tiene una incidencia importante en el rendimiento de las células solares debido a que, aunque los paneles solares requieren luz para generar electricidad, el calor excesivo puede reducir su eficiencia. A medida que la temperatura aumenta, esta eficiencia disminuye debido a la mayor resistencia interna en los materiales semiconductores. No obstante, los avances en materiales y diseños han ayudado a mitigar este efecto al mejorar la capacidad de los paneles para funcionar en condiciones de alta temperatura. Por lo tanto, el equilibrio entre irradiancia y temperatura es crucial para obtener el rendimiento óptimo de los sistemas fotovoltaicos.

3.3.1.3. Condiciones ambientales y su efecto en los paneles. Las condiciones ambientales (humedad, presencia de polvo, contaminación, precipitaciones, entre otras) también afectan el desempeño de los paneles solares. La acumulación de polvo y suciedad sobre la superficie de los módulos puede bloquear la luz solar y reducir su capacidad para generar energía. Asimismo, la exposición constante a la humedad y la corrosión en ambientes salinos puede deteriorar los materiales del panel, reduciendo su vida útil.

A pesar de estos desafíos, los paneles solares modernos están diseñados para resistir las condiciones climáticas adversas, aunque los mantenimientos periódicos son decisivos para garantizar su eficacia a largo plazo.

3.3.2. Factores operativos

También tienen un impacto considerable en la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. Estos factores incluyen aspectos relacionados con el uso y el mantenimiento de los paneles solares que pueden afectar su capacidad para generar energía de manera óptima. El sombreado parcial y la acumulación de suciedad son dos de los factores operativos más comunes que disminuyen el rendimiento de las instalaciones solares. A respecto, son fundamentales un diseño adecuado, la orientación correcta de los paneles y el monitoreo constante del sistema para minimizar estos efectos y asegurar un funcionamiento eficiente.

3.3.2.1. Impacto del sombreado parcial en la eficiencia. El sombreado parcial sobre los paneles solares tiene un considerable impacto negativo en su eficiencia. Cuando una parte del panel está sombreada, el flujo de electricidad en el módulo se ve restringido incluso en condiciones de alta irradiancia, lo que reduce la cantidad de energía generada. Este fenómeno ocurre porque en un sistema fotovoltaico las células solares están conectadas en serie, por lo que el sombreado de una celda puede afectar el rendimiento de todo el panel. Por lo tanto, es crucial diseñar las instalaciones solares teniendo en cuenta posibles fuentes de sombra, como árboles o edificaciones cercanas, para maximizar la eficiencia del sistema.

3.3.2.2. Acumulación de suciedad y reducción de rendimiento. La acumulación de suciedad sobre la superficie de los paneles solares puede reducir significativamente su rendimiento, pues impide que la luz solar llegue a las células fotovoltaicas. El polvo, las hojas o la nieve acumulada en los módulos actúan como una barrera que bloquea la irradiancia, lo que disminuye la cantidad de energía generada. Este problema es más evidente en áreas con climas secos o polvorientos, donde la suciedad se acumula rápidamente y se vuelve más difícil de remover. Por consiguiente, resulta necesario realizar limpiezas periódicas y un mantenimiento adecuado de los paneles solares para asegurar

que continúen funcionando con la máxima eficiencia posible, prolongando su vida útil y optimizando el rendimiento energético del sistema.

3.3.2.3. Eficiencia del inversor. Este factor es fundamental en el rendimiento general de un sistema fotovoltaico, por cuanto determina la cantidad de energía que cambia de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA), utilizable en aplicaciones domésticas e industriales. Un inversor con baja eficiencia puede generar pérdidas significativas durante este proceso de conversión, lo que reduce la cantidad de energía aprovechable del sistema. En este caso, los inversores deben ser seleccionados de acuerdo a las características del sistema fotovoltaico, como la potencia total instalada y las condiciones de operación, debido a que un inversor mal dimensionado o de baja calidad puede afectar negativamente el rendimiento global del sistema. Por ello, asegurar la calidad y el dimensionamiento adecuado del inversor es básico para optimizar la eficiencia de la instalación solar.

En resumen, los factores que influyen en el desempeño de los sistemas fotovoltaicos son variados y pueden clasificarse en ambientales y operativos. Entre los factores ambientales, la irradiancia y la temperatura tienen un impacto significativo porque influyen directamente en la capacidad de generación de energía y en la eficiencia de los paneles solares. A su vez, las condiciones climáticas y la acumulación de suciedad pueden afectar la durabilidad y el rendimiento de los módulos. Por otro lado, los factores operativos, tales como el sombreado parcial y la eficiencia del inversor, son indispensables para garantizar que el sistema funcione de manera óptima a lo largo del tiempo. En conjunto, estos factores deben ser cuidadosamente monitoreados y gestionados para maximizar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y asegurar su vida útil, con el fin de aprovechar al máximo la energía solar (Martín & Fernández, 2019).

3.4. Energía fotovoltaica en el marco de la transición energética

La transición energética representa un proceso clave en la evolución de los sistemas energéticos a nivel global, pues promueve un cambio hacia fuentes sostenibles y eficientes. En este contexto, la energía fotovoltaica emerge como

una alternativa viable debido a su disponibilidad, bajo impacto ambiental y creciente desarrollo tecnológico. En comparación con los combustibles fósiles, la energía solar no produce emisiones nocivas ni repercute en el cambio climático, lo que la convierte en una solución ideal para alcanzar un modelo energético más limpio y sostenible (Linares, 2018).

El crecimiento de la industria fotovoltaica en la última década ha sido impulsado por avances tecnológicos, una mayor inversión en energías renovables y la reducción de costos de los paneles solares. Estos factores han permitido que la energía fotovoltaica se convierta en una opción accesible y atractiva para hogares, empresas e industrias. Sin embargo, su adopción a gran escala requiere políticas públicas adecuadas y marcos regulatorios que incentiven su implementación. En tal sentido, los Gobiernos juegan un papel fundamental porque son los encargados de establecer normativas que favorezcan el uso de la energía solar en los sistemas eléctricos nacionales (Mitrašinović, 2021).

Si bien la energía fotovoltaica ofrece múltiples ventajas, también enfrenta desafíos importantes, sobre todo en el caso de las centrales solares a gran escala. Uno de los principales obstáculos es el acceso a terrenos aptos para la instalación de estos sistemas, ya que su infraestructura requiere grandes extensiones de espacio. Esto genera conflictos con actividades como la agricultura, que también necesita del suelo, lo que limita su expansión en determinadas regiones. Por ello, resulta fundamental buscar soluciones innovadoras, como el uso de techos solares en edificaciones o la instalación de parques solares en zonas no aprovechables para la agricultura (Wolniak & Skotnicka-Zasadzień, 2022).

De este modo, la energía fotovoltaica asume un rol crucial en la transición energética al reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fomentar un modelo energético más sostenible. A pesar de los retos asociados a su implementación, su versatilidad, aceptación social y bajo impacto ambiental la convierten en una alternativa cada vez más viable. Para garantizar su éxito, es necesario continuar con investigaciones, desarrollar estrategias para optimizar el uso del suelo y fomentar políticas que incentiven su adopción.

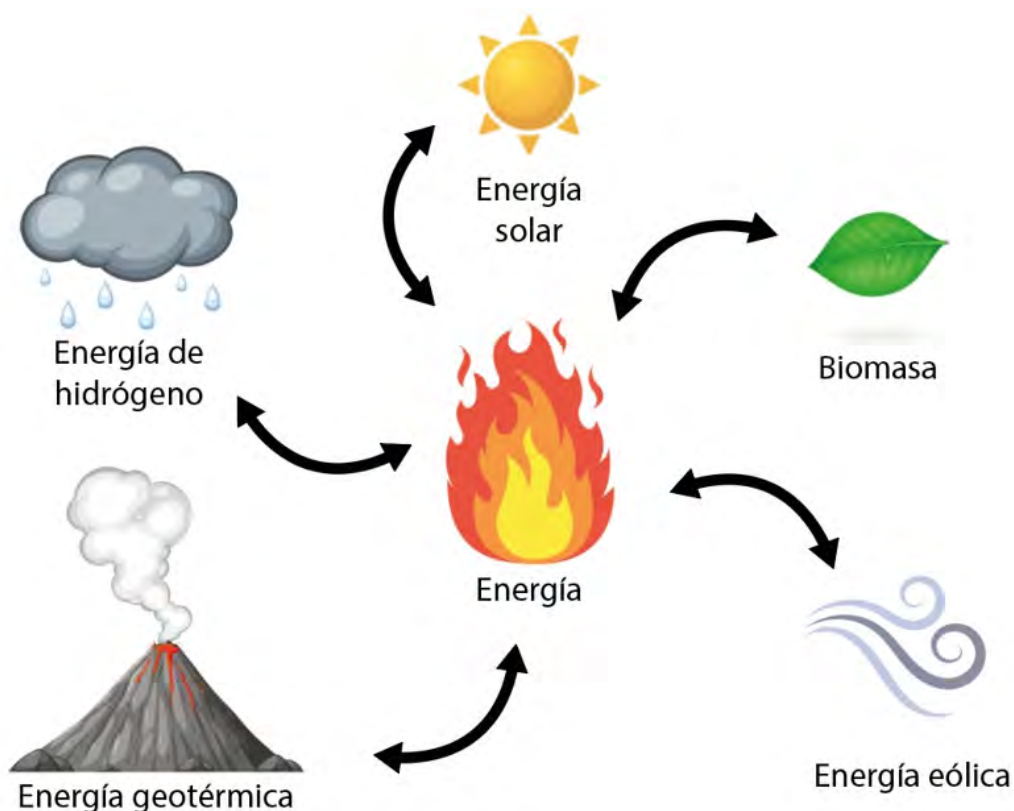
Así, este tipo de energía podrá consolidarse como un pilar fundamental en la transformación del sector energético global (Wang *et al.*, 2023).

3.4.1. Impacto y tipos de recursos energéticos

Conforme a Vivanco (2020), Los seres humanos cuentan con diversas fuentes de energía, las cuales —de manera directa o indirecta— tienen su origen en el Sol. Dichas fuentes naturales pueden agruparse en dos categorías: las que se regeneran constantemente (renovables) y aquellas cuyo suministro es limitado (no renovables).

3.4.1.1. Fuentes de energías renovables. Incluye aquellas fuentes energéticas cuya reposición ocurre a una velocidad superior en comparación con su consumo. Sin embargo, un uso excesivo podría agotar ciertos recursos, como sucede con la explotación intensiva de biomasa. Al respecto, es conveniente señalar que el proceso de renovación de estas energías puede darse tanto de forma natural como mediante intervención humana.

Figura 6. Principales fuentes de energías renovables



Nota. Adaptado de Maldonado (2021) .

3.4.1.1.1. Energía hidráulica. Se origina cuando el agua desciende desde zonas elevadas debido a la gravedad formando ríos. Durante su recorrido, el agua adquiere energía cinética, que puede ser aprovechada en centrales hidroeléctricas al pasar por turbinas especializadas, donde se convierte en electricidad. Contribuye a la generación de energía renovable.

3.4.1.1.2. Energía marina. Los océanos y mares almacenan una gran cantidad de energía cinética que puede transformarse en electricidad mediante diversas tecnologías. La energía mareomotriz, por ejemplo, surge de la variación de las mareas, mientras que la undimotriz se obtiene del movimiento de las olas. También existe la conversión térmica oceánica (OTEC), que usa las diferentes temperaturas del agua.

3.4.1.1.3. Energía eólica. Proviene del movimiento de grandes masas de aire impulsadas por la radiación solar. Por medio de aerogeneradores, la energía cinética del viento se transforma en mecánica y posteriormente en electricidad. Su aprovechamiento depende de la velocidad y constancia del viento. Es una fuente renovable eficiente y limpia.

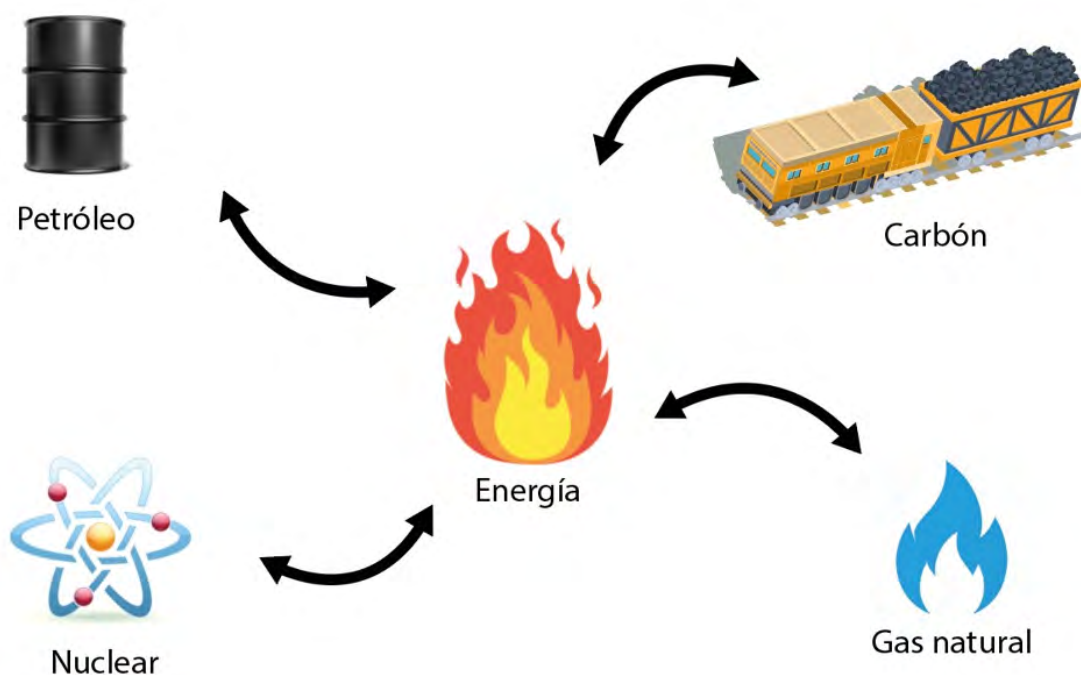
3.4.1.1.4. Energía de biomasa. Almacena la energía del Sol en la materia orgánica mediante la fotosíntesis, proceso realizado por plantas y microorganismos. Durante este fenómeno, la luz solar, el agua y el CO₂ atmosférico generan compuestos químicos ricos en energía. Estos materiales pueden utilizarse como combustible para la producción de electricidad y calor.

3.4.1.1.5. Energía solar. Proviene directamente de la radiación electromagnética del Sol y se captura mediante tecnologías específicas. En este escenario, dispositivos como células fotoeléctricas, heliostatos y colectores solares convierten esta energía en electricidad o calor. Por tal motivo, su versatilidad y disponibilidad la convierten en una de las fuentes renovables más utilizadas.

3.4.1.1.6. Energía geotérmica. Se extrae del calor interno del planeta que se transmite desde géiseres, volcanes, fumarolas y fuentes termales. A través de tecnologías adecuadas, este calor se puede transformar en electricidad o utilizarse directamente como fuente térmica. Ahora bien, su disponibilidad depende de la actividad geológica de cada región.

3.4.1.2. Fuentes de energías no renovables. Proviene de recursos naturales cuyo proceso de regeneración es extremadamente lento o inexistente en comparación con su ritmo de consumo. Entre ellas se encuentran los combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural y el carbón, y la energía nuclear, que se basa en el uranio. Debido a su explotación continua, estas fuentes tienden a agotarse y generan efectos ambientales considerables, como la emisión de gases de efecto invernadero y contaminación.

Figura 7. Principales fuentes de energías no renovables



Nota. Adaptado de Maldonado (2021) .

3.4.1.2.1. Combustibles fósiles. Se originan a partir de materia orgánica acumulada durante millones de años, la cual ha experimentado transformaciones debido a la presión y la temperatura. Entre los principales combustibles fósiles se hallan el carbón, el petróleo y el gas natural. Su uso es extendido debido a su gran capacidad energética, aunque su explotación conlleva impactos ambientales significativos.

3.4.1.2.2. Energía nuclear o atómica. Se obtiene a través de la fisión del núcleo de átomos de uranio, proceso en el cual se libera una gran cantidad de calor y radiación. La energía resultante es aprovechada en centrales nucleares

para la producción de electricidad o en aplicaciones termonucleares. A pesar de su eficiencia, su uso requiere estrictas medidas de seguridad debido al riesgo de contaminación radiactiva.

En suma, la disponibilidad y el uso de los recursos energéticos dependen tanto de factores naturales como de las decisiones humanas en su gestión. La transición hacia fuentes sostenibles es un desafío que involucra el desarrollo tecnológico, la planificación energética y la conciencia ambiental. En este contexto, resulta fundamental optimizar el aprovechamiento de las energías renovables y mitigar los impactos negativos de las no renovables para garantizar un equilibrio entre el progreso y la preservación del entorno (Vivanco, 2020).

3.5. Sistemas fotovoltaicos y su contribución al desarrollo sostenible

De acuerdo con Nat Geo (2022), los sistemas fotovoltaicos tienen un potencial significativo en la exploración de opciones ecológicas para el futuro energético mundial. Al aprovechar la energía solar, una fuente limpia y abundante, estos sistemas ofrecen una alternativa viable frente a los combustibles fósiles, que continúan siendo señalados como los principales causantes del calentamiento global. La implementación masiva de paneles solares contribuye a una transición hacia una matriz energética más ecológica porque promueve la descarbonización de los sectores más contaminantes.

Además de su bajo impacto ambiental durante la producción de electricidad, la energía solar fotovoltaica ha evidenciado ser una de las opciones más accesibles y de mejor costo-beneficio dentro de las energías renovables. A medida que las tecnologías mejoran y los costos se reducen, se abre una nueva oportunidad para que las comunidades en todo el mundo accedan a energía limpia sin necesidad de grandes inversiones iniciales. En América Latina, países como Brasil y Chile avanzan en la adopción de estos sistemas, lo que ha generado un impacto positivo tanto en la reducción de emisiones como en la mejora del acceso a energía en zonas rurales y apartadas (Nat Geo, 2022).

Los sistemas fotovoltaicos también tienen el potencial de influir en la esfera social. Según Nat Geo (2022), la generación distribuida de energía, que permite a los consumidores producir su propia electricidad a partir de paneles solares, fomenta la equidad energética al ofrecer una mayor autonomía a las personas y comunidades. Esta democratización de la energía solar facilita que grupos minoritarios se beneficien directamente de las ventajas de esta tecnología, promoviendo con ello la inclusión y el desarrollo social por medio de la participación activa en la transición energética.

Finalmente, el aprovechamiento de la energía fotovoltaica también favorece la creación de empleos verdes y el impulso de la economía local. La fabricación, instalación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos requieren mano de obra especializada, lo que contribuye al crecimiento del sector y al fortalecimiento de economías regionales. En países como Brasil, con una creciente industria solar, se están generando miles de empleos que no solo impulsan la economía, sino que también mejoran la calidad de vida al ofrecer empleos sostenibles y bien remunerados. Esto es un ejemplo claro de cómo los sistemas fotovoltaicos protegen el medio ambiente y tienen un impacto positivo en el bienestar social y económico (Nat Geo, 2022).

3.5.1. Reducción de emisiones y mitigación del cambio climático

Conforme a Nat Geo (2022), la energía fotovoltaica se destaca por su capacidad para disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, un factor crucial en la lucha para mitigar el cambio climático. Al generar electricidad sin la quema de combustibles fósiles, este sistema no libera dióxido de carbono (CO_2) ni otros contaminantes a la atmósfera. Esto contrasta con las fuentes tradicionales de energía como el carbón y el gas natural, que generan la mayor parte de las emisiones mundiales de CO_2 .

Aparte de su baja huella de carbono, la energía fotovoltaica contribuye a la descarbonización de las economías porque reduce la dependencia de los combustibles fósiles. La capacidad de la energía solar para producir electricidad de manera limpia y renovable limita las emisiones de gases de efecto inver-

nadero y, al mismo tiempo, impulsa el cambio hacia un modelo energético más sostenible y resiliente. Esta transición es clave para aliviar las consecuencias del cambio climático en diversas regiones del mundo, especialmente en América Latina, donde fenómenos como sequías extremas y tormentas intensas se han vuelto cada vez más frecuentes (Nat Geo, 2022).

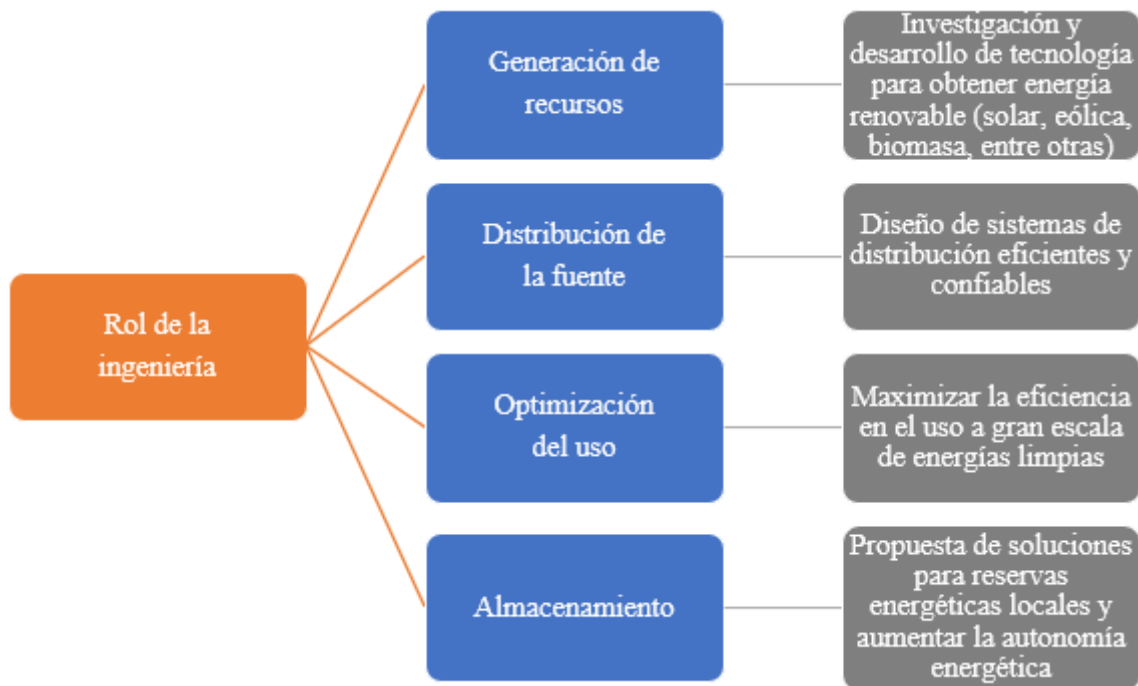
Además de los beneficios directos para el clima, la energía solar fotovoltaica también reduce otros tipos de contaminación asociados con las fuentes de energía convencionales. Para Nat Geo (2022), la quema de combustibles fósiles libera CO_2 y genera contaminantes tóxicos como óxido de nitrógeno y dióxido de azufre que afectan la calidad del aire y pueden generar problemas de salud pública. Por ello, sustituir estas fuentes de energía por sistemas solares ayuda purificar el aire, lo que beneficia a las comunidades al reducir enfermedades respiratorias y otras afecciones relacionadas con la contaminación.

El impacto de la energía solar en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero se puede ver en países como Brasil, donde la adopción de sistemas fotovoltaicos ha tenido un efecto positivo. En 2021, la energía solar ayudó a dicho país a evitar la emisión de casi 20 millones de toneladas de CO_2 en el sector eléctrico, una muestra del gran potencial de la energía solar para contribuir a la mitigación del cambio climático. Teniendo en cuenta lo descrito, este impacto se extenderá aún más en el futuro a medida que aumenten las instalaciones solares y se fortalezcan las políticas públicas orientadas a la sostenibilidad y la protección del medio ambiente (Nat Geo, 2022).

3.5.2. Rol de la ingeniería en la optimización de energías renovables

De acuerdo con la Universidad Europea (2023), los ingenieros especializados en energías renovables se dedican a trabajar con fuentes de energía que son inagotables o que se regeneran naturalmente. Su labor principal consiste en investigar, desarrollar e implementar las tecnologías más eficaces para la explotación de distintos tipos de energía renovable.

Figura 8. *Funciones de la ingeniería para la optimización de energías renovables*



Nota. Adaptado de Universidad Europea (2023) .

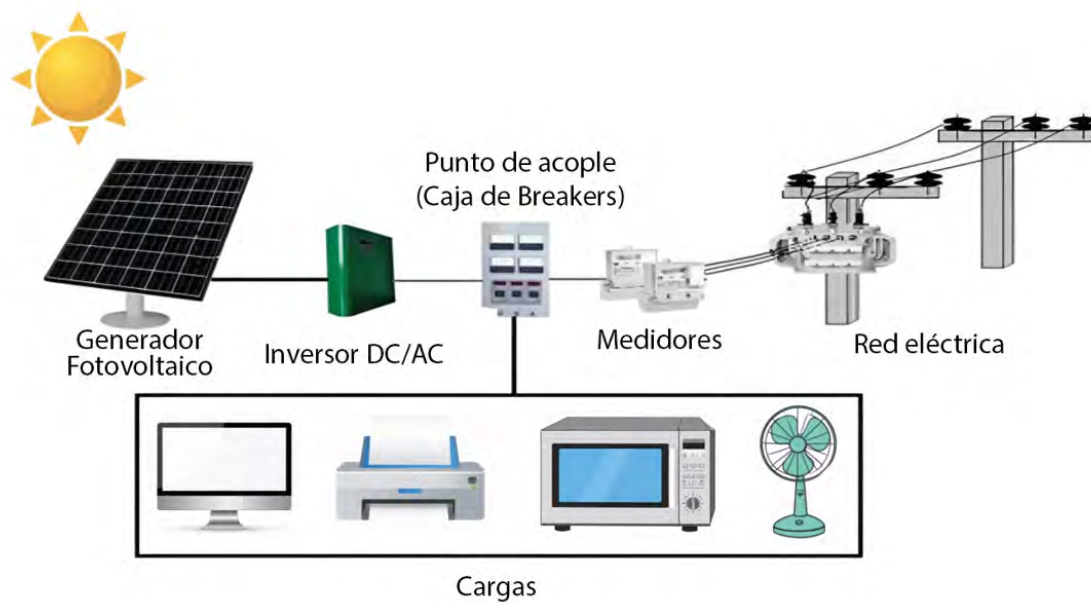
El rol de los ingenieros de energías renovables es determinante para avanzar hacia un futuro sostenible. A través de su trabajo en la generación, distribución, optimización y almacenamiento de estas fuentes de energía, contribuyen notablemente al desplazamiento hacia un modelo energético más ecológico y eficaz. Este enfoque no solo promueve la reducción de la huella ecológica, sino que también impulsa el desarrollo de tecnologías innovadoras que beneficiarán tanto a las generaciones presentes como a las futuras (Universidad Europea, 2023).

CAPÍTULO IV

MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y SMART FACTORY EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS: UNA REVISIÓN INTEGRATIVA

Hoy, a nivel mundial, el desarrollo de componentes materiales, procesos de producción y aplicaciones para la energía fotovoltaica y para los componentes de balance de sistemas (BOS), constituye un campo de investigación clave. Los BOS son fundamentales para la conexión, la protección química y el montaje mecánico de las células en los paneles solares, que forman parte de los denominados sistemas fotovoltaicos conectados (SFC). Estos son aspectos importantes para la regulación electrónica de los niveles de salida para su uso, almacenamiento en baterías o alimentación a la red eléctrica (Izam *et al.*, 2022).

Como complemento, los SFC incorporan operaciones de prueba y monitoreo, así como dispositivos portátiles alimentados por energía solar. Por lo tanto, ya sean centralizados a escala de servicio público o distribuidos, los sistemas de energía fotovoltaicos se componen de grupos distintos de elementos para las células solares y el BOS. En estos se destacan los paneles fotovoltaicos, la electrónica, el almacenamiento de energía, la carga o consumo (Konneh *et al.*, 2021). En la Figura 1 se puede apreciar la representación gráfica de la estructura general de los SFC.

Figura 9. Estructura básica de un sistema fotovoltaico conectado (SFC)

Nota. Adaptado de Vargas *et al.* (2019).

En la Figura 10, se aprecia en primer término el generador fotovoltaico, el cual está conformado por materiales semiconductores como el silicio, que facilita la absorción y conversión de los fotones. Estos son transformados en electrones, que dan origen a la corriente continua o flujo eléctrico mediante los inversores DC/AC (Sierra *et al.*, 2020). El inversor funciona con un convertidor de la corriente continua producida por el campo fotovoltaico en corriente alterna de onda sinusoidal, requerida por los equipos electrodomésticos. Dichos inversores pueden tener incidencia en las diferencias de voltaje, la frecuencia, potencia reactiva, velocidad de respuesta y calidad de la energía (Cai-cedo-Peñaranda *et al.*, 2024).

La red eléctrica alimenta los medidores o controladores del flujo de electricidad que van a un punto de acople o caja de breakers, donde se integran las potencias de la red y la proveniente del panel solar. La presencia de dicha caja evita sobrecargas o bajadas de tensión que podrían afectar el funcionamiento de todo el sistema (Jumilla *et al.*, 2023).

En el contexto contemporáneo, la energía solar fotovoltaica se considera una solución potencial para mitigar los costos ambientales asociados con el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, los impactos ambientales de la construcción y operación de la misma siguen siendo poco claros (Li *et al.*, 2024),

aunque desde el año 2009 la capacidad de generación de energía fotovoltaica (PV, por sus siglas en inglés) ha crecido un 41 % anualmente.

En concordancia, las proyecciones del sistema energético que mitigan el cambio climático y contribuyen al acceso universal a la energía evidencian un aumento de casi diez veces en relación con la capacidad de generación de energía solar estimada para el año 2040 (Kruitwagen *et al.*, 2021), aunque desde el 2016 se introdujo el concepto de energía fotovoltaica flotante (FPV, por sus siglas en inglés). Esta es una tecnología emergente que ha experimentado un crecimiento significativo en el mercado de las energías renovables. En tal sentido, las plantas de FPV pueden ser instaladas de forma convencional en cuerpos de agua o embalses, o implementarse como sistemas multipropósito para producir simultáneamente alimentos y energía (Gorjian *et al.*, 2021).

En concordancia con las características estructurales y funcionales de estos sistemas, es de gran importancia que se disponga de un tipo de mantenimiento que se adelante significativamente a la ocurrencia de averías, deterioros o fallos potenciales. En este contexto, el mantenimiento predictivo (PdM, por sus siglas en inglés), es una alternativa efectiva para el monitoreo continuo, la detección de fallos y la conservación de los medios y equipos innovadores. Por esta razón, surge una alternativa novedosa para lograr efectivamente este objetivo, denominado algoritmos de aprendizaje automático (MLA, por sus siglas en inglés) (Campos-Olivares *et al.*, 2024), aunque la efectividad y alcance de estos puede depender del campo aplicado. Esto se extiende desde el reconocimiento de voz hasta la gestión de dispositivos del IoT y los vehículos autónomos seleccionados (Gohel *et al.*, 2020).

En perspectiva, el mantenimiento predictivo es una extensión sistematizada del mantenimiento preventivo, cuyo enfoque se basa en registros históricos con visión de futuro. El mantenimiento predictivo utiliza datos de monitoreo y los MLA para prever posibles fallas del sistema, en lugar de cronogramas fijos como en el mantenimiento preventivo y correctivo (Samkria *et al.*, 2021). Según sea el proceso, se sustenta en herramientas como el análisis de vibraciones, pruebas de ultrasonido, análisis de aceite, análisis de árbol de fallas, análisis FMECA (por sus siglas en inglés, Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad) y la termografía infrarroja (Cedeño *et al.*, 2025; Crespo & Arias, 2024; Faysal *et al.*, 2022; Hespeler *et al.*, 2024; Torres-Sainz *et al.*, 2024).

En cuanto a su alcance, se distinguen cinco fases fundamentales: i) monitoreo del funcionamiento del equipo, ii) modelización del proceso, iii) modelización del escenario límite, iv) priorización de actividades, y v) seguimiento continuo (STEL Order, 2023).

Debido al avance de la tecnología digital y la inteligencia artificial, el PdM y las SF que funcionan bajo la filosofía 4.0 describen una relación simbiótica (Sánchez *et al.*, 2024). Precisamente, la fabricación de productos personalizados requiere de una producción ágil y flexible que se pueda reconfigurar rápidamente ante las nuevas demandas de los clientes. Por ello, una empresa inteligente supera los actuales procesos rígidos de planeación y producción con una estructura modular de dispositivos inteligentes conectados al IoT (Noguera & Fernández, 2023).

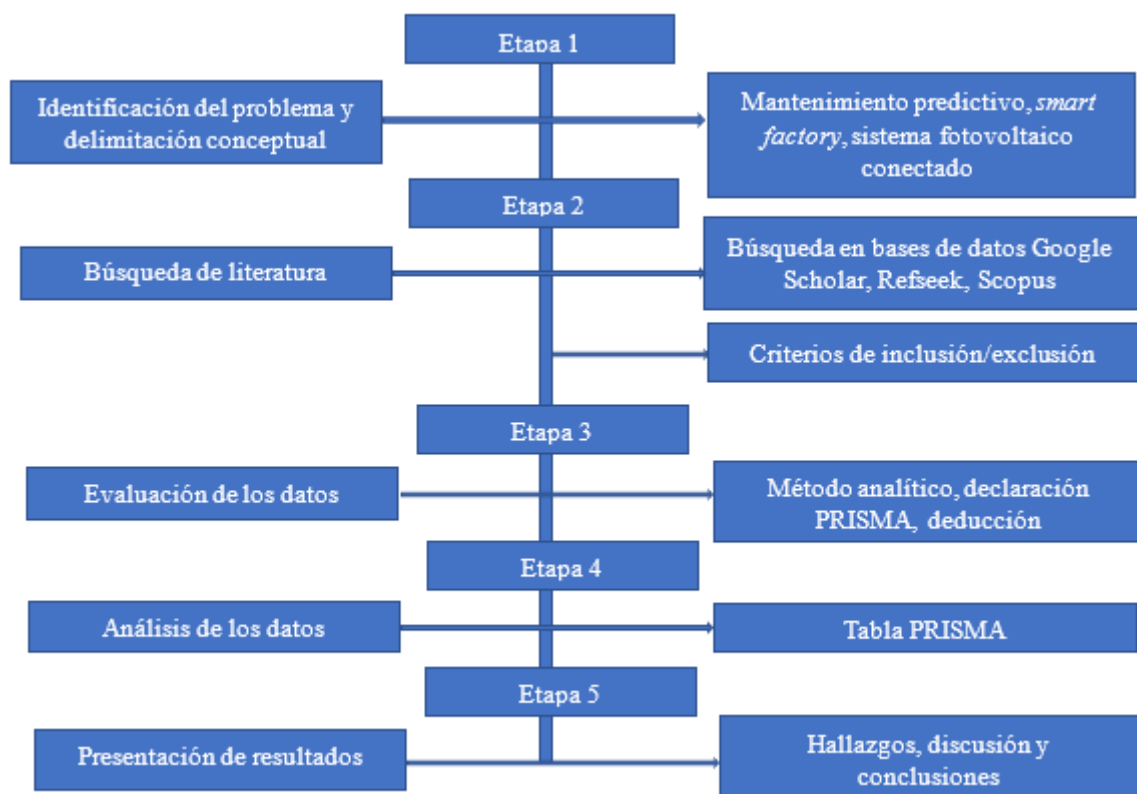
Todo lo expuesto ha generado la necesidad de abordar los SFC desde la perspectiva predictiva de la programación del mantenimiento basado en la condición (CBM, por sus siglas en inglés). Esto permite planificar con anticipación el mantenimiento o los reemplazos de componentes, según la condición en la que se encuentren y la vida útil esperada (Bencheikh *et al.*, 2022). Asimismo, se toma en cuenta la convergencia del SFC con la SF (Mołęda *et al.*, 2023). En tal sentido, según las características especiales de la SF asociada con la filosofía de la Industria 4.0, el mantenimiento predictivo es un modelo justo a la medida. Eso se aprecia mejor cuando las fábricas inteligentes se alinean con los SESFC (Sistemas Energéticos Sostenibles Fotovoltaicos y Conectados) en pro de la concepción del manejo de la energía renovables (Chen, 2024).

En este direccionamiento, el objetivo propuesto es explorar la bibliografía actualizada sobre la aplicación del PdM en la SF y en los SFC. Con ese objetivo, se sigue la metodología de la revisión integrativa teniendo en cuenta los lineamientos de Garzón-Posada *et al.* (2022). En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera converge la bibliografía actual con la aplicación del mantenimiento predictivo en la *smart factory* y en los sistemas fotovoltaicos conectados? De ese modo, se asegura una investigación sistematizada, centrada en la indagación, el alcance de la revisión, la identificación del estudio y, finalmente, en el análisis y la síntesis de la información.

4.1. Metodología

El presente estudio tiene un alcance descriptivo que se sustenta en una revisión integrativa de bibliografía relacionada con los tres constructos abordados, en los últimos 10 años (periodo 2015-2025). Se consideraron estudios de enfoque cuantitativo, cualitativo y mixto con el propósito de identificar, evaluar e integrar los datos, las interpretaciones y las conclusiones sobre las investigaciones relevantes asociadas a las temáticas. La elaboración de esta investigación se fundamentó en los parámetros generales establecidos por Whittemore y Knafl (2005) siguiendo las cinco etapas correspondientes: 1. Identificación del problema; 2. Búsqueda de literatura; 3. Evaluación de los datos; 4. Análisis de los datos, y 5. Presentación de resultados. En la Figura 11 se detallan las etapas y los elementos desarrollados en cada una de ellas.

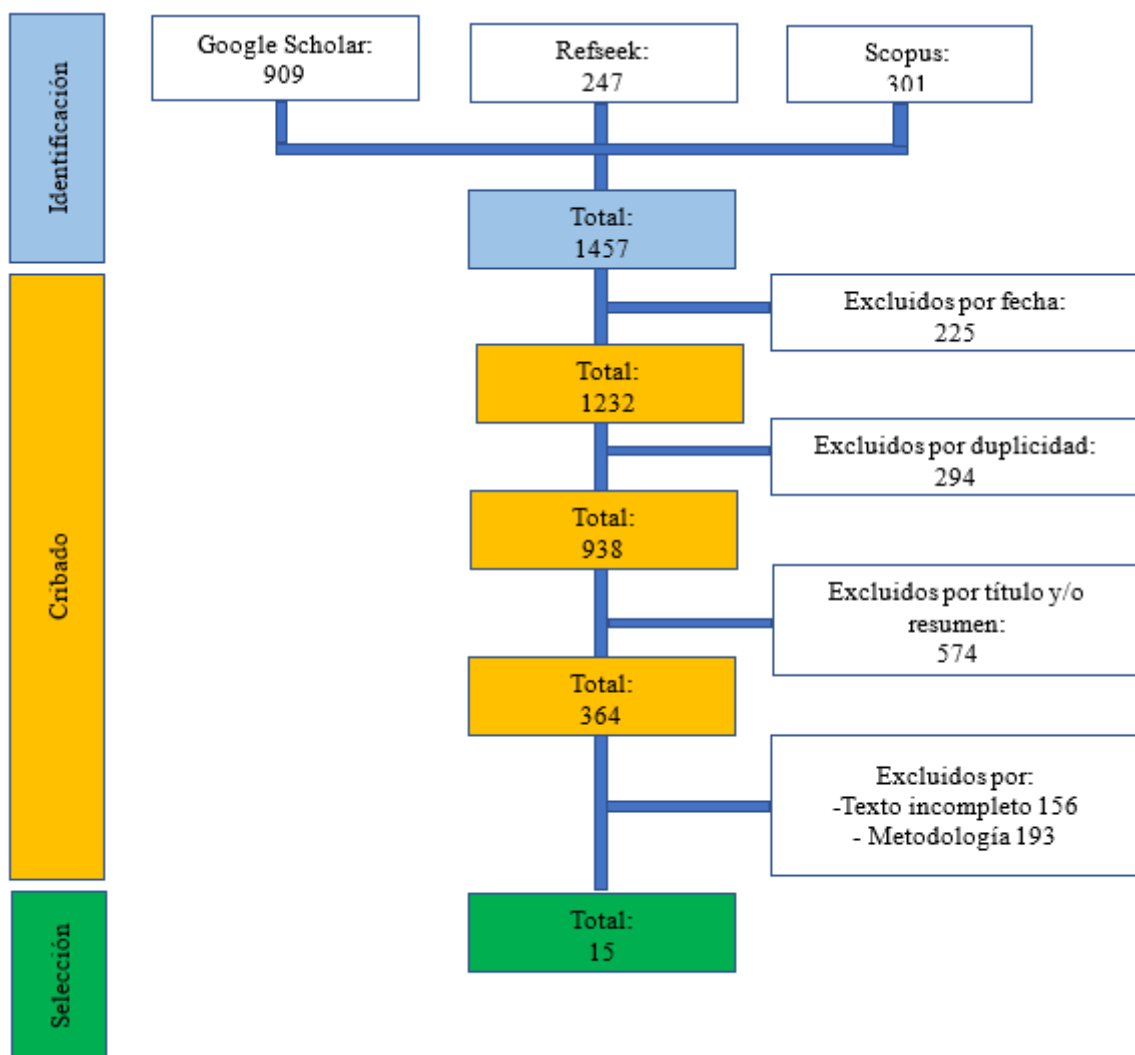
Figura 10. *Flujograma de las etapas para la selección de artículos*



Nota. Elaboración propia.

En la etapa 1, se especificó la necesidad del estudio y su alcance considerando las tres variables del estudio. En la etapa 2, se precisaron artículos indexados, capítulos de libros y documentos de actos generados en congresos. De igual forma, publicaciones en inglés y español de las bases de datos Google Scholar, Refseek y Scopus, además de artículos con enfoque cualitativo, cuantitativo y mixto. Los criterios de exclusión están dados para publicaciones previas al 2015 por duplicidad, por título no asociado, resumen incompleto, no especificar la metodología y/o por estructura incompleta. Las etapas 3 y 4, que implican la evaluación y análisis de los datos, se alinearon al protocolo PRISMA (Abelha *et al.*, 2020), tras lo cual se precisaron 18 documentos que cumplieron los criterios establecidos. La etapa 5 involucra la fase final del estudio. La Figura 12 permite apreciar los detalles según el método PRISMA.

Figura 11. *Flujograma del proceso de investigación según el protocolo PRISMA*



Nota. Elaboración propia.

4.2. Resultados

En la Tabla 4 se puede apreciar el detalle de los 15 artículos seleccionados para la revisión integrativa, donde se discrimina autor(es), idioma, año de publicación, motor de búsqueda/base de datos, metodología y hallazgos.

Tabla 4. *Documentos incluidos en la revisión*

Autor(es) (año)	Título	Revista/País	Motor de búsqueda	Metodología	Hallazgos
García-García <i>et al.</i> (2023)	Evaluación del desempeño de microrredes: una revisión	<i>Technological</i> /Colombia	Google Scholar	Revisión de literatura	Se establecieron 77 indicadores asociados a ocho capacidades de las microrredes con integración renovable que se interconectan a sistemas fotovoltaicos. Estas son: generación (11), resiliencia (16), mantenimiento (6), comunicación (7), reconfiguración (9), operación (8), control (10) y protección (10).
Osmani <i>et al.</i> (2020)	A review on maintenance strategies for PV systems	<i>Science of the Total Environment</i> / Países Bajos	Scopus	Estudio de enfoque cualitativo de alcance comparativo	En cuanto a las estrategias de PdM, una combinación de sistema predictivo de gestión y control de energía (PEMCS en inglés) con el FMEA (análisis de modos de fallo y efectos) garantizaría una distribución de energía decente con un indicador de fallas futuras para todos los equipos.
Bosman <i>et al.</i> (2020)	PV System Predictive Maintenance: Challenges, Current Approaches, and Opportunities	<i>Energies</i> / Suiza	Scopus	Revisión de literatura	El estudio expone que el PdM del sistema fotovoltaico y sus componentes debe centrarse en el FMEA, el aprendizaje automático y en el pronóstico y análisis de sensores en tiempo real.

De Benedetti <i>et al.</i> (2018)	Anomaly detection and predictive maintenance for photovoltaic systems	<i>Neurocomputing</i> /Países Bajos	Scopus	Enfoque cuantitativo de diseño experimental y alcance analítico	Se presenta un enfoque de aprendizaje diseñado para detectar posibles anomalías en sistemas fotovoltaicos, con el fin de permitir que un operador planifique intervenciones de PdM. Se basa en un algoritmo comparativo entre los valores medidos y predichos de la producción de energía de CA. El modelo diseñado se sustenta en un MLA o Red Neuronal Artificial (ANN).
Pech <i>et al.</i> (2021)	Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review	<i>Sensors</i> / Suiza	Refseek/ Scopus	Revisión de literatura	La importancia del PdM está creciendo con el tiempo en relación con las tecnologías de la Industria 4.0. Se propuso el mantenimiento predictivo inteligente (SIPM, por sus siglas en inglés) mediante la aplicación de sensores inteligentes utilizados para el mantenimiento predictivo en fábricas inteligentes.
Çınar <i>et al.</i> (2020)	Machine Learning in Predictive Maintenance towards Sustainable Smart Manufacturing in Industry 4.0	<i>Sustainability</i> / Suiza	Refseek/ Scopus	Revisión de literatura	El PdM es inevitable para la fabricación inteligente sostenible en I4.0. Las técnicas de aprendizaje automático (ML en inglés) han surgido como una herramienta prometedora en aplicaciones de PdM. Esto con la aplicación del ML en la inteligencia artificial (IA).

Achouch <i>et al.</i> (2022)	On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges	Applied Sciences/ Suiza	Refseek/ Scopus	Revisión de literatura	Los modelos asociados al PdM en empresas inteligentes son: mantenimiento basado en la condición (CBM), pronóstico y gestión de la salud (PHM) y vida útil restante (RUL). Finalmente, se presenta un novedoso flujo de trabajo industrial aplicado al PdM, que incluye la fase de soporte a la toma de decisiones, donde se recomienda una plataforma de mantenimiento predictivo.
Qureshi <i>et al.</i> (2024)	Radiometric Infrared Thermography of Solar Photovoltaic Systems: An Explainable Predictive Maintenance Approach for Remote Aerial Diagnostic Monitoring	Smart Cities/ Suiza	Refseek/ Scopus	Estudio empírico sobre un caso práctico centrado en un sistema inteligente de detección y diagnóstico de fallos sobre la termografía infrarroja radiométrica (IRT) de paneles SPV en un entorno de mantenimiento predictivo	El conjunto de datos de termografía infrarroja radiométrica considerado jugó un papel fundamental en el desarrollo y entrenamiento de un conjunto de modelos de MLA o redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) computacionalmente livianos. Estas lograron una alta precisión para el diagnóstico remoto de las condiciones de los paneles. Se pueden utilizar técnicas de explicabilidad con un enfoque de PdM explicable —que representa las características de los datos de imágenes radiométricas más relevantes— y la interpretabilidad matemática.

Ledmaoui <i>et al.</i> (2025)	Review of Recent Advances in Predictive Maintenance and Cyber-security for Solar Plants	<i>Sensors/</i> Suiza	Refseek/ Scopus	Revisión sistemática de la literatura	Se requiere un equilibrio entre la complejidad y la precisión del modelo, gestionar la imprevisibilidad del sistema y adaptarse a las condiciones ambientales cambiantes. Se destaca el IoT, el ML y el aprendizaje profundo (DL) para desarrollar el PdM de paneles solares. Con el monitoreo en tiempo real, el análisis de datos y la identificación de anomalías se mejora la precisión y la eficacia de los procedimientos de mantenimiento.
Marangis <i>et al.</i> (2024)	Trend-Based Predictive Maintenance and Fault Detection Analytics for Photovoltaic Power Plants	<i>RRL Solar/</i> Alemania	Refseek/ Scopus	Enfoque mixto, apoyado en el uso de registros históricos de una planta fotovoltaica y el diseño de algoritmos predictores y detectores de fallos	Los resultados obtenidos demuestran la eficacia del flujo de trabajo desarrollado para detectar fallos, alcanzando una sensibilidad del 96.9 %. Además, los resultados demuestran la capacidad del flujo de trabajo para generar alertas de PdM con hasta 7 días de antelación con una sensibilidad del 92.9 %.
Nabti <i>et al.</i> (2022)	Machine learning for predictive maintenance of photovoltaic panels: cleaning process application	<i>E3S Web of Conferences/</i> Francia	Refseek/ Scopus	Revisión bibliográfica	Se recomienda a los propietarios de sistemas fotovoltaicos un nuevo proceso en la herramienta de PdM para optimizar el retorno de la inversión y minimizar el tiempo de reclamación de la garantía. Esto incluye el diagnóstico manual, el ML y el uso de sensores en tiempo real.

Cervera-Gascó <i>et al.</i> (2021)	AS-Solar, a Tool for Predictive Maintenance of Solar Ground-water Pumping Systems	<i>Agronomy</i> / Suiza	Refseek/ Scopus	Estudio empírico cuantitativo mediante un modelo de simulación y un proceso de optimización	Se desarrolló un nuevo sistema de apoyo a la toma de decisiones, denominado AS-Solar, para realizar PdM. Este modelo permite detectar si el origen de la anomalía en el rendimiento de la bomba es la propia bomba, los componentes eléctricos (motor, variador de frecuencia [VFD], cables) o la tubería de bombeo.
Bin <i>et al.</i> (2023)	Predictive Maintenance in Photovoltaic Systems Using Ensemble ML Empirical Analysis	Conference: 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)/ Francia	Refseek/ Google Scholar	Estudio empírico de enfoque mixto. Utiliza un conjunto de datos de un sistema fotovoltaico de 99.9 kW con un diverso conjunto de características	Se implementaron MLA por conjuntos para pronosticar las necesidades de mantenimiento regular del sistema fotovoltaico. El sistema EMLEA propuesto identificó la tensión y la corriente de CC como factores determinantes clave para las necesidades de mantenimiento regular del sistema. De todos los modelos probados, XGBoost resultó ser el modelo superior con una precisión impresionante del 98.62 % y una precisión del 94.37 %.
Bassam & May (2022)	Predictive Maintenance of Photovoltaic System Based on Deep Learning	<i>Publisher: AIP</i> /Estados Unidos	Refseek/ Google Scholar	Estudio empírico de un caso práctico	El uso de algoritmos de aprendizaje automático (<i>Machine Learning Algorithms</i> , MLA) representa una opción atractiva al reducir el costo de la instrumentación y permitir acciones correctivas en tiempo real. Entre estos, las redes neuronales convolucionales se destacan como herramientas clave para el desarrollo de estrategias de PdM en sistemas fotovoltaicos a gran escala, lo cual favorece el monitoreo de instalaciones fotovoltaicas.

Mostefa <i>et al.</i> (2020)	New Intelligent Fault Diagnosis (IFD) approach for grid-connected photovoltaic systems	<i>Energy</i> /Reino Unido	Refseek/Scopus	Estudio empírico cuantitativo de diseño experimental y de alcance demostrativo	Se presenta un nuevo algoritmo inteligente para el diagnóstico y la detección de fallos (IFD) en sistemas fotovoltaicos. En esta etapa del estudio, este algoritmo puede detectar e identificar tres casos recurrentes: fallos en buen estado, cortocircuito y la desconexión de la cadena en el conjunto fotovoltaico mediante algoritmo de aprendizaje automático, como redes neuronales artificiales (RNA).
------------------------------	--	----------------------------	----------------	--	--

Nota. Elaboración propia.

Entre los aspectos resaltantes que se pueden rescatar de la tabulación PRISMA, se tiene que, en los años 2015, 2016 y 2017 no se detectaron artículos que cumplieran con los criterios de inclusión y exclusión para poder ser seleccionados. En los años 2018 y 2019 se apreció un artículo en cada uno de dichos años, mientras que el 2020 se registraron 3 documentos analizados. En el 2021 se analizaron 2 artículos; el 2022, un total de 3; en el 2023, 2; en el 2024, 2 y en el 2025, 1. En la Figura 13 se aprecia la tendencia descrita durante el periodo de estudio de acuerdo a las publicaciones analizadas.

Figura 12. *Tendencia del número de publicaciones por año*



Nota. Elaboración propia.

La Figura 13 muestra una tendencia algo irregular. El crecimiento significativo se detecta entre el 2020 y 2022, con una caída leve en el 2021. Sin embargo, a partir del 2022 la tendencia se hizo decreciente, observándose una estacionalidad entre 2023 y 2024. Esto parece indicar que en la etapa pospandemia la atención en la temática disminuyó entre los investigadores de la comunidad científica internacional.

Con respecto a los estudios según el país, Suiza encabeza este segmento con 7 publicaciones con las revistas: *Energies* (1), *Sensors* (2), *Sustainability* (1), *Applied Sciences* (1), *Smart Cities* (1) y *Agronomy* (1). En segundo lugar, se ubicaron Países Bajos, con 2 documentos publicados en las revistas *Science of the Total Environment* (1) y *Neurocomputing* (1), y Francia, con *E3S Web of Conferences* (1) y Conference: 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) (1). El resto lo conformaron, con una publicación cada uno, Colombia: *Technological*; Alemania: *RRL Solar*, Reino Unido: *Energy*, y Estados Unidos: *AIP* (1). Como dato resaltante, se destaca que el 80 % de los artículos analizados (N=12) se hallan en revistas indexadas en la base de datos Scopus.

Desde la metodología empleada en los estudios, el 47 % (N=7) se desarrollaron mediante artículos de revisión de la literatura, mientras que 57 % (N=8) fueron estudios empíricos de enfoques cuantitativos o mixtos. Entre estos, en dos de ellos se aplicó un diseño experimental, además de un estudio empírico que consideró la simulación de un caso particular.

4.3. Discusión

La revisión de la información analizada permite exponer que la mayoría de los artículos poseen elementos comunes que denotan la relación entre el PdM, las SF y los SFC. Todo ello está anclado a los avances tecnológicos sustentados en la digitalización, la inteligencia artificial, el uso de la Internet de las cosas y el aprendizaje automático (Bin *et al.*, 2023; Çınar *et al.*, 2020; Ledmaoui *et al.*, 2025; Nabti *et al.*, 2022).

Esto se encuentra en concordancia a lo aportado por Samkria *et al.* (2021) en los casos de daños en los paneles de un sistema fotovoltaico. Aquí, el nodo

MCU, que es una plataforma de código abierto para la IoT, permite la transmisión del estado de fallo de los paneles fotovoltaicos. En consecuencia, La aplicación Blynk, basada en IoT, se utiliza para visualizar el estado del panel fotovoltaico, donde su panel de control permite visualizar el estado de cada panel. Este detalle también es comparable con los aportes de Bencheikh *et al.* (2022), quienes expusieron que la visualización de las fallas a tiempo permite planificar con anticipación el mantenimiento o sustituir los componentes de acuerdo al estado de los mismos y su respectiva vida útil esperada.

Este procedimiento también es una representación parcial de los protocolos para la evaluación del funcionamiento eficiente de los sistemas fotovoltaicos conectados y la detección anticipada de fallos mediante indicadores específicos. Esto fue abordado por García-García *et al.* (2023), Qureshi *et al.* (2024), De Benedetti *et al.* (2018), Marangis *et al.* (2024), Bassam y May (2022) y Mostefa *et al.* (2020), cuyos hallazgos contribuyen a la planificación efectiva de intervenciones de mantenimiento predictivo que se desarrollan con una serie de herramientas propias para el diseño e implementación de los MLA. Esto se compagina con los estudios de Gohel *et al.* (2020), Ogundipe *et al.* (2024) y Campos-Olivares (2024), quienes señalan y resaltan la importancia de contar con un PdM para piezas y equipos fotovoltaicos y estructuras inteligentes por medio de herramientas básicas.

Según el uso de herramientas específicas para el mantenimiento predictivo, Bosman *et al.* (2020) y Osmani *et al.* (2020) concuerdan que el análisis de modos de fallo y efectos (FMEA) permite la detección efectiva de fallas futuras para todos los equipos. Por su parte, Qureshi *et al.* (2024) destacaron los beneficios de emplear la termografía infrarroja radiométrica, que facilita una alta precisión para el diagnóstico remoto de las condiciones de operatividad en los SFC y en los procesos modulares de las *smart factory*. En perspectiva, estos hallazgos se ven alineados con los aportes de Cedeño *et al.* (2025), quienes emplearon cámaras termográficas para detectar variaciones de temperatura que pudieran indicar anomalías antes de la ocurrencia del fallo.

Con relación al PdM y las SF, Pech *et al.* (2021) exponen las bondades del mantenimiento predictivo inteligente (SIPM) con la incursión de sensores

específicos en las empresas, según la filosofía de la industria 4.0. Estos sensores están directamente relacionados con la IoT, redes de sensores inalámbricos y aplicaciones de nanotecnología, y están enmarcados en funciones que detectan movimiento, posición, proximidad y velocidad. A su vez, Achouch *et al.* (2022) resaltaron la aplicación del mantenimiento basado en la condición (CBM), pronóstico y gestión de la salud (PHM) y vida útil restante (RUL).

En este particular, Sánchez *et al.* (2024), así como Noguera y Fernández (2023), destacan la importancia e impacto de los módulos de control y supervisión local o remota a través de una conexión a Internet, o por redes mediante sensores. De esta manera, se logra la operación de dispositivos conectados al proceso de la SF por medio de un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés), Router DX2100 y la plataforma de IoT, llamada DIA-Cloud, para mantener un monitoreo continuo eficiente.

4.4. Conclusiones

Es importante puntualizar que los paneles solares que son parte del SFC no requieren, aparentemente, de un PdM. Sin embargo, debido a que un SFC está conformado por diversos equipos, entre los que se encuentran los paneles solares, requiere de un programa específico que pueda predecir de forma anticipada la ocurrencia de fallos. Por consiguiente, la detección temprana de una degradación o imprevistos puede mantener de forma continua y estable la generación de energía. Por ello, los SFC necesitan, como mínimo, una herramienta de PdM imparcial y lista para optimizar su funcionamiento, rendimiento, y desde el aspecto económico, el retorno de la inversión. De la misma manera, dicha herramienta debe propiciar la minimización del riesgo de reclamo por la garantía en dichas instalaciones.

Por otro lado, considerando que la Industria 4.0 (donde se enmarca la SF) se centra principalmente en el análisis de datos y los métodos de aprendizaje automático, tiene la posibilidad de modificar los procedimientos de producción. Por ese motivo, la ejecución del PdM contribuye a reducir el tiempo de inactividad de las máquinas, los costos, el control y la calidad de la producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abelha, M., Fernandes, S., Mesquita, D., Seabra, F., & Ferreira-Oliveira, A. (2020). Graduate employability and competence development in higher education—A systematic literature review using PRISMA. *Sustainability*, 12(15), 5900. <https://doi.org/10.3390/su12155900>
- Abou, Y., & Hossain, E. (2022). *Photovoltaic systems*. Springer International Publishing. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-89780-2>
- Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Karganroudi, S., Dhouib, R., Hussein, I., & Adda, M. (2022). On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. *Applied Sciences*, 12(16), 8081. <https://doi.org/10.3390/app12168081>
- Almarza, D., Hernández, J., Soto, G., & Santana, C. (2016). *Guía de operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos*. Ministerio de Energía. <https://energia.gob.cl/documentos/guia-de-operacion-y-mantenimiento-de-sistemas-fotovoltaicos>
- Álvarez, G., Kröhling, D., & Martínez, E. (2023). Bases para el desarrollo y aplicación de Gemelos Digitales en la industria de la energía eléctrica. *Ingenio Tecnológico*, 5, 1-15. <https://ingenio.frlp.utn.edu.ar/index.php/ingenio/article/view/82>
- Barberá, D. (2015). *Introducción a la energía fotovoltaica*. Universidad de Sevilla. <https://acortar.link/0dwoCQ>
- Barrero, A. (2025). *Estas son las cinco tendencias que van a marcar el futuro inmediato de la solar fotovoltaica*. Renewable Energy Magazine. <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/estas-son-las-cinco-tendencias-que-van-20250327>
- Bassam, A., & May, O. (2022). Predictive maintenance of photovoltaic system based on deep learning. *Artificial Intelligence for Smart Photovoltaic Technologies*, 5-21. 10.1063/9780735424999_005
- Bencheikh, G., Letouzey, A., & Desforges, X. (2022). An approach for joint scheduling of production and predictive maintenance activities. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 546-560. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.08.005>

- Bhanji, S., Shotz, H., Tadanki, S., Miloudi, Y., & Warren, P. (2021). Advanced enterprise asset management systems: Improve predictive maintenance and asset performance by leveraging Industry 4.0 and the Internet of Things (IoT). *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, 84775, 1-10. <https://doi.org/10.1115/JRC2021-58346>
- Bin, R., Samiul, S., Chakma, A., Chung, B., & Min, Y. (2023). Predictive maintenance in photovoltaic systems using ensemble ML empirical analysis. *Conference: 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 636-638. 10.1109/ICUFN57995.2023.10199326
- Bosman, L., Leon-Salas, W., Hutzler, W., & Soto, E. (2020). PV system predictive maintenance: Challenges, current approaches, and opportunities. *Energies*, 13(6), 1398. <https://doi.org/10.3390/en13061398>
- Buestán-Andrade, P., Santos, M., & Sierra-García, J. (2023). *MLP y CNN para predicción de variables de turbinas eólicas*. Servicio Editorial. <https://investigacion.ubu.es/documentos/6453edeab5d6a67124357b1a?lang=ca>
- Caicedo-Peñaranda, E., Pardo-García, A., Mantilla-Villalobos, M., & Pabón-Fernández, L. (2024). Avances recientes en inversores multifuncionales en sistemas fotovoltaicos. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 12(2), 243-248. <https://doi.org/10.15649/2346030X.4159>
- Campos-Olivares, D., Carrasco-Muñoz, A., Mazzoleni, M., Ferramosca, A., & Luque-Sendra, A. (2024). Revisión de alcance: evaluación de técnicas de aprendizaje automático en el mantenimiento predictivo. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 99(2), 159. 10.6036/10950
- Castellano, D., Garrido, M., Castaño, F., & Rubio, F. (2024). Diseño de gemelo digital de instalación fotovoltaica con herramientas gratuitas. *Jornadas de Automatización*, 45, 1-6. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10908>
- Castillo, L., Huamanchumo, A., & Lecca, M. (2024). El impacto de la aplicación de la tecnología de gemelos digitales en la cadena de suministro 4.0: Una revisión sistemática. *Gestión de Operaciones Industriales*, 3(1), 80-92. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/RINGIND/article/view/6046>
- Cedeño, Á., Edison, U., & Clemente, A. (2025). Análisis termográfico de los tableros eléctricos de la empresa alimentos CADE. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando*, 6(1), 1756. <https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i1.497>

Cervera-Gascó, J., Montero, J., & Miguel Moreno. (2021). AS-Solar, a tool for predictive maintenance of solar groundwater pumping systems. *Agronomy*, 11(11), 1356. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112356>

Chen, S. (2024). Advancing sustainability in mechanical engineering: Integration of green energy and intelligent manufacturing. *Applied and Computational Engineering*, 66, 150-155. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/66/20240937>

Çınar, Z., Abdussalam, A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M., & Safaei, B. (2020). Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0. *Sustainability*, 12(19), 8211. <https://doi.org/10.3390/su12198211>

Crespo, H., & Arias, C. (2024). Evolución del análisis de vibraciones en mantenimiento predictivo, en relación a los patrones de vibración en elementos mecánicos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 2444-2452. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12488

Cruz, D., & Lara, A. (2022). *Importancia del monitoreo de activos en tiempo real*. CMMShere. <https://cmmshere.com/wp-content/uploads/2022/10/art-CMMShere-octubre.pdf>

da Rocha, T., Szejka, A., Canciglieri, O., & Rocha, E. (2020). A preliminary discussion of the ACATECH 4.0 and AHP to measure enterprise maturity level index. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 143-150. 10.3233/ATDE200071

De Benedetti, M., Leonardi, F., Messina, F., Santoro, C., & Vasilakos, A. (2018). Anomaly detection and predictive maintenance for photovoltaic systems. *Neurocomputing*, 310, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.05.017>

de Prada, C., Galán-Casado, S., Pitarch, J., Sarabia, D., Galán, A., & Gutiérrez, G. (2022). Gemelos Digitales en la Industria de Procesos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 19(3), 285-296. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16901>

Deltavolt. (2024). *¿Cuánto se cobra por mantenimiento de paneles solares?* Deltavolt. <https://deltavolt.pe/general/cuanto-se-cobra-por-mantenimiento-de-paneles-solares/>

Faysal, A., Utpal, P., Mim, A., Durjoy, P., & Emdadul, H. (2022). Condition-based predictive maintenance of oil-wetted machinery by In service oil analysis: A comprehensive review. *International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering 2022 (ICMIME2022)*, 1-7. https://www.researchgate.net/publication/380682635_Condition-Based_Predictive_Maintenance_of_Oil-Wetted_Machinery_by_In-Service_Oil_Analysis_A_Comprehensive_Review?enrichId=rgreq-b98e002a50f63361d3f45948ae0386bc-XXX-&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM4MDY4MjYzN

Freepik. (2025a). *Energía fotovoltaica*. <https://www.freepik.com/>

Freepik. (2025b). *Paneles solares*. <https://www.freepik.com/>

García-García, J., Rey-López, J., & Osma-Pinto, G. (2023). Evaluación del desempeño de microrredes: una revisión. *TecnoLógicas*, 26(58), 1-25. <https://doi.org/10.22430/22565337.2656>

Garzón-Posada, A., Jiménez-Ramírez, M., & Gómez-Campos, L. (2022). Redes de colaboración empresarial para pymes: una revisión al estado del arte. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 30(1), 215-244. <https://doi.org/10.18359/rfce.5871>

Ghenai, C., Husein, L., Al Nahlawi, M., Hamid, A., & Bettayeb, M. (2022). Recent trends of digital twin technologies in the energy sector: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102837>

Gohel, H., Upadhyay, H., Lagos, L., Cooper, K., & Sanzetenea, A. (2020). Predictive maintenance architecture development for nuclear infrastructure using machine learning. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(7), 1436-1442. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.12.029>

González, B., & Guerrero, R. (2013). *Tecnología de células fotovoltaicas: Fundamentos, dispositivos avanzados y proceso de producción*. Editorial Académica Española. <https://acortar.link/3WY3mi>

Gorjian, S., Sharon, H., Ebadi, H., Kant, K., Bontempo, F., & Marco, G. (2021). Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems. *Journal of Cleaner Production*, 278, 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124285>

Grabowska, S. (2020). Smart factories in the age of Industry 4.0. *Management Systems in Production Engineering*, 2(28), 90-96. <https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0014>

Gruezo-Valencia, D., & Solis-Mora, V. (2022). Inversores inteligentes de energía solar fotovoltaica. *Polo del Conocimiento*, 7(4), 1246-1266. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i4.3887>

Gualapuro, J., Trujillo, D., & Morales, Y. (2025). Aplicaciones del Internet de las cosas (IoT) en la Industria Electromecánica para la recolección, análisis y monitoreo en tiempo real. *Revista Ingenio Global*, 4(1), 88-104. <https://doi.org/10.62943/rig.v4n1.2025.163>

Gualoto, E., & Mendoza, Á. (2024). Análisis de un estudio para la viabilidad de un sistema fotovoltaico conectado a la red dentro del instituto superior universitario central técnico en la oficina de la carrera de electricidad. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(1), 2260-2276. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i1.1744>

Guzmán, J., & Hincapié, E. (2024). Gemelos digitales, metaverso y cognición mediada. Sistemas de captura para el desarrollo de ambientes digitales. *Cuadernos Del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, 224, 217-236. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi224.11297>

Hassan, Q. (2021). Evaluation and optimization of off-grid and on-grid photovoltaic power system for typical household electrification. *Renewable Energy*, 164, 375-390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.008>

Hespeler, S., Nemati, H., Masurkar, N., Alvidrez, F., Marvi, H., & Dehghan-Niri, E. (2024). Deep learning-based time-series classification for robotic inspection of pipe condition using non-contact ultrasonic testing. *Journal of Non-destructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*, 7(1), 011002-1-011002–011017. <https://doi.org/10.1115/1.4063694>

Izam, N., Itam, Z., Leong, W., & Syamsir, A. (2022). Sustainable development perspectives of solar energy technologies with focus on solar Photovoltaic—A review. *Energies*, 15(8), 1-15. <https://doi.org/10.3390/en15082790>

Jumilla, A., Medrano, Z., Mayorga, P., Magaña, H., & Camarillo, M. (2023). Análisis del comportamiento de la distorsión armónica de corriente en inversores interconectados a la red eléctrica, mediante el uso de metodología de diseño experimental. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 6(1), 1-13. <https://doi.org/10.37636/recit.v6n1e239>

- Jung, W.-K., Kim, D.-R., Lee, H., Lee, T.-H., Yang, I., Youn, B., Zontar, D., Brockmann, M., Brecher, C., & Ahn, S.-H. (2021). Appropriate Smart Factory for SMEs: Concept, Application and Perspective. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22, 201-215. <https://doi.org/10.1007/s12541-020-00445-2>
- Kalsoom, T., Ramzan, N., Ahmed, S., & Ur-Rehman, M. (2020). Advances in sensor technologies in the era of smart factory and industry 4.0. *Sensors*, 20(23), 6783. <https://doi.org/10.3390/s20236783>
- Konneh, K., Masrur, H., Othman, M., Abdul, N., Hizam, H., Zahurul, S., Crossley, P., & Senjyu, T. (2021). Optimal design and performance analysis of a hybrid off-grid renewable power system considering different component scheduling, PV modules, and solar tracking systems. *IEEE Access*, 9, 64393–64413. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3075732>
- Kruitwagen, L., Story, K., Friedrich, J., Byers, L., Skillman, S., & Hepburn, C. (2021). A global inventory of photovoltaic solar energy generating units. *Nature*, 598(7882), 604-610. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03957-7>
- Laisequilla, I. (2025). *Todo sobre cadena de suministro*. IL Publishing house. <https://acortar.link/IPWI0n>
- Ledmaoui, Y., El Maghraoui, A., El Aroussi, M., & Saadane, R. (2025). Review of recent advances in predictive maintenance and cybersecurity for solar plants. *Sensors*, 25(1), 206. <https://doi.org/10.3390/s25010206>
- Li, X., He, Z., Xia, S., & Yang, Y. (2024). Greenness change associated with construction and operation of photovoltaic solar energy in China. *Renewable Energy*, 226(120461), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120461>
- Linares, P. (2018). La transición energética. *Ambienta: La Revista del Ministerio de Medio Ambiente*, 125, 20-31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6950387>
- Mafla, C., Castejón, C., & Rubio, H. (2022). Mantenimiento predictivo en tractores agrícolas. Propuesta de metodología orientada al mantenimiento conectado. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 26(1), 63-76. <https://doi.org/10.5944/ribim.26.1.42176>
- Magnus, C. (2023). Smart factory mapping and design: methodological approaches. *Production Engineering*, 17(5), 753-762. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01193-8>

- Maldonado, Y. (2021). *10 Fuentes de energías renovables y no renovables*. Geologíaweb. <https://geologiaweb.com/recursos-naturales/fuentes-energia-renovables-no-renovables/>
- Marangis, D., Livera, A., Tziolis, G., Makrides, G., Kyprianou, A., & Georghiou, G. (2024). Trend-Based predictive maintenance and fault detection analytics for photovoltaic power plants. *Solar RRL*, 8(24), 1-10. <https://doi.org/10.1002/solr.202400473>
- Martín, N., & Fernández, I. (2019). *La envolvente fotovoltaica en la arquitectura*. Reverte. <https://acortar.link/9EBYEz>
- Milošević, M., Đurđev, M., Lukić, D., Antić, A., & Ungureanu, N. (2020). Intelligent process planning for smart factory and smart manufacturing. *Proceedings of 5th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*, 205-214. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46212-3_14
- Mitrašinović, A. (2021). Photovoltaics advancements for transition from renewable to clean energy. *Energy*, 237, 121510. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121510>
- Molęda, M., Małysiak-Mrozek, B., Ding, W., Sunderam, V., & Mrozek, D. (2023). From corrective to predictive maintenance—A review of maintenance approaches for the power industry. *Sensors*, 23(13), 5970. <https://doi.org/10.3390/s23135970>
- Mostefa, C., Amrouche, B., Benyoucef, A., Kara, K., & Chouder, A. (2020). New intelligent fault diagnosis (IFD) approach for grid-connected photovoltaic systems. *Energy*, 211(118591), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118591>
- Nabti, M., Bybi, A., Chater, E. A., & Garoum, M. (2022). Machine learning for predictive maintenance of photovoltaic panels: cleaning process application. *E3S Web of Conferences*, 336(00021), 1-5. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202233600021>
- Nat Geo. (2022). *La energía solar y su potencial para ayudar a reducir el calentamiento global*. National Geographic. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/04/la-energia-solar-y-su-potencial-para-ayudar-a-reducir-el-calentamiento-global>

- Noguera, L., & Fernández, M. (2023). IoT para supervisión y control de procesos industriales de fabricación inteligente en tiempo real. *Revista Científica Creando Ingenios*, 3(2), 1-23. <https://creandoingenios.net/index.php/revista/article/view/22>
- Olorunshogo, B., Azubuike, C., & Sanni, A. (2024). Recent advances in solar photovoltaic technologies: Efficiency, materials, and applications. *GSC Advanced Research and Reviews*, 20(1), 159-175. 10.30574/gscarr.2024.20.1.0259
- Osmani, K., Haddad, A., Lemenand, T., Castanier, B., & Ramadan, M. (2020). A review on maintenance strategies for PV systems. *Science of The Total Environment*, 746(141753), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141753>
- Osterrieder, P., Budde, L., & Friedli, T. (2020). The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 221, 107476. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.08.011>
- Paredes, J., & Romero, C. (2025). Algoritmos de machine Learning usados en mantenimiento predictivo: un mapeo sistemático de literatura. *Perspectivas*, 7(1), 31-47. <https://doi.org/10.47187/perspectivas.7.1.227>
- Pech, M., Vrchota, J., & Bednář, J. (2021). Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory. *Sensors*, 21(4), 1-40. <https://doi.org/10.3390/s21041470>
- Pinzón, C. (2023). *Tipos de mantenimiento*. CMMShere. <https://cmmshere.com/wp-content/uploads/2023/01/art-CMMShere-tipos-mantenimiento.pdf>
- Quiñonez, I., & Trujillo, D. (2024). Estudio de la integración de IoT con sistemas de generación fotovoltaica OFF-GRID. *Dominio de las Ciencias*, 10(1), 87-103. <https://doi.org/10.23857/dc.v10i1.3701>
- Qureshi, U., Rashid, A., Altini, N., Bevilacqua, V., & La Scala, M. (2024). Radiometric infrared thermography of solar photovoltaic systems: An explainable predictive maintenance approach for remote aerial diagnostic monitoring. *Smart Cities*, 7(3), 1261-1288. <https://doi.org/10.3390/smartcities7030053>
- Renewable Energy. (2025). *Innovación en el sector fotovoltaico: el camino hacia un futuro sostenible*. Renewable Energy Magazine. <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/innovacion-en-el-sector-fotovoltaico-el-camino-20241007>

Resman, M., Turk, M., & Heraković, N. (2021). Methodology for planning smart factory. *Procedia CIRP*, 97, 401-406. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.258>

Ryalat, M., ElMoaqet, H., & AlFaouri, M. (2023). Design of a smart factory based on cyber-physical systems and Internet of Things towards Industry 4.0. *Applied Sciences*, 13(4), 2156. <https://doi.org/10.3390/app13042156>

Samkria, R., Abd-Elnaby, M., Singh, R., Gehlot, A., Rashid, M., Aly, M., & El-Shafai, W. (2021). Automatic PV grid fault detection system with IoT and LabVIEW as data logger. *Comput. Mater. Contin.*, 69, 1709-1723. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.018525>

Sánchez, L., Morales, Y., & Trujillo, D. (2024). Revisión sistemática de literatura sobre la incidencia de la Tecnología CNC en la Industria 4.0. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 11(2), 145-155. <https://doi.org/10.26423/rctu.v11i2.801>

Sancho, J. (2023). *Montaje y mantenimiento mecánico*. Ediciones Paraninfo, S.A. <https://acortar.link/ZwWo9F>

Sandoval-Ruiz, C. (2024). e-KiteLab: Investigación en física aplicada para mantenimiento y optimización de sistemas de energías renovables. *Revista Investigación & Desarrollo*, 24(1), 95-105. <https://doi.org/10.23881/idupbo.024.1-8i>

Sasidharan, S., Herzog, F., Wong, J., & Harney, R. (2019). Future of PV production: Impact of digitalization and self-learning concepts on wafer, solar cell and module production. *Photovoltaics International*, 16-26. <https://www.pv-tech.org/technical-papers/future-of-pv-production-impact-of-digitalization-and-selflearning-concepts-on-wafer-solar-cell-and-module-production/>

Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L., & Xu, X. (2020). Smart factory in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 607-617. <https://doi.org/10.1002/sres.2704>

Sierra, M., Vásquez, C., & Ramirez, R. (2020). Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas Final disposal and environmental impact of photovoltaic cells. *Publicaciones En Ciencias y Tecnología*, 14(2), 74-90. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.36089.60004/1>

Sjödin, D., Parida, V., Leksell, M., & Petrovic, A. (2018). Smart factory implementation and process innovation. *Research-Technology Management*, 61(5), 22-31. <https://doi.org/10.1080/08956308.2018.1471277>

Sotema. (2024). *El futuro de la energía solar: Tendencias y avances tecnológicos*. Sotema. <https://sotematm.com/2024/03/23/el-futuro-de-la-energia-solar-tendencias-y-avances-tecnologicos/>

STEL Order. (2023). *Mantenimiento predictivo: Qué es y pasos para hacerlo correctamente*. STEL Order. <https://www.stelorder.com/blog/mantenimiento-predictivo/>

Torres-Sainz, R., Pérez-Vallejo, L., Trinchet-Varela, C., Pérez-Rodríguez, R., & de la Rosa, J. (2024). Criterios de criticidad y complejidad para la toma de decisiones de mantenimiento: una revisión de la literatura. *Mecánica*, 27(2), 7-18. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442024000200007

Universidad Europea. (2023). *Cómo convertirse en un ingeniero de energías renovables en España*. UE. [https://universidadeuropea.com/blog/ingeniero-energias-renovables/#:~:text=La figura del ingeniero de,\(cuantas más%2C mejor\).](https://universidadeuropea.com/blog/ingeniero-energias-renovables/#:~:text=La figura del ingeniero de,(cuantas más%2C mejor).)

Urbano, E., & Martínez, V. (2020). Energy infrastructure of the factory as a virtual power plant: Smart energy management. *IntechOpen*, 27-48. 10.5772/intechopen.88861

Vargas, G., Otálora, L., Gil, S., & Díaz, J. (2019). Aprovechamiento de la energía solar para el Área Académica de la Escuela de Aviación Policial mediante un sistema fotovoltaico con conexión a red. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 11(2), 46-59. <https://doi.org/10.22335/rlct.v11i2.446>

Vivanco, E. (2020). *Energías renovables y no renovables. Ventajas y desventajas de ambos tipos de energía*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/asesoriasparlamentarias/detalle_documento.html?id=76392

Wang, Y., Wang, R., Tanaka, K., Ciais, P., Penuelas, J., Balkanski, Y., Sardans, J., Hauglustaine, D., Liu, W., Xing, X., Li, J., Xu, S., Xiong, Y., Yang, R., Cao, J., Chen, J., Wang, L., Tang, X., & Zhang, R. (2023). Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China. *Nature*, 619(7971), 761-767. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06180-8>

Whittemore, R., & Knafl, K. (2005). The integrative review: updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, 52(5), 546-553. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x>

Wolniak, R., & Skotnicka-Zasadzień, B. (2022). Development of photovoltaic energy in EU countries as an alternative to fossil fuels. *Energies*, 15(2), 1-23. <https://doi.org/10.3390/en15020662>

Zarco, J. (2023). *Mantenimiento predictivo en centrales fotovoltaicas a gran escala*. PV Magazine. <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/09/11/mantenimiento-predictivo-en-centrales-fotovoltaicas-a-gran-escala/>

SOBRE LOS AUTORES

Reynaldo Condori Yucra

Universidad Nacional de Juliaca

<https://orcid.org/0000-0002-6905-2170>

Junior Torres Yucra

Universidad Nacional de Juliaca

<https://orcid.org/0000-0001-9789-9013>

Vilma Sarmiento Mamani

Universidad Nacional de Juliaca

<https://orcid.org/0000-0002-5520-716X>

Norman Jesús Beltrán Castañón

Universidad Nacional del Altiplano

<https://orcid.org/0000-0002-1597-2991>

MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y SMART FACTORY EN SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

WWW.ARCOEDITORES.COM
CONTATO@ARCOEDITORES.COM
(55)99723-4952

