



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales  
ICADE

# **INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA A LAS ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Mario Cavestany García-Matres  
Director: David Hernández García

MADRID | Junio 2025

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
<b>Energías Renovables</b> .....	5
<b>Inteligencia Artificial</b> .....	5
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	8
<b>Tecnologías de IA utilizadas en las renovables</b> .....	8
<b>Casos de uso en la Unión Europea</b> .....	9
CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PROYECTOS DE ENERGÍA RENOVABLE A TRAVÉS DE LA IA.....	11
<b>IA para la optimización del diseño</b> .....	11
<b>IA para la optimización de implementación</b> .....	12
<b>IA para la optimización del mantenimiento</b> .....	13
CAPÍTULO 5. GESTIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	15
<b>Desafíos actuales con el almacenamiento</b> .....	15
<b>Soluciones que aporta la IA</b> .....	15
CAPÍTULO 6. INTEGRACIÓN DE LAS RENOVABLES EN LA RED ELÉCTRICA .....	17
<b>Problemas tradicionales de integración</b> .....	17
<b>IA para la gestión y estabilidad de la red</b> .....	18
CAPÍTULO 7. INNOVACIONES IMPULSADAS POR IA EN ENERGÍA RENOVABLE .....	20
<b>Casos de uso reales</b> .....	20
<b>IA en energía eólica</b> .....	20
<b>IA en energía solar</b> .....	21
<b>IA en almacenamiento de energía</b> .....	22
<b>IA en energía hidroeléctrica</b> .....	23
<b>Tabla resumen de proyectos con IA en Energías Renovables</b> .....	25
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.....	26
<b>Resumen de resultados clave</b> .....	26
<b>Implicaciones para la Industria de Energías Renovables</b> .....	26
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA.....	28

## Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado

**ADVERTENCIA:** Desde la Universidad consideramos que ChatGPT u otras herramientas similares son herramientas muy útiles en la vida académica, aunque su uso queda siempre bajo la responsabilidad del alumno, puesto que las respuestas que proporciona pueden no ser veraces. En este sentido, NO está permitido su uso en la elaboración del Trabajo fin de Grado para generar código porque estas herramientas no son fiables en esa tarea. Aunque el código funcione, no hay garantías de que metodológicamente sea correcto, y es altamente probable que no lo sea.

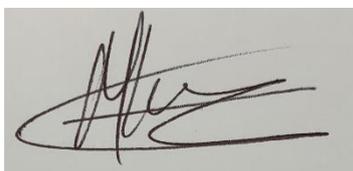
Por la presente, yo, [Nombre completo del estudiante], estudiante de [nombre del título] de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado "[Título del trabajo]", declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa ChatGPT u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación [el alumno debe mantener solo aquellas en las que se ha usado ChatGPT o similares y borrar el resto. Si no se ha usado ninguna, borrar todas y escribir "no he usado ninguna"]:

1. **Brainstorming de ideas de investigación:** Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación.
2. **Referencias:** Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
3. **Constructor de plantillas:** Para diseñar formatos específicos para secciones del trabajo.
4. **Corrector de estilo literario y de lenguaje:** Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
5. **Sintetizador y divulgador de libros complicados:** Para resumir y comprender literatura compleja.
6. **Revisor:** Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
7. **Traductor:** Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las referencias adecuadas en el TFG y he explicitado para que se ha usado ChatGPT u otras herramientas similares). Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 03/06/2025

Firma:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. H.', written over a light gray rectangular background.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la era contemporánea, la sostenibilidad ha emergido como un pilar fundamental del desarrollo global. Este concepto busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. La creciente preocupación por el cambio climático, la disminución de recursos naturales y la necesidad de un desarrollo económico equilibrado han impulsado la adopción de prácticas y tecnologías sostenibles en diversos sectores. En este contexto, las energías renovables se destacan como una solución crítica para mitigar los efectos negativos del uso de combustibles fósiles y promover un futuro energético más limpio y seguro. Fuentes de energía como la solar, eólica, hidráulica y biomasa ofrecen alternativas sostenibles que no sólo reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también disminuyen la dependencia de recursos no renovables y fomentan la conservación del medio ambiente [1][2].

A medida que las energías renovables se convierten en un componente cada vez más importante del mix energético global, surge la necesidad de optimizar su diseño, implementación y gestión. Aquí es donde la inteligencia artificial (IA) juega un papel transformador. La IA, definida como la capacidad de las máquinas para realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como el aprendizaje, la percepción y la toma de decisiones, se ha convertido en una herramienta esencial para abordar los desafíos complejos de la transición energética. La inteligencia artificial no solo permite el análisis y procesamiento de grandes volúmenes de datos con una precisión y velocidad inigualables, sino que también facilita la automatización de procesos y la toma de decisiones en tiempo real [3][4].

En el ámbito de las energías renovables, la IA ofrece una amplia gama de aplicaciones que mejoran la eficiencia y efectividad de los sistemas energéticos. Por ejemplo, los algoritmos de IA pueden prever la producción de energía renovable con una alta precisión, lo que permite a los operadores de la red eléctrica gestionar mejor la oferta y la demanda de energía. Además, la IA puede optimizar el almacenamiento de energía, garantizando un suministro constante incluso cuando las condiciones ambientales no son favorables. También juega un papel crucial en la integración de energías renovables en la red eléctrica, ayudando a mantener la estabilidad y la resiliencia del sistema [6][7][8].

Esta integración de la inteligencia artificial con las energías renovables no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a una transición energética más sostenible y resiliente. Al aprovechar el potencial de la IA, es posible superar muchas de las barreras tradicionales asociadas con las energías renovables, como la intermitencia y la variabilidad de la producción. En última instancia, la aplicación de la IA en este sector no solo representa un avance tecnológico significativo, sino que también simboliza un paso crucial hacia un futuro más sostenible y equilibrado.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### Energías Renovables

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas [2]. Sus principales características son que son inagotables y que no producen gases de efecto invernadero ni emisiones contaminantes. Estas fuentes son imprescindibles para combatir el cambio climático y reducir la dependencia energética; en cualquier parte del planeta podemos encontrar sol, viento, agua o materia orgánica. Por otro lado, las energías renovables son crecientemente competitivas. Gracias a las economías de escala y la innovación las energías renovables, no solamente suponen la solución más sostenible, sino que también están llegando a ser la más económica. Como se ha mencionado anteriormente, las fuentes de las energías renovables provienen de recursos naturales, lo que da lugar a diferentes tipos de energía según la fuente de la que se obtienen. Existen muchos tipos todavía en desarrollo, pero los principales tipos y los más consolidados a día de hoy son los siguientes:

- **Energía Solar:** Se obtiene a partir de la radiación solar. Dentro de la energía solar existen dos tipos: la fotovoltaica y la solar térmica. La energía solar fotovoltaica es la que transforma la luz solar en electricidad mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos. La energía solar térmica en cambio aprovecha el calor del sol mediante colectores térmicos que absorben y concentran dicho calor.
- **Energía Eólica:** Proviene del viento. Utiliza la fuerza del viento a través de aerogeneradores para producir electricidad. En función de la ubicación del parque eólico podemos distinguir 2 tipos: eólica terrestre u *on shore* y eólica marina u *off shore*.
- **Energía Hidráulica:** Aprovecha la energía del agua en movimiento en embalses y ríos y la transforma en electricidad con el uso de centrales hidroeléctricas. Las centrales pueden ser centrales hidroeléctricas de embalse, de agua fluyente y reversibles o de bombeo.
- **Biomasa:** Produce energía a partir de la materia orgánica, ya sea vegetal o animal. A partir de la biomasa se puede obtener el biogás o otros biocombustibles que son neutros en carbono.
- **Geotérmica:** Utiliza el calor del interior de la Tierra para generar electricidad o proporcionar calefacción. Solamente se puede aprovechar en localizaciones con características concretas, se encuentra principalmente en fuentes termales, geiseres y volcanes [1] [9] [10].

### Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA) es una tecnología que permite a ordenadores y máquinas simular la inteligencia humana y su capacidad para resolver problemas [5]. En la simulación de procesos de inteligencia humana se incluyen el aprendizaje, que implica la adquisición de información y la formulación de reglas para utilizar la información de manera efectiva; el razonamiento, que consiste en utilizar reglas para llegar a conclusiones; y la autocorrección, que permite a los sistemas ajustar y mejorar sus respuestas basándose en la retroalimentación recibida.

La Inteligencia Artificial ha logrado simplificar la vida del ser humano en muchos ámbitos ya que sus capacidades son muy amplias. En primer lugar, la IA permite a las máquinas comprender e interactuar con el lenguaje humano a través del Procesamiento del Lenguaje Natural (NLP). Además, permite a las máquinas interpretar y comprender el mundo visual, realizar sistemas de recomendación, automatizar tareas repetitivas y rutinarias y finalmente, el aprendizaje automático o *Machine learning*. El *Machine learning* permite a los sistemas aprender y mejorar automáticamente a partir de la experiencia sin ser programados explícitamente [4][5][10].

Una vez se saben todas las capacidades de la inteligencia artificial, sus aplicaciones son infinitas y abarcan una gran cantidad de campos. Algunos ejemplos del uso de IA en el presente son los siguientes:

- **Asistentes virtuales:** Los que se conocen por los nombres de Siri o Alexa. Son herramientas incorporadas en los dispositivos para facilitar su uso al usuario. Usando algoritmos de *machine learning* comprenden y responden a las preguntas y comandos del usuario.
- **Automatización industrial y robótica:** Se utiliza para automatizar ciertos procesos industriales y mejorar la eficiencia en la fabricación. Los robots y sistemas autónomos emplean algoritmos de IA para realizar tareas complejas de manera eficiente y segura, como por ejemplo, en actividades de fabricación y ensamblaje. Además, se puede automatizar también el mantenimiento preventivo de instalaciones y maquinaria, el control de procesos, la logística y la gestión de inventario.
- **Análisis de datos y predicción:** Es capaz de analizar grandes volúmenes de datos y predecir comportamientos o tendencias. Por ello, es muy útil en análisis financiero, marketing, medicina y en la investigación científica.
- **Traducción automática:** Permite la traducción de textos o voces de un idioma a otro de manera instantánea y automática.
- **Medicina y salud:** Sus aplicaciones van desde desarrollar un tratamiento especializado para un paciente a el diagnóstico, la investigación, monitorización de pacientes y sistemas de gestión.
- **Servicios financieros:** Debido a su gran capacidad de análisis de datos, entre otros muchos aspectos, la IA puede ser de gran utilidad en la detección de tendencias y patrones para tomar decisiones de inversión menos arriesgadas.
- **Energía y sostenibilidad:** La IA puede aportar soluciones de optimización de diseño, implementación y gestión de proyectos, soluciones para el almacenamiento de energía, sistemas predictivos de producción de energía y ayudas para una mejor integración de las renovables a la red eléctrica. [11]

### **Beneficios Potenciales de la IA en las Energías Renovables**

La inteligencia artificial en el sector de las energías renovables tiene muchas aplicaciones potenciales. La IA puede analizar grandes volúmenes de datos para diseñar proyectos más eficientes y rentables, teniendo en cuenta variables como el clima, la geografía y los patrones de consumo energético. Además, mediante el *machine learning*, es posible optimizar la planificación y ejecución de proyectos, así como mejorar la explotación y el mantenimiento predictivo.

La IA también permite predecir con mayor precisión la producción de energía renovable, lo que facilita la integración de estas fuentes en la red eléctrica y mejora la estabilidad del suministro. Los algoritmos de IA optimizan el uso de sistemas de almacenamiento de energía, garantizando un suministro constante y eficiente incluso cuando las condiciones ambientales no son favorables. Por último, la IA ayuda a gestionar la distribución de energía, equilibrando la oferta y la demanda, y mejorando la resistencia de la red frente a fluctuaciones en la producción de energía renovable [6][7][8].

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### Tecnologías de IA utilizadas en las renovables

La integración de la inteligencia artificial (IA) en el sector europeo de energías renovables emplea una amplia gama de técnicas, principalmente centradas en el aprendizaje automático (*machine learning*) y el aprendizaje profundo (*deep learning*). Estos métodos sofisticados son cada vez más reconocidos por su capacidad para mejorar la eficiencia, la optimización y la gestión general de los sistemas de energía limpia en todo el mundo [13]. La adopción de sistemas de inteligencia artificial más sofisticados satisface la necesidad de analizar y comprender de manera efectiva la información compleja proveniente de las energías renovables, cuyo comportamiento varía según factores climáticos y ambientales.

El *machine learning* destaca como una herramienta fundamental en este panorama energético, ofreciendo soluciones para optimizar los sistemas energéticos, reducir costes operativos y mejorar la eficiencia. Su amplia aplicabilidad permite desarrollar algoritmos que pueden entrenarse con datos históricos para prever la generación futura de energía, asignar recursos estratégicamente y, finalmente, mejorar el rendimiento de las instalaciones de energía renovable.

Dentro del ámbito de la IA, varias técnicas específicas están siendo utilizadas activamente en el sector europeo de energías renovables. Estas incluyen el *deep learning*, que sobresale en la mejora de las previsiones energéticas a corto plazo y en la gestión energética [13]. Las redes neuronales (*neural networks*), elemento central del *deep learning*, se emplean para dimensionar y simular comunidades energéticas limpias, incluyendo sistemas híbridos fotovoltaicos-eólicos, soluciones de almacenamiento energético y estaciones de carga de vehículos eléctricos [13]. Estas redes también desempeñan un papel crucial en la predicción de energía eólica, contribuyendo a una mayor eficiencia y reducción de costes de mantenimiento en los parques eólicos [13]. Las técnicas de *machine learning*, más allá del *deep learning*, se aplican en la predicción de la producción de energías renovables [13]. Las redes neuronales convolucionales (*Convolutional Neural Networks, CNNs*), tradicionalmente asociadas al reconocimiento de imágenes, tienen relevancia en la energía limpia para optimizar la ubicación de paneles solares, identificar patrones en el consumo energético y predecir posibles fallos en sistemas mediante datos visuales [13]. Las redes neuronales recurrentes (*Recurrent Neural Networks, RNNs*), con su capacidad para procesar datos secuenciales, se utilizan para predecir el consumo energético basándose en patrones históricos, particularmente en la gestión de la red y la previsión de la demanda. Las redes de memoria a corto y largo plazo (*Long Short-Term Memory, LSTM*), un tipo especializado de RNN, también se emplean en la predicción de la velocidad del viento [13]. Las redes generativas antagónicas (*Generative Adversarial Networks, GANs*) sirven para simular diversos escenarios energéticos, ayudando a los investigadores a comprender resultados potenciales sin necesidad de pruebas reales [13].

Técnica IA	Principales aplicaciones en las energías renovables
Deep Learning	Mejora de previsiones energéticas a corto plazo, mejora de la gestión energética, predicción de la potencia eólica
Neural Networks	Dimensionamiento y simulación de comunidades energéticas limpias (híbridos fotovoltaicos-eólicos, almacenamiento, carga de vehículos eléctricos), predicción de energía eólica para eficiencia y reducción de mantenimiento
Machine Learning	Optimización de sistemas energéticos, predicción de la producción de energías renovables (por ejemplo, radiación solar), reducción de costos, mejora de eficiencia
Convolutional Neural Networks (CNNs)	Optimización de la ubicación de paneles solares, identificación de patrones en el consumo energético, predicción de fallos en sistemas mediante señales visuales
Recurrent Neural Networks (RNNs)	Predicción del consumo energético basada en patrones históricos, gestión de la red eléctrica, previsión de la demanda
Long Short-Term Memory (LSTM)	Predicción de la velocidad del viento, gestión de la variabilidad e incertidumbre en la generación de energías renovables
Generative Adversarial Networks (GANs)	Simulación de diversos escenarios energéticos para investigación y comprensión de resultados potenciales

### Casos de uso en la Unión Europea

La Unión Europea está promoviendo activamente el avance y la adopción de la IA en el sector energético mediante diversas iniciativas. Un ejemplo destacado es el proyecto I-ENERGY financiado por la UE, que busca desarrollar una plataforma de IA bajo demanda que ofrece servicios prácticos y orientados a la industria energética [14]. Este proyecto está focalizado en reducir la brecha entre la investigación en IA y su aplicación real en la industria energética, abordando desafíos clave como los costes asociados a la integración de soluciones de IA y las

posibles vulnerabilidades de ciberseguridad.

Aunque hoy la información disponible menciona que la implementación de IA en proyectos europeos de energías renovables podría requerir investigaciones más profundas, sí que se destacan varias áreas claves en las que la IA está logrando avances significativos. Estas incluyen la optimización de la infraestructura energética, la mejora de las funcionalidades de redes inteligentes (*smart grids*), la precisión en la previsión de energías renovables, la gestión de la demanda energética y la optimización de las soluciones de almacenamiento energético [15]. Estas áreas representan aspectos fundamentales en la transición hacia energías renovables, donde las capacidades de la IA pueden aportar un valor diferencial.

Proyectos en curso ilustran adicionalmente la implementación práctica de la IA en Europa. Por ejemplo, el proyecto AI-EFFECT está lanzando cuatro demostraciones en diferentes países europeos, Dinamarca, Holanda, Portugal y Alemania, enfocadas en casos de uso como sistemas multi-energía, gestión de la congestión en la red, mejora de la eficiencia energética e integración de Recursos Energéticos Distribuidos (*Distributed Energy Resources, DER*) [15]. Estas demostraciones buscan probar y validar aplicaciones de IA en sistemas energéticos reales, contribuyendo al establecimiento de una Instalación Europea de Pruebas y Experimentación de IA, promoviendo el desarrollo y entrenamiento de modelos colaborativos de IA para el sector energético.

De manera similar, el proyecto I-ENERGY llevó a cabo pruebas en su prototipo en nueve pilotos que abarcan quince casos de uso distintos. Estos incluyen la optimización de redes eléctricas y de calefacción urbana, la integración de fuentes renovables en edificios y la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo [14].

La evaluación del impacto de la IA en proyectos europeos de energías renovables se basa en varios criterios clave, incluyendo la reducción de costes, mejoras en eficiencia, aumento en la producción energética e impacto ambiental. Los objetivos generales que impulsan la adopción de IA en este sector son mejorar la eficiencia, fortalecer la resiliencia y promover la sostenibilidad dentro de la infraestructura energética [16]. Estos objetivos se traducen en beneficios tangibles como la reducción de facturas energéticas para los consumidores, la atracción de mayores inversiones en proyectos de energía renovable y una disminución en el tiempo necesario para la conexión a la red [17].

La IA demuestra un potencial significativo en la lucha contra el cambio climático, particularmente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, a través de la optimización de energías renovables [18]. Su impacto se demuestra en mejoras concretas como la maximización del rendimiento en paneles solares y turbinas eólicas, así como en sistemas avanzados de monitoreo que permiten detectar fallos de forma anticipada [19]. Estas aplicaciones no solo aumentan la eficiencia operativa, sino que también contribuyen a reducir los costes de mantenimiento y mejorar la disponibilidad de los sistemas energéticos renovables.

## CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PROYECTOS DE ENERGÍA RENOVABLE A TRAVÉS DE LA IA

### IA para la optimización del diseño

La IA está desempeñando un papel crucial en la optimización del diseño de proyectos de energía solar y eólica, desde la selección inicial del sitio hasta la disposición detallada de las instalaciones. Tradicionalmente, el diseño de proyectos involucraba estudios manuales de viabilidad y modelos simplificados, pero los algoritmos impulsados por IA permiten un enfoque más sofisticado y focalizado en el análisis de datos. Por ejemplo, actualmente los planificadores utilizan algoritmos evolutivos y métodos avanzados de búsqueda para optimizar la disposición de parques eólicos y configuraciones de paneles solares. Al realizar miles de simulaciones, los algoritmos de IA iteran el modelo hasta la mejor ubicación de turbinas o paneles para maximizar la captura de energía y minimizar las pérdidas [20].

Este enfoque, prácticamente desconocido hace una década, es ahora posible gracias a la evolución tecnológica y al aumento de la capacidad de los ordenadores para procesar información. En el diseño de parques eólicos, se introducen datos geoespaciales y meteorológicos en modelos impulsados por IA para determinar la ubicación óptima de las turbinas. Herramientas que utilizan *machine learning* evalúan múltiples parámetros, como por ejemplo, mapas de recursos eólicos, características del terreno, proximidad a la red eléctrica, etc. para clasificar la idoneidad del sitio [20]. Un ejemplo incluye el uso de modelado interactivo 3D con IA: los ingenieros simulan diversas configuraciones de turbinas en un entorno virtual, probando rápidamente cómo se desempeñan diferentes distribuciones bajo condiciones reales (velocidades variables del viento, topografía) [20]. Estos modelos consideran interacciones complejas, como los efectos de estela entre turbinas, que los humanos con modelos en hojas de cálculo serían incapaces de resolver. Como resultado, los desarrolladores pueden identificar configuraciones que mejoran la producción esperada del parque eólico.

De manera similar, en las plantas solares, los algoritmos de IA se han utilizado para optimizar los ángulos de inclinación de los paneles, el espaciamiento entre filas y la ubicación de los inversores para asegurar la máxima captación de radiación solar durante todo el año [21][22]. Al automatizar la búsqueda entre innumerables combinaciones de diseño, la IA ayuda a lograr diseños de sistemas casi óptimos que equilibran el rendimiento energético con los costes y las restricciones de uso del terreno. Esto da como resultado proyectos que no solo son más eficientes, sino también rentables y adaptados a las condiciones locales. Es importante destacar que la optimización mediante IA en el diseño no se centra únicamente en la producción de energía, sino que también integra factores ambientales y regulatorios.

En resumen, los algoritmos de IA mejoran el diseño de proyectos al procesar grandes conjuntos de datos y evaluar innumerables escenarios para encontrar soluciones de diseño, las cuales la experiencia humana sería incapaz de alcanzar.

## IA para la optimización de implementación

Más allá del diseño inicial, la inteligencia artificial (IA) contribuye a las fases de planificación y ejecución de los proyectos de energías renovables, optimizando los cronogramas, la asignación de recursos y las estrategias de construcción. La planificación de proyectos puede beneficiarse de herramientas de programación impulsadas por IA que analizan numerosas variables (ventanas meteorológicas, disponibilidad de equipos, tasas de productividad del personal) para generar cronogramas de construcción eficientes. Por ejemplo, en grandes instalaciones eólicas marinas, los algoritmos de programación con IA pueden determinar la secuencia óptima para la instalación de turbinas y la colocación de cables, ajustándose a los tiempos previstos de inactividad debido al clima, minimizando así el costoso tiempo de espera de los buques [23].

Durante la ejecución, los sistemas de gestión de proyectos impulsados por IA monitorizan el progreso mediante sensores y drones, comparando los datos en tiempo real con el plan original. En caso de que surjan desviaciones del plan, como por ejemplo, el retraso en una fase, la IA puede re-organizar el cronograma o la logística de lo que queda de proyecto de la forma más eficaz posible. Algunos proyectos emplean agentes de aprendizaje para reprogramar automáticamente las actividades y recuperarse de retrasos, cumpliendo así con los plazos generales. Además, la optimización de la cadena de suministro mediante IA ayuda a garantizar que los componentes (turbinas, módulos solares, etc.) lleguen justo a tiempo, evitando costes de almacenamiento innecesarios y previniendo cuellos de botella. Aplicaciones en la vida real incluyen el software que utiliza *machine learning* para predecir tiempos de entrega y rutas óptimas de envío para componentes pesados, reduciendo así los costes logísticos alrededor de un 10% en la construcción de parques eólicos [24].

Durante la implementación de proyectos renovables, la visión artificial y la robótica integradas con IA han comenzado a aumentar la eficiencia. En las instalaciones de parques solares, los robots guiados por IA pueden colocar paneles o realizar inspecciones de calidad de los módulos instalados, guiados por algoritmos de planificación que garantizan la correcta ubicación de cada componente [25]. También se emplean drones equipados con análisis de imágenes basado en IA para supervisar el avance de la construcción y detectar tempranamente errores de instalación o daños en equipos. Al identificar rápidamente estos problemas, por ejemplo, una fila de paneles solares desalineada o un defecto en un componente de turbina, el equipo del proyecto puede abordarlos antes de que escalen, evitando así problemas futuros de rendimiento.

En general, la IA en la implementación conduce a la finalización más rápida y económica de los proyectos, reduce los errores humanos y mejora la coordinación al procesar muchos más datos y escenarios que los métodos tradicionales de planificación. En Europa, ya se están materializando estas ventajas de manera tangible. Un ejemplo destacado se encuentra en el sector eólico marino, donde diferentes empresas colaboradoras han implementado sistemas de planificación potenciados por IA. Estas herramientas facilitan la coordinación eficiente entre múltiples contratistas, logrando una reducción significativa en los tiempos de ejecución y una implementación más eficiente de los proyectos [23].

## IA para la optimización del mantenimiento

Después de que los proyectos renovables entran en operación, la IA es capaz de optimizar la gestión y el mantenimiento, asegurando que las instalaciones funcionen con máxima eficiencia y fiabilidad. Un área clave es la monitorización y el mantenimiento predictivo. Activos renovables como turbinas eólicas y paneles solares generan grandes cantidades de datos en tiempo real (vibraciones, temperaturas, producción eléctrica, etc.). Los sistemas de IA analizan estos datos para detectar anomalías que indican posibles fallos. Por ejemplo, en parques eólicos, los modelos de *machine learning* procesan datos provenientes de sensores en las cajas de engranajes y palas para reconocer patrones tempranos de desgaste. Al identificar cambios sutiles como por ejemplo, cambios en la frecuencia de vibración o picos de temperatura en los cojinetes de una turbina, la IA puede predecir con anticipación un fallo en un componente [20]. Esto permite que los equipos de mantenimiento intervengan de manera proactiva reemplazando o reparando la pieza durante un tiempo de inactividad programado, en lugar de reaccionar ante una avería.

El mantenimiento predictivo impulsado por IA ha demostrado reducir el tiempo de inactividad no planificado y los costes de reparación. El uso de IA por parte de General Electric (GE) para la monitorización de turbinas eólicas resultó en menos interrupciones repentinas y mayor disponibilidad general de las turbinas [26]. Según informes del sector, estas estrategias pueden reducir el tiempo de inactividad de turbinas alrededor del 30% y extender la vida útil de los componentes en un 20%, generando importantes ahorros y una mayor producción energética [27].

En los parques solares, el mantenimiento impulsado por IA implica analizar imágenes de drones para detectar defectos en paneles como grietas, acumulación de polvo o sombra causada por nuevos obstáculos. El reconocimiento de imágenes mediante IA puede identificar con precisión qué paneles o celdas están bajo rendimiento debido a suciedad o daños [28]. Después, los operadores pueden enviar robots de limpieza o técnicos directamente a esos lugares específicos, previniendo así la pérdida de energía.

Además del estado del equipo, la IA también ayuda en la gestión de recursos y el control operativo. Dado que la producción eólica y solar es variable, los operadores emplean IA para administrar de manera inteligente recursos como el almacenamiento de energía, generadores de respaldo y programas de respuesta a la demanda para equilibrar el suministro. Por ejemplo, los sistemas de IA en sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) optimizan los ciclos de carga y descarga basados en la generación renovable prevista y los precios de la electricidad, asegurando un uso eficiente del almacenamiento. Estos algoritmos pueden maximizar la vida útil de la batería al evitar ciclos innecesarios y predecir con precisión el estado de carga, abordando así un desafío clave en la gestión del almacenamiento de energía [29]. Un operador alemán de almacenamiento en baterías, por ejemplo, utiliza una plataforma de IA (ACCURE) que monitoriza continuamente los datos de las baterías y recomienda acciones para evitar estrés térmico o desequilibrios, previniendo así incidentes de seguridad y maximizando los ingresos de la batería por servicios de red [29].

En parques eólicos, los sistemas de control basados en IA ajustan en tiempo real los ángulos de las palas y las cargas del generador para responder más eficazmente a las condiciones cambiantes del viento, logrando una eficiencia adicional. Otro aspecto es la previsión de recursos: los modelos de IA predicen la irradiancia solar y la disponibilidad de viento a corto plazo, permitiendo a los operadores de las plantas programar mantenimientos en momentos que afecten menos la producción (por ejemplo, durante un período previsto de poco viento) [20].

En general, la monitorización y mantenimiento impulsados por IA resultan en una operación más resistente y eficiente. Especialmente en Europa, las grandes flotas de turbinas eólicas envejecidas se benefician enormemente del mantenimiento predictivo, permitiendo gestionar estos activos de manera segura más allá de su vida útil original. A medida que crecen las instalaciones renovables, la gestión de recursos basada en IA (por ejemplo, coordinando cientos de sitios solares con almacenamiento en una región) se vuelve esencial para manejar la complejidad de los recursos energéticos distribuidos. Estos sistemas inteligentes aseguran que la infraestructura renovable en Europa no solo sea construida óptimamente, sino que también opere de manera óptima durante toda su vida útil, con mínimo tiempo de inactividad y máxima producción.

## CAPÍTULO 5. GESTIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

### Desafíos actuales con el almacenamiento

A medida que crece la capacidad solar y eólica, el almacenamiento de energía se ha convertido en la pieza clave para equilibrar la oferta y la demanda, pero aun enfrenta varios desafíos. Uno de los principales desafíos es la intermitencia de las energías renovables: la producción de energía eólica y solar puede fluctuar ampliamente, y el almacenamiento (como baterías, hidroeléctrica por bombeo, etc.) debe suavizar estas fluctuaciones. Decidir cuándo cargar o descargar un sistema de baterías es complejo, ya que depende de pronósticos, necesidades de la red y precios del mercado. Otro desafío es la degradación y la vida útil de los sistemas de almacenamiento. Las baterías, por ejemplo, tienen un número limitado de ciclos y pueden degradarse más rápido si se operan bajo condiciones estresantes (como descargas profundas, tasas de carga/descarga altas, temperaturas extremas). La estabilidad de la red es otro problema: sin un control inteligente, la carga o descarga simultánea de muchas baterías (por ejemplo, vehículos eléctricos conectándose en horas pico) podría tensionar la red. Por lo tanto, se requiere una gestión avanzada para escalar y optimizar estas operaciones.

Existen también desafíos económicos: la rentabilidad del almacenamiento en un mercado depende de captar oportunidades de arbitraje de precios o de ofrecer servicios auxiliares (como la regulación de frecuencia), lo cual requiere una sincronización y predicción precisas. Estrategias ineficientes pueden dejar el almacenamiento subutilizado y sin rentabilidad.

En resumen, los desafíos en la gestión del almacenamiento de energía incluyen manejar la incertidumbre del suministro renovable, optimizar la carga y descarga para garantizar longevidad y seguridad, y coordinar múltiples activos de almacenamiento para apoyar eficazmente la red. Todos estos son problemas multivariables donde los métodos tradicionales se quedan cortos. Sin embargo, pueden ser mitigados con la aplicación de inteligencia artificial.

Además, los marcos regulatorios en Europa están impulsando la integración "inteligente" del almacenamiento; por ejemplo, las directivas de la UE fomentan el uso del almacenamiento para la regulación de frecuencia y la reducción de picos de demanda. Esto implica que el almacenamiento debe reaccionar rápida y adecuadamente ante desviaciones de frecuencia de la red o eventos de carga máxima, lo cual representa un reto porque debe decidir en tiempo real cuánto contribuir, sin conocer los eventos futuros de la red.

### Soluciones que aporta la IA

La inteligencia artificial ofrece diversas soluciones para abordar los actuales desafíos con el almacenamiento de energía. El *machine learning* y la analítica predictiva permiten que los sistemas de almacenamiento operen de manera más eficiente y segura al anticipar condiciones y tomar decisiones.

Una aplicación clave de la IA es en los sistemas de gestión energética inteligentes para almacenamiento. Estos sistemas utilizan algoritmos para decidir cuándo una batería debe

cargarse, mantenerse o descargarse, con el fin de maximizar objetivos como el beneficio por arbitraje energético, el autoconsumo renovable o el soporte a la red. Al aprender de los datos, como precios eléctricos pasados, patrones de demanda y pronósticos meteorológicos, la IA puede predecir los momentos óptimos para cargar con excedentes solares baratos o descargar para satisfacer la demanda pico. Por ejemplo, un *Energy Management System* (Sistema de gestión de Energía) con IA en una planta de baterías del Reino Unido utiliza una red neuronal para predecir los precios del día siguiente y la producción solar, y luego un agente programa las acciones de la batería para lograr los mayores ingresos con mínima degradación, superando significativamente a operadores humanos en pruebas. [23][30].

Otro ámbito de aplicación es el análisis de salud de baterías. La IA, especialmente técnicas como redes neuronales y algoritmos de detección de anomalías, puede analizar los flujos de datos de los sistemas de gestión de baterías para evaluar su estado de salud y predecir fallos. Empresas como ACCURE en Europa han desarrollado modelos de IA que procesan parámetros como tasas de carga/descarga, temperatura y voltajes de celdas de sistemas de baterías operativas, identificando problemas potenciales antes de que generen fallos [29]. Este tipo de información predictiva permite a los operadores tomar acciones preventivas (por ejemplo, reequilibrar celdas o revisar sistemas de refrigeración) para evitar pérdida de capacidad o condiciones peligrosas. La plataforma de ACCURE, por ejemplo, ayuda a prevenir eventos de fuga térmica al detectar señales tempranas, y puede anticipar necesidades de mantenimiento, reduciendo así el tiempo de inactividad de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías [29].

Por último, la IA también está abordando la coordinación de múltiples sistemas de almacenamiento: usando algoritmos para coordinar flotas de almacenamiento distribuido, como pueden ser miles de baterías domésticas o vehículos eléctricos. Agregadores en Europa emplean IA para convertir estas flotas en una planta virtual de energía. La IA pronostica la disponibilidad y las necesidades de cada unidad y envía señales óptimas de carga/descarga para que el conjunto se comporte como una gran batería única para servicios de red.

## CAPÍTULO 6. INTEGRACIÓN DE LAS RENOVABLES EN LA RED ELÉCTRICA

### Problemas tradicionales de integración

Integrar grandes proporciones de energía solar y eólica en la red eléctrica ha representado históricamente desafíos significativos. La variabilidad e intermitencia de estas fuentes es la causa principal de muchos problemas. La generación solar y eólica dependen del clima y este puede cambiar rápidamente: la solar cae por la noche o con nubosidad repentina, y el viento puede fluctuar o detenerse. Las redes eléctricas tradicionales fueron diseñadas para plantas de energía controlables y despachables, por lo que manejar estas fluctuaciones es complicado. Un problema clave es el equilibrio en tiempo real entre oferta y demanda. Los operadores de red deben mantener una frecuencia constante (por ejemplo, ~50 Hz en Europa), lo que requiere que la oferta coincida con la demanda en todo momento. Grandes errores de pronóstico o cambios repentinos en la producción renovable pueden generar desequilibrios; si no se gestionan, provocan desviaciones de frecuencia o requieren intervenciones de emergencia, como activar rápidamente turbinas de gas o desconectar carga. Antes del auge de las renovables, la red tenía más inercia rotacional proporcionada por grandes plantas térmicas, lo que amortiguaba naturalmente las variaciones de frecuencia. Pero el viento y el sol aportan poca inercia, lo que hace que la red sea potencialmente más inestable y sensible a fluctuaciones. Como vimos recientemente en España, la falta de inercia en el sistema puede incluso provocar apagones, dejando al país entero sin electricidad.

Otro problema es la congestión y la limitación (curtailment). Las plantas renovables a menudo se ubican lejos de los centros de consumo. Esto puede sobrecargar las líneas de transmisión si la producción eólica es alta, lo que obliga a los operadores a reducir la generación renovable para evitar sobrecargas. El curtailment equivale a energía verde desperdiciada y una pérdida económica.

Otra dificultad es la previsibilidad. Las plantas convencionales tienen horarios de producción conocidos, mientras que la producción renovable debe pronosticarse y siempre conlleva incertidumbre. Esta incertidumbre obliga a los operadores de red a contratar más reserva (reserva giratoria, plantas de arranque rápido) para estar en espera, lo que eleva los costes considerablemente. Además, complica el funcionamiento de los mercados eléctricos ya que, si fallan los pronósticos de renovables, puede haber picos de precios o precios negativos cuando el mercado intenta reequilibrarse.

Las preocupaciones sobre estabilidad y confiabilidad de la red incluyen mantener frecuencia y voltaje, pero también la estabilidad transitoria y la capacidad de soportar fallos. Con menos plantas tradicionales en operación, los fallos en la red (como un cortocircuito) provocan respuestas distintas del sistema. Las regulaciones han evolucionado para requerir que las renovables apoyen la red, pero sigue siendo un desafío técnico asegurar que la generación basada en ellas pueda soportar perturbaciones importantes.

La falta de flexibilidad en el resto del sistema también es un problema: muchas regiones históricamente tenían plantas de carbón o nucleares inflexibles que no pueden aumentar su producción rápidamente. Con altas renovables, la necesidad de flexibilidad (rampas rápidas, arranque inmediato, respuesta de la demanda) aumenta. Sin suficiente flexibilidad, las redes enfrentan con mayor frecuencia exceso de oferta o déficit. Europa, por ejemplo, ha experimentado períodos donde la base inflexible más altas renovables condujeron a sobreoferta (de ahí los precios negativos), y momentos donde la falta de reservas rápidamente disponibles causó picos de precios.

En resumen, los problemas tradicionales de integración de solar y eólica en la red incluyen desafíos de equilibrio y estabilidad debido a la variabilidad y baja inercia, congestión y limitación por desajuste geográfico, manejo del voltaje y flujos de energía en sistemas de distribución, mayor incertidumbre y requerimientos de reserva, y falta de flexibilidad del sistema. Estos problemas han estado al frente en Europa, donde algunas zonas ya superan el 50–60 % de penetración renovable instantánea. Una de las soluciones, es la aplicación de la IA para la gestión y estabilidad de la red.

### **IA para la gestión y estabilidad de la red**

La IA se está utilizando cada vez más para gestionar la red eléctrica de manera más inteligente, mitigando los desafíos de la integración de energías renovables. La capacidad de la IA para procesar grandes cantidades de datos y tomar decisiones de control rápidas es ideal para mejorar la estabilidad de la red frente a la variabilidad. Una de las principales aplicaciones es la previsión y gestión de la demanda. Los modelos de IA predicen la demanda eléctrica con gran precisión analizando el consumo histórico, el clima e incluso datos sociales. Combinados con pronósticos de generación renovable, estos modelos brindan a los operadores de red una imagen más clara de la carga neta (demanda menos renovables) que deben equilibrar. Con mejores previsiones de carga neta, los operadores pueden comprometer generación y programar almacenamiento o respuesta a la demanda con antelación, suavizando posibles desequilibrios [30].

National Grid ESO (el operador de la red de transmisión de Reino Unido), por ejemplo, utiliza IA para prever la demanda regional y la producción solar, lo que le permite redistribuir proactivamente los flujos de energía y evitar tensiones cuando se espera que una nube reduzca la generación solar en una región [31].

La monitorización y control en tiempo real de la red es otra área clave. Los algoritmos de IA (incluidos clasificadores de *machine learning* y redes neuronales) analizan datos de unidades de medición fasorial (PMUs) y sistemas SCADA para detectar anomalías o signos de inestabilidad más rápido que los humanos. Por ejemplo, la IA puede identificar la señal de una oscilación en la frecuencia de la red o una inestabilidad de voltaje y alertar a los operadores o activar controles automáticos.

Los operadores de sistemas de transmisión (TSO) en Europa están explorando el uso de IA para la clasificación dinámica de líneas, ajustando en tiempo real la capacidad de las líneas de

transmisión según el clima. Como mencionado anteriormente, la IA no solamente permite el mantenimiento predictivo de los equipos, si no también permite el mantenimiento predictivo de la red: al analizar patrones en los datos de sensores de equipos (transformadores, interruptores), puede predecir fallos y programar mantenimiento antes de que ocurra una interrupción forzada [23].

Una contribución significativa de la IA es mejorar la flexibilidad de la red mediante el control de recursos energéticos distribuidos (distributed energy resources/DERs). Las plataformas de gestión de redes inteligentes utilizan IA para coordinar recursos como respuesta a la demanda, vehículos eléctricos y almacenamiento distribuido, convirtiéndolos en herramientas eficaces de equilibrio. Por ejemplo, durante una caída repentina en la generación eólica, en lugar de solo aumentar la producción de plantas centrales, un sistema impulsado por IA podría reducir sutilmente la velocidad de carga de miles de vehículos eléctricos o atenuar termostatos inteligentes por un breve período para reducir la carga, ayudando a mantener el equilibrio. La IA decide la contribución óptima de cada recurso para lograr el efecto deseado con la mínima incomodidad para los consumidores. Este nivel de control granular y descentralizado es imposible de realizar manualmente a gran escala [23][32].

La regulación de frecuencia es un servicio crítico donde la IA está ganando terreno. La inercia virtual y la respuesta rápida de frecuencia pueden ser proporcionadas por inversores si se controlan adecuadamente. Ensayos en Irlanda mostraron que ciertos parques eólicos podían proporcionar una respuesta de inercia sintética casi tan eficaz como una turbina tradicional, ayudando a estabilizar la frecuencia a pesar de condiciones de baja inercia en la red [33]. Los controladores de IA pueden determinar la respuesta óptima de un parque eólico o una batería ante una caída de frecuencia, por ejemplo, inyectando justo la cantidad necesaria de energía momentáneamente para detener el descenso.

A nivel de sistema de transmisión, la IA se utiliza en análisis de contingencias y reconfiguración de la red. Los modelos de *machine learning* pueden evaluar rápidamente miles de escenarios hipotéticos, como por ejemplo, fallos en líneas o desconexiones de generadores, y sugerir acciones preventivas si el sistema se acerca a un estado de riesgo, mejorando los métodos tradicionales más lentos basados en reglas. La Red Europea de TSOs (ENTSO-E) ha señalado que la IA puede aplicarse en una amplia gama de operaciones del TSO, incluyendo el procesamiento de grandes datos para apoyar la toma de decisiones en la gestión de contingencias [23].

En resumen, la inteligencia artificial tiene el potencial para volverse clave en la modernización de redes eléctricas. Permite predecir mejor el consumo, monitorizar recursos y resolver problemas más rápido, aprovechando mejor la infraestructura actual, evitando altas inversiones en mejoras de la red. En Europa, donde hay un fuerte compromiso con reducir emisiones, la IA actúa como un cerebro que anticipa patrones de generación y consumo, reduciendo la necesidad de intervención manual. Esta tecnología trabaja junto al personal y sistemas existentes para lograr una integración más eficiente de las energías renovables.

# CAPÍTULO 7. INNOVACIONES IMPULSADAS POR IA EN ENERGÍA RENOVABLE

## Casos de uso reales

Como se ha ido comentando a lo largo del trabajo, los proyectos de energía renovable en todo el mundo están aprovechando cada vez más la inteligencia artificial para aumentar la eficiencia, reducir costes y mejorar la fiabilidad. En los últimos cinco años, grandes empresas energéticas y startups han implementado la IA en proyectos de energía solar, eólica, hidroeléctrica y de almacenamiento de energía. Estas aplicaciones de IA abarcan desde la optimización del diseño y las operaciones de las instalaciones renovables, hasta la gestión inteligente del almacenamiento en baterías y la integración de las energías renovables en la red eléctrica.

## IA en energía eólica

La IA artificial se ha convertido en una herramienta vital para que los operadores de parques eólicos optimicen la producción de energía, el mantenimiento y el diseño. Los modelos de *machine learning* pueden predecir la generación eólica, ajustar los controles de las turbinas en tiempo real y anticipar fallos en los equipos, lo que contribuye a una mayor eficiencia y a la reducción de costes.

### 1. Optimización de parques eólicos por Google DeepMind (USA)

**Alcance del proyecto:** Google, en colaboración con su unidad de IA DeepMind, aplicó *machine learning* para optimizar la entrega de energía desde parques eólicos que abastecen a sus centros de datos. El objetivo era hacer que la energía eólica fuera más predecible y valiosa en el mercado eléctrico [36].

**Técnicas de IA empleadas:** El proyecto utilizó una red neuronal entrenada con extensas previsiones meteorológicas y datos históricos de las turbinas. Este sistema de IA predice la producción energética de los parques eólicos con 36 horas de antelación y recomienda compromisos óptimos de energía por hora a la red con un día de anticipación. De este modo, los parques eólicos pueden ofertar su energía por adelantado, como lo hacen las plantas de energía convencionales.

**Resultados:** Las previsiones y la programación impulsadas por *machine learning* llevaron a un aumento del 20 % en el valor económico de la producción eólica de Google en comparación con una programación sin IA. En la práctica, esto significa que los parques eólicos entregan energía de forma más confiable cuando se necesita, lo que permite obtener mejores precios y reduce el desaprovechamiento de energía. Este caso demostró cómo la IA puede hacer que la energía eólica sea más predecible y compatible con la red, traduciéndose en ganancias económicas tangibles. [36]

### 2. Mantenimiento predictivo impulsado por IA de Suzlon (India)

**Alcance del proyecto:** Suzlon, un fabricante y operador global de turbinas eólicas, lanzó una iniciativa de mantenimiento basada en inteligencia artificial para aumentar el tiempo de funcionamiento de las turbinas y reducir los costes de mantenimiento en toda su flota. El enfoque principal fue predecir fallos de componentes (como cajas de engranajes) con suficiente antelación para programar reparaciones de forma proactiva.

**Técnicas de IA:** En colaboración con la startup de RapidCanvas AI, Suzlon implementó análisis predictivos utilizando datos de sensores de las turbinas (vibración, temperatura, etc.). Los modelos de *machine learning* aprendieron los patrones normales de funcionamiento y detectaron anomalías que

indicaban fallos inminentes. Una plataforma digital generaba recomendaciones de mantenimiento y optimizaba la programación de reparaciones y el suministro de repuestos.

**Resultados:** Este mantenimiento predictivo basado en IA logró resultados considerables. Suzlon informó que el 83 % de los fallos en las cajas de engranajes de las turbinas se predijeron con 45 días de antelación, lo que permitió a los equipos de mantenimiento resolver los problemas antes de que ocurrieran [37]. Al evitar paradas inesperadas y daños secundarios, Suzlon ahorró aproximadamente 50.000 dólares de media por turbina en costes de mantenimiento e interrupciones [37]. El programa en general ha extendido la vida útil de las turbinas y mejorado la eficiencia operativa mediante una asignación de recursos más inteligente [37].

### 3. Parque eólico digital de GE Renewable Energy (Global)

**Alcance del proyecto:** General Electric (GE) implementó la inteligencia artificial como parte de su estrategia de Parque Eólico Digital, integrando sensores, gemelos digitales y *machine learning* en parques eólicos que utilizan turbinas GE. El objetivo del proyecto era optimizar el rendimiento y el mantenimiento a escala de toda la flota.

**Técnicas de IA:** La plataforma de GE utiliza gemelos digitales impulsados por IA y modelos predictivos para cada turbina. Los gemelos digitales o *digital twins* son réplicas virtuales de objetos o sistemas físicos que se actualizan en tiempo real con datos del mundo real. En este contexto, un gemelo digital de una turbina permite simular su comportamiento, predecir fallos y optimizar su rendimiento sin necesidad de intervenir físicamente. Estos modelos analizan constantemente datos (clima, cargas, vibraciones) para predecir fallos y ajustar los parámetros operativos de las turbinas. Algoritmos basados en redes neuronales pronostican el estado de los componentes y optimizan la inclinación y orientación de las aspas en respuesta a las condiciones del viento.

**Resultados:** El mantenimiento predictivo impulsado por IA de GE ha logrado aproximadamente un 95 % de precisión en la predicción de fallos en turbinas eólicas, lo que permite realizar mantenimientos casi "justo a tiempo". Esta alta precisión en la predicción de fallos condujo a una reducción de aproximadamente el 30 % en los costes de mantenimiento de las operaciones eólicas de GE [38].

## IA en energía solar

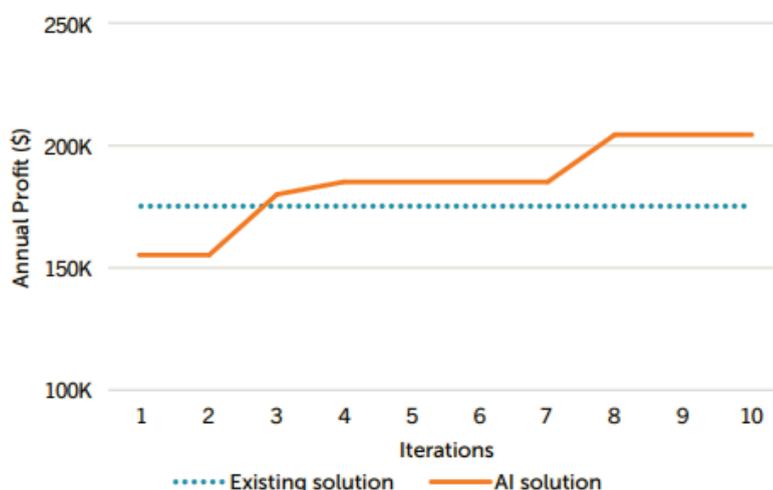
En el sector de la energía solar, la inteligencia artificial se está utilizando de la misma manera que la eólica, enfocándose en el mantenimiento predictivo de los parques para reducir los costes de mantenimiento. Sin embargo, hay una aplicación adicional para la IA en el diseño de los parques solares, consiguiendo así una disposición óptima que maximice el rendimiento del parque y, por ende, los beneficios obtenidos.

### 1. Diseño de una planta solar con Inteligencia Artificial (USA)

**Alcance del Proyecto:** El objetivo principal fue optimizar la disposición y orientación de los paneles solares en un terreno específico para maximizar el beneficio económico anual. Se utilizó un modelo tridimensional de un parque solar existente en Fitchburg, Massachusetts, compuesto por 4,542 paneles solares que generan aproximadamente 2,255 MWh al año. El proyecto se centró en mejorar esta configuración mediante técnicas de inteligencia artificial.

**Técnicas de IA Utilizadas:** En este proyecto, se utilizó software para modelar en 3D el parque solar existente en Fitchburg. Se definieron restricciones espaciales para mantener los diseños dentro del mismo terreno y se estableció como objetivo maximizar el beneficio anual (ingresos por venta de electricidad menos costes operativos). Utilizando un proceso iterativo, se generaron y evaluaron 2,000 configuraciones de diseño, optimizando la ubicación y orientación de los paneles para aumentar la rentabilidad del sistema.

**Resultados Obtenidos:** Tras evaluar 2,000 iteraciones de diseño, la inteligencia artificial identificó una disposición optimizada con 5,420 paneles solares (frente a los 4,542 originales), una inclinación reducida a 28.3°, y una producción anual de energía de 2,667 MWh, lo que representa un aumento de 412 MWh respecto al diseño original. Esta nueva configuración logró mejorar el beneficio anual en aproximadamente un 16 %, demostrando un retorno sobre la inversión significativamente superior.



Fuente: *Using Artificial Intelligence to Design a Solar Farm. The Concord Consortium*

En la gráfica anterior se puede ver, como al cabo de 10 iteraciones, el modelo fue capaz de aumentar los beneficios del parque considerablemente. [39] [40]

## IA en almacenamiento de energía

A medida que crece la energía renovable, el almacenamiento de energía en baterías se vuelve crucial para amortiguar la intermitencia y estabilizar la red eléctrica. Actualmente, los algoritmos de inteligencia artificial están optimizando cómo se cargan, descargan y comercializan las baterías, maximizando así tanto el rendimiento técnico como los beneficios económicos. A continuación, se presentan ejemplos de cómo la IA gestiona baterías a gran escala y sistemas de almacenamiento distribuidos.

### 1. Autobidder de Tesla en Hornsdale Power Reserve (Australia)

**Alcance del proyecto:** La Hornsdale Power Reserve, ubicada en Australia del Sur, es una de las baterías de ion-litio más grandes del mundo (150 MW/194 MWh), operada por Neoen y construida por Tesla. Desde su instalación en 2017, Tesla ha implementado su software de inteligencia artificial "Autobidder" para gestionar el comercio de energía y la operación de la batería. El objetivo es maximizar los ingresos y el apoyo a la red, decidiendo de forma autónoma cuándo cargar o vender electricidad, mucho más rápido y eficientemente que los operadores humanos.

**Técnicas de IA:** Autobidder es una plataforma de control y comercio en tiempo real impulsada por inteligencia artificial. Utiliza *machine learning* alimentado con datos del mercado eléctrico, condiciones de la red y estado de la batería para predecir precios de la energía y necesidades del sistema. La IA ejecuta ofertas óptimas en el mercado de energía y en los mercados de regulación de frecuencia, ajustando los ciclos de carga y descarga de la batería. Realiza operaciones algorítmicas de energía almacenada, respetando al mismo tiempo las limitaciones de la batería y los requisitos de estabilidad de la red. El sistema aprende continuamente para mejorar sus estrategias de arbitraje energético y respuesta rápida de frecuencia.

**Resultados:** La optimización mediante IA ha aumentado significativamente el valor del proyecto. Según el proveedor de software AMS, la batería controlada por Autobidder ha generado ingresos hasta cinco veces mayores que los obtenidos por un operador manual. En la práctica, esto significa que la IA compra electricidad cuando los precios son bajos y vende cuando se disparan (por ejemplo, durante la alta demanda o emergencias en la red), monetizando al máximo la capacidad de la batería. Además, el control inteligente ha mejorado la confiabilidad de la red: la batería de Hornsdale puede responder a eventos en fracciones de segundo, ayudando a frenar caídas de frecuencia y prevenir apagones. Este caso demuestra cómo la IA puede convertir el almacenamiento de energía en un centro de ganancias, al tiempo que proporciona servicios de respuesta rápida que estabilizan una red con alta penetración de renovables. [41]

## IA en energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica, una de las tecnologías renovables más antiguas, también se está beneficiando de la modernización impulsada por la inteligencia artificial. Los operadores están aplicando IA para el mantenimiento predictivo de turbinas, la gestión optimizada del agua y la operación autónoma de las plantas. Esto aumenta la eficiencia de generación y reduce los costes operativos de las centrales hidroeléctricas.

### 1. Sistema inteligente de operación y mantenimiento hidroeléctrico de Wu Ling (China)

**Alcance del proyecto:** En 2020, la empresa estatal china SPIC Wu Ling implementó un sistema inteligente de operación y mantenimiento remoto para hidroeléctricas en sus centrales hidroeléctricas ubicadas en la provincia de Hunan, China [42]. El sistema utiliza inteligencia artificial y robótica para automatizar inspecciones y optimizar el mantenimiento, con el objetivo de pasar de un mantenimiento manual y periódico a uno basado en condiciones y en tiempo real, mejorando así la disponibilidad de las plantas y reduciendo costes.

**Técnicas de IA:** Las plantas fueron equipadas con robots de inspección y sensores IoT (cámaras, termómetros infrarrojos, sensores de vibración) que patrullan y supervisan continuamente equipos como turbinas, generadores y transformadores. Los datos recopilados se transmiten a una plataforma de análisis impulsada por IA. Esta plataforma realiza diagnósticos en tiempo real del estado de los equipos y emplea modelos de *machine learning* para predecir anomalías. Una vez analizado todo, la IA genera recomendaciones de mantenimiento, en lugar de seguir un calendario fijo. Además, sugiere secuencias óptimas de arranque y parada de turbinas alrededor de los eventos de mantenimiento, minimizando interrupciones y maximizando la generación [42].

**Resultados:** En su primer año de operación, el sistema inteligente de O&M logró mejoras significativas en eficiencia. Wu Ling reportó una reducción del 10 % en los costes de mantenimiento. Al mismo tiempo, las plantas aumentaron su tiempo disponible de generación en un 0.5 % (al evitar tiempos de

inactividad innecesarios) y mejoraron su producción energética anual en un 0.3 % [42]. Aunque este aumento puede parecer pequeño, representa una ganancia considerable de megavatios-hora y de ingresos para una gran central, sin necesidad de nuevo hardware, solo mediante operaciones más inteligentes.

## **2. Despacho hidroeléctrico optimizado de Hydrogrid (Noruega)**

**Alcance del proyecto:** Hydrogrid es una startup europea que ofrece soluciones de inteligencia artificial para la optimización en tiempo real de plantas hidroeléctricas pequeñas y medianas. En asociación con la empresa eléctrica noruega Dalane Kraft, Hydrogrid implementó su plataforma de IA en la central hidroeléctrica en cascada Haukland, de 4.9 MW, en Noruega [43]. El objetivo del proyecto fue maximizar los ingresos por generación de energía y evitar el desperdicio de agua mediante el control inteligente de turbinas y embalses, tomando en cuenta los precios del mercado eléctrico y los caudales entrantes.

**Técnicas de IA:** La plataforma “Insight” de Hydrogrid creó un gemelo digital de toda la cascada hidroeléctrica, modelando múltiples embalses, compuertas y turbinas junto con sus restricciones (como flujos máximos/mínimos, regulaciones ambientales y riesgos locales de inundación). Mediante una combinación de pronósticos hidrológicos y optimización con IA, el sistema decide en tiempo real cuánta agua liberar por cada turbina o vertedero. Integra pronósticos meteorológicos (lluvias y caudales) y precios previstos de electricidad, y luego ejecuta un algoritmo de optimización predictiva para programar la generación de energía por horas. La gestión de centrales de energía hidroeléctrica es muy similar a la gestión de las baterías. Las baterías se cargan en periodos de precio valle y descargan en periodos de precios pico. De la misma manera, las centrales hidroeléctricas realizan un despacho basado en precios: genera más cuando los precios son altos y retiene agua cuando son bajos, siempre dentro de los límites del embalse y las normas ambientales.

**Resultados:** Al operar la central Haukland de forma más ágil y orientada al mercado, el sistema de IA permitió importantes beneficios. Se logró un aumento del 12% en los ingresos anuales de la planta gracias a la estrategia de despacho optimizado de Hydrogrid. Esta mejora se obtuvo al aprovechar mejor los precios altos de la electricidad y evitar el vertido innecesario de agua (energía no utilizada) en periodos de baja demanda.

## Tabla resumen de proyectos con IA en Energías Renovables

Tecnología	Proyecto	Empresa Asociada	Ubicación	Resumen Breve del Proyecto	Beneficios Obtenidos
Eólica	Optimización por DeepMind	Google DeepMind	USA	Predicción y programación de energía eólica para centros de datos	20% más de valor económico en producción eólica
Eólica	Mantenimiento predictivo	Suzlon	India	Predicción de fallos en turbinas mediante IA y sensores	83% de fallos anticipados, \$50.000 ahorrados por turbina
Eólica	Parque eólico digital	GE Renewable Energy	Global	Uso de gemelos digitales y mantenimiento predictivo	95% precisión en fallos, 30% menos en costes de mantenimiento
Solar	Optimización del diseño de una planta solar		USA	Optimización del layout e inclinación de paneles solares con IA	Incremento del ROI en 16%, +412 MWh producidos
Baterías	Autobidder Hornsdale	Tesla	Australia	IA para optimizar carga/descarga y comercio de batería	5 veces más ingresos y mejor estabilidad de red
Hidroeléctrica	Sistema inteligente Wu Ling	SPIC Wu Ling	China	Mantenimiento predictivo y automatización con IA y robótica	10% menos en costes, 0.5% más producción
Hidroeléctrica	Despacho optimizado	Hydrogrid	Noruega	Optimización del despacho energético en planta en cascada	Aumento del 12% en los ingresos anuales

## CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

### Resumen de resultados clave

Este análisis integral sobre la *Aplicación de la Inteligencia Artificial en las Energías Renovables*, con un enfoque particular en las tecnologías solar y eólica en Europa, demuestra que la IA está actuando como una fuerza transformadora a lo largo de toda la cadena de valor de las energías renovables.

A través de estudios de caso, se evaluó el impacto de la IA en los sistemas de energía renovable, poniendo el foco en indicadores como reducción de costes, mejora de la eficiencia, aumento de la producción energética y sostenibilidad ambiental. La evidencia confirma que la IA mejora tanto el rendimiento como la integración de las tecnologías renovables. La optimización mediante IA en las fases de diseño y gestión ha demostrado mejorar significativamente la disposición de parques eólicos y la configuración de sistemas solares, reduciendo las pérdidas e incrementando el rendimiento.

Durante la construcción y ejecución de proyectos, las herramientas de planificación basadas en IA han mejorado la logística y la programación, disminuyendo los costes y evitando retrasos. Una vez en operación, el mantenimiento predictivo habilitado por IA y la monitorización en tiempo real han reducido el tiempo de inactividad hasta en un 30% y prolongado la vida útil de los activos, como lo demuestran casos como el mantenimiento de turbinas eólicas de GE [26]. Además, se ha comprobado que la IA mejora considerablemente la precisión en la previsión de producción energética, reduciendo los errores de predicción, lo que contribuye a una operación de red más estable y confiable.

En el ámbito del almacenamiento energético, la IA ha abordado problemas críticos como la intermitencia y la degradación de baterías, optimizando los ciclos de carga y descarga, y utilizando análisis predictivos para mantener la salud de las baterías. En cuanto a la integración a la red, las herramientas de IA posibilitan la previsión de demanda en tiempo real, la clasificación dinámica de líneas y la gestión de congestiones, lo que deriva en una menor limitación de renovables y una mayor estabilidad del sistema. Estas capacidades permiten a las redes europeas incorporar un mayor porcentaje de energía renovable sin comprometer la fiabilidad.

Desde la perspectiva financiera y operativa, la IA ha impulsado mejoras en la eficiencia de generación (ganancias del 10–20% en la eficiencia de las baterías [34]), reducciones en los costes de operación y mantenimiento, y ahorros significativos en costes energéticos, como lo demuestra el caso de una instalación solar con almacenamiento en Finlandia que logró una reducción del 70% en los costes mediante control total con IA [35]. En conjunto, estos avances indican que la IA no está generando mejoras acotadas, sino que está habilitando un cambio sistémico que posiciona a las renovables como una fuerza dominante en la matriz energética.

### Implicaciones para la Industria de Energías Renovables

Los hallazgos presentados tienen importantes implicaciones para los actores de todo el sector de las energías renovables. Para desarrolladores y operadores de proyectos, la integración de capacidades de IA se está convirtiendo cada vez más en una necesidad estratégica. Las instalaciones solares y eólicas que aplican IA para optimización, predicción y mantenimiento obtienen costes nivelados de energía (LCOE) más bajos y una mayor fiabilidad, posicionándolas con ventaja en el mercado. Estas mejoras pueden influir en el financiamiento de proyectos, ya que prestamistas e inversionistas podrían priorizar aquellos que incluyan estrategias de mitigación de riesgos basadas en IA, como mantenimiento predictivo y pronósticos avanzados.

También se prevé una evolución en las mejores prácticas del sector. Los servicios analíticos basados en IA podrían integrarse rutinariamente en los contratos de O&M, y los modelos de dotación de personal podrían modificarse para incluir más profesionales con conocimientos tanto en sistemas energéticos como en análisis e interpretación de datos. Esta transición requerirá esfuerzos de formación profesional que doten a los ingenieros de competencias en manejo de datos, y capaciten a los científicos de datos para abordar desafíos energéticos. Las instituciones educativas y empresas energéticas podrían necesitar ampliar sus programas de formación para apoyar este perfil híbrido.

Para las empresas de servicios públicos y operadores de red, especialmente en entornos con alta penetración de renovables como Europa, la IA representa un activo estratégico para la gestión de redes. La aceleración en su adopción dentro de centros de control y departamentos de planificación permitiría un uso más eficiente de la infraestructura existente y mejoraría la resiliencia del sistema. En consecuencia, los marcos regulatorios podrían evolucionar para apoyar inversiones basadas en software, permitiendo retornos sobre plataformas de IA que demuestren mejoras en el rendimiento del sistema y reducciones de costes para los usuarios.

Los fabricantes de tecnologías renovables también enfrentan decisiones estratégicas. Integrar IA directamente en productos como turbinas, inversores y sistemas de almacenamiento puede representar una ventaja competitiva. La incorporación de funciones avanzadas como diagnósticos integrados o garantías de rendimiento podría transformar modelos de negocio, impulsando ofertas del tipo “energía como servicio”, donde el rendimiento optimizado mediante IA forma parte del paquete.

Los operadores de mercado y comercializadores de energía también se verán afectados. Las mejoras en la predicción y la optimización del despacho permitirán estrategias comerciales más eficientes y precisas. Las empresas que apliquen IA podrán anticipar precios con mayor precisión y gestionar portafolios de renovables con mayor eficacia, lo que contribuiría a reducir la volatilidad del mercado. Esta evolución podría fomentar una mayor convergencia entre los sectores energético y tecnológico, a través de colaboraciones o adquisiciones orientadas a incorporar capacidades de IA.

En conclusión, la industria de las energías renovables atraviesa una fase decisiva donde la integración de la IA es fundamental para liberar todo el potencial de la solar y la eólica. La evidencia demuestra que la IA ya está generando mejoras tangibles en desempeño, fiabilidad y sostenibilidad. Por ello, los actores del sector deben adaptarse a una forma de operar más digital y potenciada por IA, o corren el riesgo de quedarse atrás. Europa en este campo puede convertirse en un referente global para una transición energética exitosa habilitada por inteligencia artificial.

## CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Repsol. (n.d.). Energía sostenible: Un futuro para el planeta. Repsol. Recuperado de <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-sostenible/index.cshtml>
2. Acciona. (n.d.). Energías renovables. Acciona. Recuperado de [https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?\\_adin=11734293023](https://www.acciona.com/es/energias-renovables/?_adin=11734293023)
3. Parlamento Europeo. (2020, 27 de agosto). ¿Qué es la inteligencia artificial y cómo se usa? Parlamento Europeo. Recuperado de <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20200827STO85804/que-es-la-inteligencia-artificial-y-como-se-usa>
4. Oracle. (n.d.). ¿Qué es la inteligencia artificial (IA)? Oracle. Recuperado de <https://www.oracle.com/es/artificial-intelligence/what-is-ai/>
5. IBM. (n.d.). ¿Qué es la inteligencia artificial? IBM. Recuperado de <https://www.ibm.com/es-es/topics/artificial-intelligence>
6. EDP Energía. (n.d.). Aplicaciones de la IA en la energía renovable. EDP Energía. Recuperado de <https://www.edpenergia.es/es/blog/sostenibilidad/aplicaciones-ia-energia-renovable/>
7. El Confidencial. (2023, 24 de octubre). Las energías renovables y la IA: un binomio imprescindible para el futuro. El Confidencial. Recuperado de [https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2023-10-24/energias-renovables-ia-bra\\_3759446/](https://www.elconfidencial.com/medioambiente/energia/2023-10-24/energias-renovables-ia-bra_3759446/)
8. Atlas Renewable Energy. (n.d.). La IA y su impacto en las energías renovables. Atlas Renewable Energy. Recuperado de <https://pt.atlasrenewableenergy.com/la-ia-y-su-impacto-en-las-energias-renovables/>
9. Repsol. (n.d.). Tipos de energía renovable. Repsol. Recuperado de [https://www.repsol.com/es/conocenos/que-hacemos/desarrollo-energias-renovables/tipos-energia-renovable/index.cshtml?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwyo60BhBiEiwAHmVLJU51KRY6VCluoGVg4vaJDn fZiqi4um4HrOVO-utJMYr-ExSq2A4mkhoCxRAQAvD\\_BwE](https://www.repsol.com/es/conocenos/que-hacemos/desarrollo-energias-renovables/tipos-energia-renovable/index.cshtml?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwyo60BhBiEiwAHmVLJU51KRY6VCluoGVg4vaJDn fZiqi4um4HrOVO-utJMYr-ExSq2A4mkhoCxRAQAvD_BwE)
10. Microsoft News Center España. (2018, 26 de junio). Principios básicos de la inteligencia artificial: por qué está aquí para ayudar y no para perjudicarnos. Microsoft News Center España. Recuperado de <https://news.microsoft.com/es-es/2018/06/26/principios-basicos-de-la-inteligencia-artificial-por-que-esta-aqui-para-ayudar-y-no-para-perjudicarnos/>
11. Telefónica. (n.d.). Aplicaciones de la inteligencia artificial. Telefónica. Recuperado de <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/aplicaciones-tiene-inteligencia-artificial/>
12. Technology Review en español. (2022, 4 de abril). ¿Cómo resolver el gran mal de la energía renovable? El almacenamiento. Technology Review en español. Recuperado de <https://www.technologyreview.es/s/11537/como-resolver-el-gran-mal-de-la-energia-renovable-el-almacenamiento>
13. Assessing the Potential of Artificial Intelligence in Advancing Clean Energy Technologies in Europe: A Systematic Review. *Energies*, 2023, 16(22), 7633  
<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/22/7633>
14. Next-generation energy powered by artificial intelligence | I-ENERGY Project | Results in brief, accessed April 20, 2025, <https://cordis.europa.eu/article/id/451051-next-generation-energy-powered-by-artificial-intelligence>
15. (PDF) Artificial Intelligence for Smart Renewable Energy Sector in Europe—Smart Energy Infrastructures for Next Generation Smart Cities - ResearchGate, accessed April 20, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/340880920\\_Artificial\\_Intelligence\\_for\\_Smart\\_Renewable\\_Energy\\_Sector\\_in\\_Europe-Smart\\_Energy\\_Infrastructures\\_for\\_Next\\_Generation\\_Smart\\_Cities](https://www.researchgate.net/publication/340880920_Artificial_Intelligence_for_Smart_Renewable_Energy_Sector_in_Europe-Smart_Energy_Infrastructures_for_Next_Generation_Smart_Cities)
16. Advancing AI Integration in the European Energy Sector - EPRI Europe, accessed April 20, 2025, <https://europe.epri.com/press-releases/advancing-ai-integration-european-energy-sector>
17. AI and Generative AI: transforming Europe's electricity grid for a sustainable future, accessed April 20, 2025, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-and-generative-ai-transforming-europes-electricity-grid-sustainable-future>
18. Energy and AI: the power couple that could usher in a net-zero world, accessed April 20, 2025, <https://www.weforum.org/stories/2025/01/energy-ai-net-zero/>

19. The role of Artificial Intelligence in the European Green Deal, accessed April 20, 2025, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662906/IPOL\\_STU\(2021\)662906\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/662906/IPOL_STU(2021)662906_EN.pdf)
20. Hopson, D. "Harnessing the wind: AI-driven innovations in wind-farm layout optimization." *Wind Systems Magazine*, Apr. 2025, <https://www.windsystemsmag.com/harnessing-the-wind-ai-driven-innovations-in-wind-farm-layout-optimization/#:~:text=One%20of%20the%20most%20impactful,and%20ensuring%20maximum%20energy%20capture>
21. Xie, C. (2022, 19 de abril). *Designing a Solar Farm with Artificial Intelligence*. Institute for Future Intelligence. <https://intofuture.org/aladdin-design-solar-farm-with-ai.html>
22. Acropolium Tech Blog. "AI in Renewable Energy: A Guide to Tech Sustainability." Feb. 12, 2025 (<https://acropolium.com/blog/artificial-intelligence-and-renewable-energy-a-guide-to-tech-sustainability/#:~:text=in%20Google%E2%80%99s%20collaboration%20with%20DeepMind>)
23. DNV. "AI brings huge opportunities and new but manageable risks for the energy industry." DNV.com, 2023 (<https://www.dnv.com/article/ai-brings-huge-opportunities-and-new-but-manageable-risks-for-the-energy-industry/#:~:text=The%20benefits%20of%20advanced%20AI,enhancing%20battery%20storage%20portfolios>)
24. GE Vernova. (2022, 4 de abril). *GE using AI/ML to reduce wind turbine logistics and installation costs*. GE Vernova. <https://www.governova.com/news/press-releases/ge-using-ai-ml-to-reduce-wind-turbine-logistics-and-installation-costs>
25. StruxHub. (2025, 2 de abril). *How Robotics and AI Are Transforming Large-Scale Solar Farm Construction with Automation and Smart Project Management*. StruxHub. <https://struxhub.com/blog/how-robotics-and-ai-are-transforming-large-scale-solar-farm-construction-with-automation-and-smart-project-management/>
26. Intelliarts Blog. "How Predictive Maintenance Transforms Renewable Energy." Oct. 2023 (<https://intelliarts.com/blog/predictive-maintenance-for-renewable-energy/#:~:text=Predictive%20maintenance%20is%20used%20to,of%20wear%20and%20prevent%20breakdowns>)
27. RapidCanvas. (2023, 25 de abril). *Assessing the ROI for Predictive Maintenance Solution on Wind Turbines*. RapidCanvas. <https://www.rapidcanvas.ai/blogs/assessing-the-roi-for-predictive-maintenance-solution-on-wind-turbines>
28. Intersolar Europe. (2025, 13 de febrero). *How AI is Revolutionizing the Solar Industry*. Intersolar Europe. <https://www.intersolar.de/trend-paper/ai-in-solar-industry>
29. ACCURE Battery Intelligence. (2025, 11 de febrero). *ACCURE Battery Intelligence secures \$16 million to scale battery safety and performance offerings across Europe, Americas and Asia Pacific* (<https://www.accure.net/news/accure-battery-intelligence-secures-16-million-to-scale-battery-safety-and-performance-offerings-across-europe-americas-and-asia-pacific/#:~:text=In%20just%20four%20years%2C%20ACCURE,financial%20performance%20of%20the%20asset>)
30. European Commission DG CONNECT & DG ENER. "AI and Generative AI: transforming Europe's electricity grid for a sustainable future – Workshop Report." Sep. 2024. (<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-and-generative-ai-transforming-europes-electricity-grid-sustainable-future#:~:text=At%20the%20recent%20workshop%20organised,reduce%20energy%20bills%20for%20consumers>)
31. National Grid. (2020, 28 de enero). *Jack Kelly: using Artificial Intelligence to address climate change*. National Grid. <https://www.nationalgrid.com/stories/engineering-innovation/jack-kelly-using-artificial-intelligence-address-climate-change>
32. OakDevices. (2025, 25 de marzo). *Modern energy grid: how AI supports TSO and DSO in the era of renewable energy*. OakDevices. <https://oakdevices.com/res/implementation-examples/modern-energy-grid-how-ai-supports-tso-and-dso-in-the-era-of-renewable-energy/>

33. Boyle, J., & Littler, T. (2024). *A review of frequency-control techniques for wind power stations to comply with grid codes in Ireland and Northern Ireland*. *Energy Reports*, 12, 5567–5581. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.11.031>
34. Wang, Y., & Li, J. (2024). *Machine Learning for Optimising Renewable Energy and Grid Management towards Net Zero Targets*. *Atmosphere*, 15(10), 1250. <https://doi.org/10.3390/atmos15101250>
35. Harvard Business Review. (2023, septiembre 11). *How AI can help cut energy costs while meeting ambitious ESG goals*. <https://hbr.org/sponsored/2023/09/how-ai-can-help-cut-energy-costs-while-meeting-ambitious-esg-goals>
36. Elkin, C. y Witherspoon, S. (26 de febrero de 2019). *Machine learning can boost the value of wind energy*. Google DeepMind. Recuperado de: <https://deepmind.google/discover/blog/machine-learning-can-boost-the-value-of-wind-energy/>
37. RapidCanvas. (2024). *AI-Driven Predictive Maintenance Improves Wind Turbine Performance*. Recuperado de: <https://www.rapidcanvas.ai/case-studies/suzlon>
38. Hamdan, A., Ibekwe, K. I., Ilojiana, V. I., Sonko, S., & Etukudoh, E. A. (2024). *AI in renewable energy: A review of predictive maintenance and energy optimization*. *International Journal of Science and Research Archive*, 11(01), 718–729. <https://doi.org/10.30574/ijra.2024.11.1.0112>
39. Xie, C. (2021). *Design a Solar Farm with Artificial Intelligence*. Medium. Recuperado de: <https://charlesxie.medium.com/design-a-solar-farm-with-artificial-intelligence-5cfd2592034>
40. Xie, C. (2018). *Using Artificial Intelligence to Design a Solar Farm*. The Concord Consortium. Recuperado de: <https://energy.concord.org/energy3d/papers/generatiive-design-solar-farm.pdf>
41. Tesla. (s.f.). *Autobidder*. Recuperado de: [https://www.tesla.com/en\\_au/support/energy/tesla-software/autobidder](https://www.tesla.com/en_au/support/energy/tesla-software/autobidder)
42. International Hydropower Association. (2021). *Chinese operators are using AI to inspect their power plants*. Recuperado de: <https://www.hydropower.org/case-study/ai-power-plant>
43. Hydrogrid GmbH. (s.f.). *Automated data-driven optimization of small hydropower cascades*. Recuperado de: <https://www.hydrogrid.ai/case-studies/dalane-energi-case-study>