



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL
A LAS ENERGÍAS RENOVABLES**

Autor: Alberto Fernández Carrillo

Director: Jaime Navarro Ocón

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Aplicaciones de la Inteligencia Artificial a las Energías Renovables en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Alberto Fernández Carrillo

Fecha: 2/ 7/ 2024

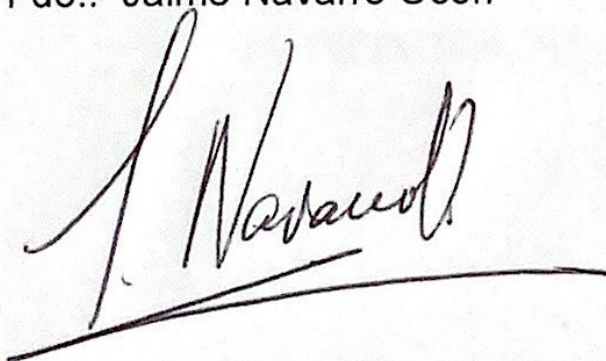


Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jaime Navarro Ocón

Fecha: 6 / 7 / 2024





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL A LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Alberto Fernández Carrillo

Director: Jaime Navarro Ocón

Madrid

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera expresar mi profundo y sincero agradecimiento a mi familia por su constante motivación y apoyo incondicional durante los momentos duros a lo largo de estos años de carrera. De no ser por ellos y por el esfuerzo conjunto, no hubiera podido afrontar una carrera tan dura y de tanto renombre como es Ingeniería Industrial en una de las escuelas más prestigiosas del país.

En segundo lugar, quiero agradecer a todas las amistades que he hecho durante estos años de carrera y en especial a los compañeros de ICAI, quienes siempre han hecho las extenuantes épocas de exámenes menos duras y con los que siempre se puede contar en los momentos más difíciles de la carrera.

En tercer lugar, deseo dar las gracias al señor Jaime Navarro Ocón por ofertar un proyecto tan innovador e interesante como es éste, del que me siento orgulloso y afortunado de haber formado parte. Ha sido un placer recibir su tutela durante la elaboración de este trabajo y conversar con él sobre la empresa en la que él trabajó durante tantos años y donde yo me he encontrado realizando prácticas este año, Empresarios Agrupados.

Asimismo, quiero agradecer a la “ETSI-ICAI” por brindarme la magnífica oportunidad de estudiar el “Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales” durante todos estos años y por haber sido no solo una escuela donde aprender fórmulas y ecuaciones, sino también valores como el respeto, el compañerismo, el esfuerzo, la perseverancia y, como dice el propio lema de la escuela, “el valor de la excelencia”. Todo esto es lo que me anima a seguir creciendo en esta escuela y me motiva a seguir creciendo en esta institución el año que viene en el Máster de Big Data.

Es un enorme honor poder decir que fui parte de esta gran escuela,

Alberto Fernández Carrillo
Madrid, 30 de junio de 2024

APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL A LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Fernández Carrillo, Alberto.

Director: Navarro Ocón, Jaime.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto tendrá como objetivo principal analizar posibles soluciones basadas en tecnologías basadas en Inteligencia Artificial, Big Data e Internet de las Cosas, con el objetivo de hacer más atractiva la apuesta por las fuentes de energía renovables y de aumentar la eficiencia global de la red eléctrica. Se estudiará la viabilidad de estas iniciativas, atendiendo a criterios económicos y técnicos, así como evaluando cualquier impacto negativo que pudiesen implicar.

Palabras clave: IA, Energía, Renovables.

1. Introducción

Dado el creciente protagonismo de la Inteligencia Artificial (y otras tecnologías asociadas como el *Big Data* o el Internet de las Cosas) en varios sectores de la industria, resulta interesante explorar cómo implementar estas herramientas en la red eléctrica. Las aplicaciones de la IA pueden ser muy variadas en este contexto: puede permitir un mejor entendimiento del sistema mediante gemelos digitales, mejorar la calidad del suministro gracias al mantenimiento predictivo de los componentes de la red, agilizar procesos de inspección de las instalaciones mediante robots o diseñar automáticamente nuevas plantas de generación haciendo uso del *Machine Learning*.

2. Definición del proyecto

Como ya se ha mencionado, en este proyecto se estudiará la viabilidad de distintas propuestas que implican a la Inteligencia Artificial con el objetivo de mejorar la calidad de la red eléctrica y de aumentar el protagonismo de las energías renovables en el mix energético. En concreto, las principales iniciativas que se analizarán son:

- La implementación de los sistemas de Inteligencia Artificial existentes en las redes eléctricas de otras partes del mundo, como por ejemplo Estados Unidos. Estos sistemas se describirán brevemente en el siguiente apartado y se estudiarán formas en las que podrían complementar a los sistemas ya existentes en la red española. Se atenderá a criterios de tendencias de inversión en este tipo de tecnologías en nuestro país, a aspectos técnicos (como las similitudes y diferencias entre una red y otra, que hacen a la REE una candidata óptima para incorporar estas tecnologías) y a las limitaciones que pudiera tener la infraestructura actual para soportar estos cambios.
- El potencial de la Inteligencia Artificial Generativa para aprender de los gemelos digitales ya existentes y futuros de los distintos componentes de la red eléctrica, y

con las lecciones aprendidas desarrollar diseños propios de nuevas instalaciones, como plantas de generación. Además, se podrán usar modelos predictivos de generación y rendimiento que permitan estimar si estas nuevas construcciones creadas por la Inteligencia Artificial suponen una inversión rentable o si por el contrario son un gasto no asumible, antes de iniciar cualquier tipo de trámite o gestión.

- Por último, siendo Chat GPT una de las herramientas más utilizadas en el sector tecnológico, se comprobará su eficacia a la hora de diseñar instalaciones fotovoltaicas para autoconsumo en domicilios particulares. Posteriormente, se realizará un estudio tradicional de la instalación con el que contrastar la propuesta del *chatbot* de Open AI.

Todo esto vendrá acompañado de una reflexión final sobre los beneficios de estas tecnologías para el sector y se debatirá si el abusivo consumo energético de los centros de datos necesarios para la implementación de estos sistemas puede llegar a resultar contraproducente.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

La **Inteligencia Artificial (IA)** se refiere a la capacidad de las máquinas para realizar tareas que requieren inteligencia humana, como el aprendizaje, la toma de decisiones y el reconocimiento de patrones.

Big Data se refiere a la recopilación y análisis de grandes volúmenes de datos complejos y variados que permiten a las organizaciones obtener *insights* y tomar decisiones informadas.

El **Internet of Things (IoT)** describe una red de dispositivos físicos interconectados que recopilan y comparten datos a través de internet, mejorando la eficiencia y habilitando nuevas aplicaciones en diversas industrias. Juntos, estos campos impulsan la innovación y la transformación digital.

Todas estas herramientas están siendo ya usadas para mejorar los servicios de las compañías energéticas en diversos ámbitos.

En la generación tiene aplicaciones como la predicción de los recursos naturales para la producción de energías renovables o la previsión del estado de salud de elementos generadores. Ejemplos de esto es el sistema MeteoFlow de Iberdrola [1] o el proyecto llevado a cabo por IA4TES para el mantenimiento predictivo de los aerogeneradores de los parques eólicos *offshore* [2].

En la distribución eléctrica tiene otros usos como pueden ser la detección de ubicaciones de riesgo dentro de la red, la optimización de los planes de sustitución de equipos o la monitorización constante de los componentes del sistema eléctrico, como ya hacen en Estados Unidos aumentando así la robustez de su red y mejorando la calidad del suministro eléctrico [3].

La Inteligencia Artificial también puede actuar como un operador de red virtual, realizando maniobras para garantizar el correcto suministro a los usuarios [4]; o ser un agente más de los procesos de inspección de instalaciones mediante robots como Sparky (para la inspección de subestaciones eléctricas) [5] o el Dron Colibrí (para examinar aerogeneradores sin necesidad de que estos se detengan) [6].



Figura 1. Perro robot Sparky realizando tareas de inspección en una subestación eléctrica. Fuente: Avangrid [5].

Además, estos sistemas de inspección pueden usarse a su vez para la captación de imágenes y otra información de utilidad para el desarrollo de gemelos digitales. Estos gemelos ayudan a la formación del personal, contribuyen a una mejor comunicación y entendimiento con proveedores de equipos y ayuda a prevenir riesgos laborales. Es por estos motivos que en España ya existen gemelos digitales para centrales hidroeléctricas [7] y nucleares [8].

Por otro lado, se ha mencionado ya que la herramienta conocida como Chat GPT [9] es cada vez más usada en la industria. Con el objetivo de analizar el valor de esta IA en el mundo de las energías renovables, se le encomendará el diseño de una instalación de placas solares destinadas al autoconsumo de un domicilio particular.

El propio *chatbot* de Open AI pide al usuario una serie de inputs que se le proporcionarán para que este pueda empezar con su propuesta de diseño. Estos datos de partida son:

- Ubicación geográfica: La vivienda se encuentra dentro de Madrid, por la parte noroeste de la ciudad.
- Orientación, ángulo del techo y espacio disponible: Se trata de una azotea plana a unos 25 metros de altura y con un espacio libre para la instalación de 25 m².
- Sombra: A esta altura no existe vegetación u otros edificios alrededor que puedan dar sombra a las placas.
- Consumo energético: A continuación, se ofrece un desglose por meses del consumo eléctrico de la vivienda:

<i>Mes</i>	<i>Energía consumida (kWh)</i>
Enero	246
Febrero	256
Marzo	262
Abril	286
Mayo	232
Junio	204
Julio	104
Agosto	93
Septiembre	243
Octubre	255
Noviembre	276
Diciembre	305

Tabla 1. Datos de consumo del domicilio de estudio. Fuente: Elaboración propia.

- Detalles técnicos: El sistema eléctrico del hogar es monofásico (230 Vca) y sin ningún inversor instalado.
- Presupuesto y preferencias: Se estima un presupuesto de entre 5000 y 7500 €, no se tiene ninguna preferencia de marca y el objetivo es conseguir una reducción en la factura de la luz.

4. Resultados

Tanto la implementación de los gemelos digitales para el aprendizaje de Inteligencias Artificiales Generativas, como la implementación de sistemas basados de IA para mejorar la calidad del suministro de la red eléctrica, pueden llegar a ser económicamente viables viendo la tendencia que sigue España en este campo, situándose a la cabeza junto a Italia en la lista de países de la Unión Europea que más invierten en Inteligencia Artificial, con un desembolso previsto de 1204,9 millones de euros [10].

Otros factores que hacen a España un candidato óptimo para la implementación de las tecnologías basadas en IA de la red estadounidense son el hecho de que al ser un sistema eléctrico mucho más pequeño (haciendo más sencilla su gestión, más barata la instalación y teniendo un menor riesgo de incidencia al necesitar menos dispositivos de IoT para cubrir toda la red) y que el clima es mucho menos adverso que en Norteamérica, por lo que no se producirían interrupciones de suministro tan graves como las que pueden causar temporales como los que sufrió el Estado de Texas en mayo de 2023 [11].



Figura 2. Fotografía de torres eléctricas derruidas a causa de las fuertes tormentas en Texas, EE.UU. en mayo de 2024.

Fuente: Yakima Herald [11].

Sin embargo, la incorporación de todos estos nuevos sistemas traerá consigo la construcción de una gran cantidad de centros de datos para poder procesar todos los datos necesarios para el correcto funcionamiento de estos sistemas basados en IA y Big Data. El principal problema que plantean estos centros es su colosal consumo energético, el cual se prevé que no haga más que crecer hasta suponer casi el 10% de la demanda energética mundial, por lo que es probable que España no pueda asumir un aumento tan repentino de la demanda por el momento y se limite así la incorporación de la IA a la REE.

Por otro lado, la propuesta para la instalación de placas solares que ha ofrecido Chat GPT ha sido el siguiente:

Diseño del Sistema Fotovoltaico

1. Cálculo de la Potencia Necesaria

Para reducir la factura de la luz de manera significativa, idealmente se buscaría cubrir el consumo anual con la generación fotovoltaica. Para esto, utilizaremos la irradiación solar promedio en la ubicación del domicilio (especifica la ciudad para mayor precisión). Asumamos una irradiación promedio anual de 4 kWh/m²/día.

Energía anual necesaria = 2758 kWh

Energía diaria necesaria = {2758 kWh} / {365 días} ≈ 7.56 kWh/día

Potencia del sistema = {7.56 kWh/día} / {4 kWh/m²/día} ≈ 1.89 kW

2. Selección de Paneles Solares

Suponiendo paneles solares con una potencia de 300 W cada uno:

$Número\ de\ paneles = \{1.89\ kW\} / \{0.3\ kW/panel\} \approx 6.3\ paneles$

Redondeando, necesitaríamos 7 paneles solares de 300 W cada uno.

3. Selección del Inversor

Para un sistema de 1.89 kW, un inversor de 2 kW sería adecuado. Ejemplos de inversores monofásicos disponibles en el mercado pueden incluir marcas como Fronius, SMA o Huawei, todos de buena calidad.

4. Cálculo de Costos

- **Paneles solares:** 7 paneles * 300 € = 2100 €
- **Inversor:** Aprox. 800 €
- **Estructura de montaje, cables, protección, y otros componentes:** Aprox. 1200 €
- **Mano de obra e instalación:** Aprox. 1200 €

- **Total estimado: 5300 €**

Esto se ajusta dentro del presupuesto estimado.

Propuesta Detallada

1. Componentes Principales

- **Paneles solares:** 7 unidades de 300 W
- **Inversor:** 1 unidad de 2 kW (monofásico)
- **Estructura de montaje y otros accesorios:** Cables, protecciones, etc.

2. Instalación y Conexión

- **Tipo de instalación:** Sobre el techo, orientación óptima hacia el sur con el ángulo adecuado.
- **Conexión eléctrica:** Directamente a la red interna del hogar con protección para evitar vertidos en caso de ser sin excedentes.

Este diseño se ha considerado impreciso por diversos motivos que se exponen a continuación:

- Infradimensionamiento de la instalación: El hecho de considerar un solo valor de irradiación hace que el sistema tenga una potencia instalada de casi 2 kW menor a la necesaria. Esto puede arreglarse con un desglose de los niveles de irradiación por meses, obtenido gracias al software PVGIS [12]. Con los niveles mensuales de irradiación solar se determina que la instalación se debe dimensionar considerando el mes de diciembre (poca luz solar y alto consumo por la calefacción).

<i>Mes</i>	<i>Consumo energético mensual (kWh)</i>	<i>Irradiación solar mensual (kWh/m²)</i>	<i>Potencia (W)</i>
Jan	246,00	115,14	2670,66
Feb	256,00	145,07	2205,83
Mar	262,00	153,93	2127,59
Apr	286,00	159,90	2235,77
May	232,00	206,72	1402,86
Jun	204,00	217,94	1170,05
Jul	104,00	231,70	561,07
Aug	93,00	220,28	527,74
Sep	243,00	186,33	1630,17
Oct	255,00	158,06	2016,64
Nov	276,00	104,60	3298,28
Dec	305,00	108,64	3509,30

Tabla 2. Cálculo de la potencia a instalar. Fuente: Elaboración propia.

- Sobrecoste de los equipos: Eligiendo placas de 300 W (y sumado al cálculo erróneo de la potencia a instalar) se ha aprovechado menos el espacio disponible y además las placas tienen un precio sorprendentemente alto. Para una instalación de 3,5 kW se pueden utilizar 7 paneles solares de 545 W, con los que se cubre toda potencia a instalar y por un precio considerablemente menor (un total de 1253 €, modelo JAM72S30-545/MR de JA Solar). El inversor también presenta un sobrecoste notable, pues el modelo SUN2000-3KTL-L1 de Huawei de 3 kW de potencia nominal y capaz de aguantar 4,5 kW de generación solar sería perfectamente válido para este sistema y por un coste de 520 €, casi 300 € más barato que el sugerido por el *chatbot* de Open AI.
- Imprecisiones en el diseño: Chat GPT habla de un ángulo óptimo de inclinación, pero no llega a ofrecer un valor concreto. Gracias a PVGIS se obtiene que esta inclinación óptima (la que mejor aprovecha la luz solar incidente) es de 34° sobre la horizontal. Pero esta no es la única imprecisión de la propuesta de Chat GPT, pues tampoco ofrece indicaciones sobre las protecciones eléctricas del sistema, no sobre la puesta a tierra o el sistema cableado.

5. Conclusiones

En resumen, está claro que la Inteligencia Artificial es un aliado valioso para el sector eléctrico, permitiendo estimar niveles de generación, optimizando las labores de inspección de la infraestructura energética y refinando la gestión de la red. Sin embargo, debe tenerse en consideración que la implementación de estos sistemas acarrea un considerable aumento de la demanda eléctrica. Además, esta demanda que no hará más que aumentar debido a la tendencia de crecimiento exponencial que siguen los datos hoy en día, tendencia que imitarán los centros de datos con su consumo energético por lo que

la implementación de esta tecnología podría llegar a ser contraproducente si no se integra de una forma inteligente y comedida.

Por otro lado, aunque el producto estrella de Open AI pueda ser uno de los aliados más fiables en otros sectores industriales, este no es el caso con el diseño de instalaciones de placas solares. Las propuestas que ofrece Chat GPT solo pueden calificarse como incompletas e imprecisas, pero esto no quiere decir que sea una herramienta del todo inútil: este diseño puede usarse como un primer boceto sobre el que un profesional del sector puede trabajar corrigiendo los errores que la IA haya podido cometer, similar al trabajo que podría hacer el personal becario.

En definitiva, hoy en día se tiende a endiosar a la Inteligencia Artificial, y pese a ser una herramienta muy eficaz en muchas disciplinas no hay que olvidar que, al igual el ser humano, puede cometer errores, y que además la implementación de esta tecnología no es gratis y trae consigo retos para la infraestructura y para el suministro energético del país.

6. Referencias

- [1] Iberdrola, «Proyecto MeteoFlow,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/proyecto-meteoflow>. [Último acceso: 2024].
- [2] V. N. A. A. D. P. N. Gorostidi, «Mantenimiento Predictivo de Líneas de Amarre de Turbinas Eólicas Flotantes Offshore usando Redes Neuronales Profundas,» *Journal of Physics: Conference Series*, 2022.
- [3] Avangrid , «Avangrid Pioneers In-House Creation of Artificial Intelligence to Increase Reliability,» 16 Agosto 2023. [En línea]. Available: https://www.avangrid.com/es/w/avangrid-pioneers-in-house-creation-of-artificial-intelligence-to-increase-reliability?p_1_back_url=%2Fes%2Fsearch%3Fq%3Dgeomesh.
- [4] Endesa, «Inteligencia artificial para mejorar nuestros servicios,» 2 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/proyectos/todos-los-proyectos/transicion-energetica/digitalizacion/inteligencia-artificial-mejorar-servicios>.
- [5] Avangrid, «Avangrid Pilots Mobile Robot Dog to Advance Substation Inspections with Artificial Intelligence,» 8 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.avangrid.com/es/w/avangrid-pilots-mobile-robot-dog-to-advance-substation-inspections-with-ai>.

- [6] Iberdrola, «Llevamos a WindEurope Bilbao las más innovadoras tecnologías en generación eólica,» 20 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-lleva-a-windeurope-bilbao-las-mas-innovadoras-tecnologias-en-generacion-eolica>.
- [7] El Periódico de la Energía, «Endesa aplica la inteligencia artificial para crear “gemelos digitales” de sus centrales hidroeléctricas,» 8 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/endesa-aplica-inteligencia-artificial-crear-gemelos-digitales-centrales-hidroelectricas/>.
- [8] A. B. Barrio, «Gemelos digitales en inspecciones estructurales en centrales nucleares,» *Revista Nuclear España*, 2024.
- [9] Open AI, «Chat GPT 4o,» 2024. [En línea]. Available: <https://chatgpt.com/>.
- [10] European Commission, Joint Research Centre, «Mapping EU level funding instruments to Digital Decade targets,» 2023. [En línea]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e2b493b-5c27-11ee-9220-01aa75ed71a1/language-en>.
- [11] Yakima Herald, «Severe storms kill at least 4 in Houston knock out power to 900.000 homes,» 2024.
- [12] PVGIS, «Photovoltaic Geographical Information System,» 2024. [En línea]. Available: <https://pvgis.com/#>.

TÍTULO DEL TFG (EN INGLÉS)

Author: Fernández Carrillo, Alberto.

Supervisor: Navarro Ocón, Jaime.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The primary objective of this project is to analyze potential solutions leveraging Artificial Intelligence, Big Data, and Internet of Things (IoT) technologies to enhance the appeal of renewable energy sources and improve the overall efficiency of the electrical grid. The feasibility of these initiatives will be studied, considering both economic and technical criteria, as well as evaluating any potential negative impacts they may entail.

Keywords: AI, Energy, Renewables.

1. Introduction

Given the increasing prominence of Artificial Intelligence (AI) and related technologies such as Big Data and the Internet of Things (IoT) across various industrial sectors, it is worthwhile to explore their implementation within the electrical grid. AI applications in this context are diverse: they can enable a better understanding of the system through digital twins, enhance supply quality via predictive maintenance of grid components, expedite inspection processes using robots, and automatically design new generation plants utilizing Machine Learning.

2. Methodology

As previously mentioned, this project will examine the feasibility of various proposals involving Artificial Intelligence (AI) with the aim of improving the quality of the electrical grid and increasing the prominence of renewable energies in the energy mix. Specifically, the main initiatives to be analyzed are:

- The implementation of existing AI systems in electrical grids from other parts of the world, such as the United States. These systems will be briefly described in the following section, and ways in which they could complement the existing systems in the Spanish grid will be studied. This will involve considering investment trends in these technologies in our country, technical aspects (such as the similarities and differences between grids, making the Spanish grid an optimal candidate for incorporating these technologies), and the limitations of the current infrastructure to support these changes.
- The potential of Generative AI to learn from existing and future digital twins of various electrical grid components and use the insights gained to develop new designs for installations, such as generation plants. Additionally, predictive models of generation and performance can be used to estimate whether these new

constructions created by AI represent a profitable investment or, conversely, an unaffordable expense, before initiating any formal processes.

- Finally, given that Chat GPT is one of the most widely used tools in the tech sector, its effectiveness in designing photovoltaic installations for residential self-consumption will be tested. Subsequently, a traditional study of the installation will be conducted to contrast the proposal made by Open AI's chatbot.

All of this will be accompanied by a final reflection on the benefits of these technologies for the sector, and a discussion on whether the high energy consumption of data centers required for implementing these systems could ultimately be counterproductive.

3. System Description

Artificial Intelligence (AI) refers to the capability of machines to perform tasks that typically require human intelligence, such as learning, decision-making, and pattern recognition.

Big Data involves the collection and analysis of large, complex, and varied datasets that enable organizations to gain insights and make informed decisions.

Internet of Things (IoT) describes a network of interconnected physical devices that collect and share data over the internet, enhancing efficiency and enabling new applications across various industries. Together, these fields drive innovation and digital transformation.

These tools are already being utilized to enhance the services of energy companies in various domains. In generation, they have applications such as predicting natural resources for renewable energy production and forecasting the health status of generating elements. Examples include Iberdrola's MeteoFlow System [1] and the IA4TES project for predictive maintenance of offshore wind farm turbines [2].

In electrical distribution, AI and Big Data are used for detecting high-risk locations within the grid, optimizing equipment replacement plans, and constantly monitoring electrical system components, as done in the United States to enhance grid robustness and improve the quality of electricity supply [3].

AI can also function as a virtual grid operator, performing maneuvers to ensure proper supply to users, or as an agent in the inspection processes of installations through robots such as Sparky (for inspecting electrical substations) or the Hummingbird Drone (for examining wind turbines without requiring shutdowns).



Illustration 1. Robot Dog Sparky performing inspection tasks at an electrical substation. Source: Avangrid [5].

Moreover, these inspection systems can also be used to capture images and other useful information for the development of digital twins. These twins aid in personnel training, improve communication and understanding with equipment suppliers, and help prevent occupational hazards. For these reasons, digital twins are already in use for hydroelectric [7] and nuclear power plants [8] in Spain.

Furthermore, the tool known as Chat GPT [9] is increasingly used in the industry. To analyze the value of this AI in the field of renewable energy, it will be tasked with designing a solar panel installation for residential self-consumption.

OpenAI's chatbot will request a series of inputs from the user, which will be provided to start the design proposal. The initial data are:

- Geographical location: The residence is located in the northwest part of Madrid.
- Orientation, roof angle, and available space: It is a flat rooftop about 25 meters high, with 25 m² of available space for the installation.
- Shade: At this height, there is no vegetation or other buildings around that could shade the panels.
- Energy consumption: Below is a monthly breakdown of the household's electricity consumption:

<i>Month</i>	<i>Energy consumption (kWh)</i>
January	246
February	256
March	262
April	286
May	232
June	204
July	104
August	93
September	243
October	255
November	276
December	305

Table 1. Energy consumption breakdown. Source: Own production.

- Technical details: The household electrical system is single-phase (230 VAC) and does not have any inverters installed.
- Budget and preferences: The estimated budget is between €5000 and €7500, with no Brand preferences, aiming for a reduction in the electricity bill.

4. Results

The implementation of digital twins for training Generative Artificial Intelligences, as well as AI-based systems to enhance the quality of the electrical grid supply, can be economically viable given Spain's current trends in this field. Spain, alongside Italy, is leading the list of European Union countries investing the most in Artificial Intelligence, with a projected expenditure of €1204.9 million [10].

Other factors that make Spain an optimal candidate for implementing AI-based technologies from the U.S. grid include the fact that Spain's electrical system is much smaller, making its management simpler, installation cheaper, and presenting a lower risk of incidents since fewer IoT devices are needed to cover the entire network. Additionally, the climate in Spain is much less harsh than in North America, reducing the likelihood of severe supply interruptions like those experienced in Texas in May 2023 due to extreme weather conditions [11].



Illustration 2. Photograph of power towers damaged by severe storms in Texas, USA, in May 2024. Source: Yakima Herald [11].

However, the integration of all these new systems will necessitate the construction of a significant number of data centers to process the vast amounts of data required for the proper functioning of these AI and Big Data-based systems. The primary challenge posed by these centers is their colossal energy consumption, which is expected to grow to nearly 10% of global energy demand. Consequently, Spain may not be able to accommodate such a sudden increase in demand at present, thereby limiting the incorporation of AI into the Spanish electricity grid.

On the other hand, the proposal for the solar panel installation provided by Chat GPT is as follows (translated from Spanish):

Design of the Photovoltaic System

1. Calculation of Required Power

To significantly reduce the electricity bill, the goal would ideally be to cover the annual consumption with photovoltaic generation. For this, we will use the average solar irradiation at the location of the residence (specify the city for greater accuracy). Let's assume an average annual irradiation of 4 kWh/m²/day.

Annual energy needed = 2758 kWh

Daily energy needed = {2758 kWh} / {365 days} ≈ 7.56 kWh/day

System power = {7.56 kWh/day} / {4 kWh/m²/day} ≈ 1.89 kW

2. Selection of Solar Panels

Assuming solar panels with a power rating of 300 W each:

$Number\ of\ panels = \{1.89\ kW\} / \{0.3\ kW/panel\} \approx 6.3\ panels$

Rounding up, we would need 7 solar panels of 300 W each.

3. Selection of the Inverter

For a 1.89 kW system, a 2 kW inverter would be appropriate. Examples of available single-phase inverters on the market include brands such as Fronius, SMA, or Huawei, all of high quality.

4. Cost Calculation

- **Solar panels:** 7 panels * €300 = €2100
- **Inverter:** Approx. €800
- **Mounting structure, cables, protection, and other components:** Approx. €1200
- **Labor and installation:** Approx. €1200

- **Estimated total:** €5300

This fits within the estimated budget.

Detailed Proposal

1. Main Components

- **Solar panels:** 7 units of 300 W each
- **Inverter:** 1 unit of 2 kW (single-phase)
- **Mounting structure and other accessories:** Cables, protections, etc.

2. Installation and Connection

- **Installation type:** On the roof, optimally oriented towards the south with the appropriate angle.
- **Electrical connection:** Directly to the internal grid of the home with protection to prevent feed-in in case of non-surplus configuration.

This design has been deemed imprecise for several reasons outlined below:

- Underdimensioning of the installation: Considering a single irradiation value results in an installed power nearly 2 kW lower than necessary. This can be addressed by breaking down irradiation levels by month, obtained using the PVGIS software [12]. By analyzing the monthly solar irradiation levels, it is determined that the installation should be dimensioned based on the month of December (due to low sunlight and high heating consumption).

<i>Month</i>	<i>Monthly energy consumption (kWh)</i>	<i>Monthly solar irradiation (kWh/m²)</i>	<i>Power (W)</i>
Jan	246,00	115,14	2670,66
Feb	256,00	145,07	2205,83
Mar	262,00	153,93	2127,59
Apr	286,00	159,90	2235,77
May	232,00	206,72	1402,86
Jun	204,00	217,94	1170,05
Jul	104,00	231,70	561,07
Aug	93,00	220,28	527,74
Sep	243,00	186,33	1630,17
Oct	255,00	158,06	2016,64
Nov	276,00	104,60	3298,28
Dec	305,00	108,64	3509,30

Table 2. Calculation of the total installed power of the installation.. Fuente: Own production.

- Equipment Overcost: By choosing 300 W panels (in addition to the incorrect calculation of the installed power), the available space has been underutilized, and the panels have a surprisingly high price. For a 3.5 kW installation, 7 solar panels of 545 W each can be used, covering the entire required power at a significantly lower cost (a total of €1253, model JAM72S30-545/MR by JA Solar). The inverter also presents a notable overcost, as the SUN2000-3KTL-L1 model by Huawei, with a nominal power of 3 kW and capable of handling 4.5 kW of solar generation, would be perfectly suitable for this system at a cost of €520, almost €300 cheaper than the one suggested by OpenAI's chatbot.
- Design Inaccuracies: Chat GPT mentions an optimal tilt angle but does not provide a specific value. Using PVGIS, it is determined that the optimal tilt angle (the one that best utilizes the incident sunlight) is 34° from the horizontal. This is not the only inaccuracy in Chat GPT's proposal, as it also fails to provide guidelines on the system's electrical protections, grounding, or wiring system.

5. Conclusions

To sum up, it is clear that Artificial Intelligence is a valuable ally for the electrical sector, enabling the estimation of generation levels, optimizing infrastructure inspection tasks, and refining grid management. However, it must be considered that the implementation of these systems leads to a significant increase in electrical demand. This demand is expected to continue growing exponentially, mirroring the increasing data trends seen today, which will in turn be reflected in the energy consumption of data centers. Thus, the implementation of this technology could become counterproductive if not integrated in a smart and measured manner.

Furthermore, while OpenAI's flagship product may be one of the most reliable allies in other industrial sectors, this is not the case for the design of solar panel installations. The proposals offered by Chat GPT can only be described as incomplete and imprecise. However, this does not render it entirely useless: its design can serve as a preliminary draft upon which a sector professional can build, correcting any errors the AI may have made, similar to the work an intern might do.

Ultimately, there is a tendency to idolize Artificial Intelligence today, and despite being a highly effective tool in many disciplines, it is important to remember that, like humans, it can make mistakes. Moreover, the implementation of this technology is not without cost and brings challenges for the infrastructure and energy supply of the country.

6. References

- [1] Iberdrola, «Proyecto MeteoFlow,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/proyecto-meteoflow>. [Último acceso: 2024].
- [2] V. N. A. A. D. P. N. Gorostidi, «Mantenimiento Predictivo de Líneas de Amarre de Turbinas Eólicas Flotantes Offshore usando Redes Neuronales Profundas,» *Journal of Physics: Conference Series*, 2022.
- [3] Avangrid , «Avangrid Pioneers In-House Creation of Artificial Intelligence to Increase Reliability,» 16 Agosto 2023. [En línea]. Available: https://www.avangrid.com/es/w/avangrid-pioneers-in-house-creation-of-artificial-intelligence-to-increase-reliability?p_1_back_url=%2Fes%2Fsearch%3Fq%3Dgeomesh.
- [4] Endesa, «Inteligencia artificial para mejorar nuestros servicios,» 2 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/proyectos/todos-los-proyectos/transicion-energetica/digitalizacion/inteligencia-artificial-mejorar-servicios>.
- [5] Avangrid, «Avangrid Pilots Mobile Robot Dog to Advance Substation Inspections with Artificial Intelligence,» 8 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.avangrid.com/es/w/avangrid-pilots-mobile-robot-dog-to-advance-substation-inspections-with-ai>.
- [6] Iberdrola, «Llevamos a WindEurope Bilbao las más innovadoras tecnologías en generación eólica,» 20 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola->

lleva-a-windeurope-bilbao-las-mas-innovadoras-tecnologias-en-generacion-eolica.

- [7] El Periódico de la Energía, «Endesa aplica la inteligencia artificial para crear “gemelos digitales” de sus centrales hidroeléctricas,» 8 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/endesa-aplica-inteligencia-artificial-crear-gemelos-digitales-centrales-hidroelectricas/>.
- [8] A. B. Barrio, «Gemelos digitales en inspecciones estructurales en centrales nucleares,» *Revista Nuclear España*, 2024.
- [9] Open AI, «Chat GPT 4o,» 2024. [En línea]. Available: <https://chatgpt.com/>.
- [10] European Commission, Joint Research Centre, «Mapping EU level funding instruments to Digital Decade targets,» 2023. [En línea]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e2b493b-5c27-11ee-9220-01aa75ed71a1/language-en>.
- [11] Yakima Herald, «Severe storms kill at least 4 in Houston knock out power to 900.000 homes,» 2024.
- [12] PVGIS, «Photovoltaic Geographical Information System,» 2024. [En línea]. Available: <https://pvgis.com/#>.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Motivación del proyecto.....	6
1.2 Objetivo del proyecto	7
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	9
2.1 Big Data.....	9
2.2 Inteligencia Artificial	12
2.3 Internet de las Cosas (IoT)	13
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	16
3.1 Inteligencia Artificial en las Redes Eléctricas.....	19
3.2 Digitalización dentro del sector de la generación de energía	31
3.3 Inteligencia Artificial Generativa.....	36
Capítulo 4. Aplicaciones de la tecnología.....	39
4.1 Análisis del potencial del modelo de Red Eléctrica apoyada por IA en España	40
4.1.1 Especificación del diseño	40
4.1.2 Viabilidad.....	41
4.2 Análisis del potencial del aprendizaje de la IAG mediante Gemelos Digitales de Instalaciones de Generación de Energías Renovables	46
4.2.1 Especificación del diseño	46
4.2.2 Viabilidad.....	47
4.3 Análisis del potencial de la IAG para el diseño de instalaciones fotovoltaicas en domicilios particulares.....	49
4.3.1 Expectativas del experimento.....	49
4.3.2 Datos de partida.....	51
4.3.3 Desarrollo del experimento.....	55
4.3.4 Análisis de los resultados	65
Capítulo 5. Alineación con los ODS	67
Capítulo 6. Conclusiones.....	70

<i>Capítulo 7. Bibliografía.....</i>	<i>72</i>
<i>ANEXO I. Fichas técnicas de equipos.....</i>	<i>80</i>

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Cantidad real y prevista de datos generados a nivel mundial. Fuente: Statista [2].	10
Ilustración 2. Encuesta sobre innovaciones tecnológicas. Fuente: PwC [6].	16
Ilustración 3. Gráfico de inversión de las grandes tecnológicas en start-ups de IA. Fuente: CB Insights [7].	17
Ilustración 4. Inversión en las distintas aplicaciones de la IA. Fuente: Omdia Tech [8].	18
Ilustración 5. Plano del parque eólico offshore de East Anglia Three. Fuente: Scottish Power [10].	20
Ilustración 6. Complejo eólico offshore East Anglia. Fuente: Iberdrola [11].	21
Ilustración 7. Ilustración de un aerogenerador flotante. Fuente: Iberdrola [17].	24
Ilustración 8. Infografía del funcionamiento de MeteoFlow. Fuente: Iberdrola [18].	25
Ilustración 9. Ranking de países según su inversión en IA. Fuente: Stanford University [19].	26
Ilustración 10. Mapa de los activos de energías renovables de Avangrid en los Estados Unidos de América. Fuente: Avangrid Renewables [21].	28
Ilustración 11. Perro robot Sparky realizando tareas de inspección en una subestación eléctrica. Fuente: Avangrid [22].	29
Ilustración 12. Central hidroeléctrica de El Pintado (Sevilla). Fuente: El Periódico de la Energía [26].	32
Ilustración 13. Simulación de recorridos en planta y localización precisa de equipos de una central nuclear. Fuente: Revista Nuclear España [27].	33
Ilustración 14. Dron Colibrí. Fuente: Iberdrola [28].	35
Ilustración 15. Valoración de las seis empresas de IAG con estatus de unicornio en 2022. Fuente CB Insights [29].	36
Ilustración 16. Gráfico de compañías que utilizan productos de Open AI, según su sector industrial. Fuente: Enterprise Apps Today [30].	37

Ilustración 17. Herramientas de búsqueda basadas en IA que los desarrolladores de software usaron regularmente en 2022. Fuente: Stack Overflow [29].....	38
Ilustración 18. Inversión de los distintos países de la Unión Europea en el campo de la Inteligencia Artificial. Fuente: Comisión Europea [30].	42
Ilustración 19. Mix energético de Estados Unidos en el año 2023. Fuente: EIA [31].	43
Ilustración 20. Mix energético de España en el año 2023. Fuente: REE [32].	44
Ilustración 21. Fotografía de torres eléctricas derruidas a causa de las fuertes tormentas en Texas, EE.UU. en mayo de 2024. Fuente: Yakima Herald [38]	45
Ilustración 22. Diagrama de la arquitectura del sistema. Fuente: Elaboración propia.	47
Ilustración 23. Gráfico del consumo energético de la vivienda de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	54
Ilustración 24. Ilustración generada por Inteligencia Artificial (DALL-E) de la instalación diseñada. Fuente: Open AI [41].	57
Ilustración 25. Mapa de zonas de radiación solar en España. Fuente: Plasol [42].	58
Ilustración 26. Niveles de irradiación solar en la zona. Fuente: PVGIS [43].	60

Índice de tablas

Tabla 1. Datos de consumo del domicilio de estudio. Fuente: Elaboración propia.	53
Tabla 2. Niveles de irradiación en la zona del domicilio de estudio. Fuente: PVGIS [43].	59
Tabla 3. Cálculo de la potencia a instalar. Fuente: Elaboración propia.	61

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Hace tan solo un par de años el concepto de la Inteligencia Artificial parecía algo lejano, demasiado futurista o incluso que pertenecía al género de la ciencia-ficción; pero mucho ha cambiado desde entonces y las Inteligencias Artificiales ya son una realidad, y más allá de los usos más cotidianos que pueda tener esta tecnología como hacerle preguntas a Chat GPT (que también se explorará en este proyecto), en estos momentos hay miles de empresas exprimiendo todo el potencial de la IA para expandir sus negocios o mejorar sus servicios. Lo que la mayoría de la población mundial conoce sobre la IA es tan sólo la punta del iceberg y esta es la principal motivación para la realización de este trabajo: saber de qué es capaz realmente la Inteligencia Artificial.

A lo largo de la presente memoria se buscará dar respuestas a todas aquellas preguntas que pueda suscitar esta nueva tecnología: ¿Por qué es tan rentable? ¿La red eléctrica española está lista para implementar las Inteligencias Artificiales? ¿Puede la IA contribuir a la descarbonización y a una gestión más eficiente de la energía?

Todas estas son tan sólo algunas de las tantas preguntas que plantea el proyecto y que demuestran el inconmensurable potencial de la Inteligencia Artificial en este y otros muchos sectores, siendo esa la principal motivación para la realización este Proyecto de Fin de Grado.

1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

Como se ha planteado en el apartado anterior, el tema escogido genera una gran cantidad de dudas e inquietudes a las que se tratará de dar la mejor respuesta posible en este proyecto. Estas respuestas surgirán al afrontar los siguientes objetivos a lo largo de todo el Trabajo De Fin De Grado:

- Estudiar el potencial de implementar en el sistema eléctrico español tecnologías basadas en Big Data, Internet de las Cosas y, por supuesto, Inteligencia Artificial. Todo esto tomando como ejemplo proyectos en desarrollo o incluso ya en funcionamiento en otras partes del mundo, y teniendo en consideración todos los avances realizados actualmente en España. Estas iniciativas que se tomarán como referencia se expondrán en el apartado 3.1, mientras que en el Capítulo 4. se debatirá su viabilidad tanto técnica como económica.
- Analizar el potencial de los sistemas de Inteligencia Artificial para utilizar los gemelos digitales de los distintos componentes de la red eléctrica (de los que se ofrecerán ejemplos en el apartado 3.2 de la presente memoria) como herramientas de aprendizaje para que posteriormente Inteligencias Artificiales Generativas sean capaces de diseñar instalaciones similares por sí solas. Con estos diseños y un análisis masivo de datos históricos del rendimiento de las centrales y redes que servirán de aprendizaje para la IA, se podrán crear modelos predictivos que ayuden a determinar si estas instalaciones diseñadas artificialmente pueden ser inversiones viables o no.
- Determinar el potencial de la Inteligencia Artificial Chat GPT para el diseño de una instalación de autoconsumo mediante paneles solares en un domicilio particular. Se le pedirá a la IAG que ofrezca un diseño con todos los *inputs* que ésta pueda requerir y a continuación, se diseñará a la antigua usanza para contrastar la validez de la propuesta del *chatbot* de Open AI.

Por último, y tras analizar las tres propuestas mencionadas, en el Capítulo 6. se expondrán las conclusiones obtenidas tras la realización del presente proyecto y se reflexionará cuán beneficioso pueden ser estas iniciativas para el sector.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En este capítulo se expondrán las distintas tecnologías que se mencionarán a lo largo de toda la memoria, así como su historia y principios básicos de funcionamiento de éstas, con el objetivo de facilitar la comprensión y lectura de la presente memoria.

2.1 *BIG DATA*

El *Big Data* se refiere al conjunto de datos que debido a su gran tamaño y complejidad se hace imposible su análisis por métodos tradicionales y por tanto deben ser examinados computacionalmente para así poder encontrar patrones, tendencias y asociaciones en estos datos. El término *Big Data* no solo hace referencia al gran volumen de información, sino también a la variedad del tipo de datos y a la velocidad a la que se generan. Es una práctica común referirse a estos tres aspectos como las “3 *V's del Big Data*” [1]:

- **Volumen:** Hace referencia a la cantidad masiva de datos que se generan constantemente. Un ejemplo de esto son las redes sociales, donde se generan terabytes de datos a diario.
- **Variedad:** Esta gran masa de datos puede presentarse en diversos formatos, tanto estructurados (también llamados SQL, bases de datos tradicionales en los que la información se muestra en filas y columnas) como no estructurados (No-SQL, no tienen ningún formato ni organización definida). Esta diversidad requiere métodos y tecnologías específicas para su procesamiento.
- **Velocidad:** La rapidez con la que se generan y procesan los datos es crucial. Los datos se crean en tiempo real o casi en tiempo real, lo que exige sistemas que puedan gestionar y analizar estos datos rápidamente para extraer información útil.

Estas “3 V’s” no harán sino aumentar con los años, pues como se puede apreciar en la Ilustración 1, cada vez habrá más información y se creará de forma más rápida y en formatos más diversos.

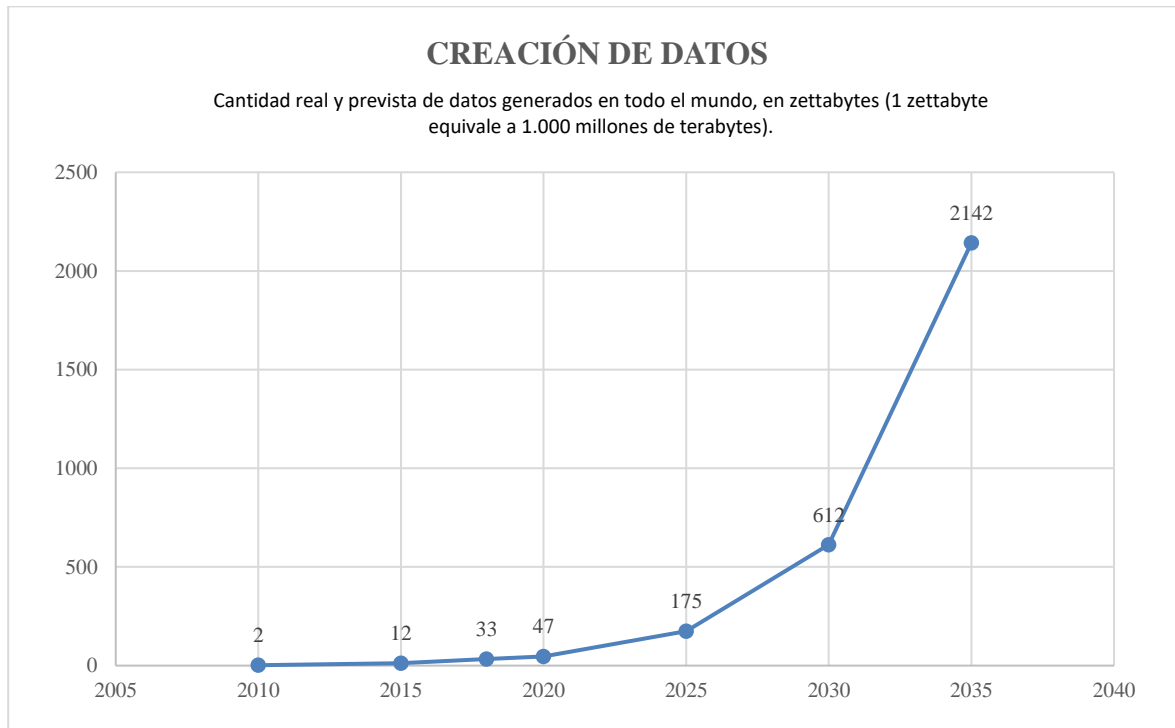


Ilustración 1. Cantidad real y prevista de datos generados a nivel mundial. Fuente: Statista [2].

Más allá de estos tres aspectos, los expertos suelen destacar “otras 3 V’s”:

- **Veracidad**, en referencia a la calidad de los datos y la confianza en la precisión de la información obtenida. La veracidad de los datos puede verse afectada por errores, información incompleta, o incluso por la interpretación errónea de los datos recogidos.
- **Valor**. Los datos recogidos deben tener alguna utilidad para el proyecto que se esté llevando a cabo
- **Variabilidad**. Durante la generación de datos interfieren distintas variables, como por ejemplo el cómo se obtuvieron esos datos.

El procesamiento de *Big Data* implica varias tecnologías y herramientas diseñadas para manejar grandes volúmenes de datos de manera eficiente. Algunas de las tecnologías más comunes incluyen:

- **Hadoop y Spark.** Ambas son herramientas de procesamiento de grandes volúmenes de información. Hadoop permite procesar datos en paralelo, al contener estos datos en distintos clústers; mientras que Spark destaca por tener un procesamiento de memoria más rápido que Hadoop [3].
- **Bases de Datos No SQL.** Permiten gestionar grandes cantidades de datos no estructurados o semiestructurados y destacan por su flexibilidad, recogiendo datos tan diversos como pueden ser los obtenidos de las Redes Sociales.
- **Herramientas de visualización de datos.** Destacan aplicaciones como Tableau o Power BI para ayudar a visualizar los datos de forma comprensible y que facilite el análisis de éstos.

El *Big Data* tiene aplicaciones en diversos campos, proporcionando *insights* valiosos que pueden transformar industrias enteras. Uno de los ejemplos más importantes es el sector de la salud, donde el análisis de *Big Data* puede ayudar con el diagnóstico precoz de enfermedades, personalización de los tratamientos e incluso con el seguimiento de brotes epidemiológicos; pero sigue siendo una herramienta igual de importante en otros sectores como el marketing, las finanzas o la manufactura.

A pesar de sus beneficios, el *Big Data* también presenta varios desafíos como la privacidad y seguridad de los grandes volúmenes de información que se analizan, la necesidad de avanzadas y costosas infraestructuras destinadas al almacenamiento y proceso de esos datos, o la cada vez más alta demanda de personal especializado en análisis de *Big Data*. Todo esto puede dificultar la implementación de soluciones de *Big Data* para algunas organizaciones que no puedan asumir esta inversión.

En resumen, el *Big Data* representa una revolución en la forma en que las organizaciones recopilan, procesan y utilizan datos. Con su capacidad para ofrecer *insights* profundos y

accionables, el *Big Data* está transformando industrias y mejorando la toma de decisiones en todo el mundo. Sin embargo, para aprovechar plenamente sus beneficios, es necesario abordar sus desafíos inherentes, especialmente en términos de privacidad, seguridad y calidad de los datos.

2.2 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La Inteligencia Artificial (IA) es un campo de la informática que se centra en la creación de sistemas capaces de realizar tareas que, por lo general, requerirían inteligencia humana. Entre estas tareas se encuentran el reconocimiento de voz, la toma de decisiones, la traducción de idiomas y la percepción visual, entre otras muchas. El principal objetivo de la IA es imitar el comportamiento cognitivo humano mediante el uso de algoritmos y modelos matemáticos de aprendizaje.

Antes de nada, convendría dar un cierto contexto histórico sobre esta tecnología, ya que no es algo tan nuevo como la mayoría podría pensar pues su historia comienza en los años 40, cuando los investigadores Warren McCulloch y Walter Pitts dieron a conocer al mundo su modelo de ‘neuronas artificiales’, que para muchos fue considerada la primera inteligencia artificial. Los siguientes pasos fueron dados en 1950 por el hombre que descifró Enigma: el matemático Alan Turing, que planteó una prueba que permitiría saber si una máquina puede llegar a demostrar un comportamiento semejante al de un ser humano o no. No sería hasta 1956 que John McCarthy bautizaría a la ciencia de hacer inteligentes a las máquinas como ‘Inteligencia Artificial’. Desde entonces, la humanidad ha visto nacer a IAs como el *Big Blue* de IBM, capaz de derrotar al campeón mundial de ajedrez Garri Kaspárov; o el ya más que famoso Chat GPT de Open AI [4]. En la actualidad, el crecimiento de esta tecnología sigue una tendencia exponencial impulsado por los avances en el campo del aprendizaje automático (*Machine Learning*) y el aprendizaje profundo (*Deep Learning*).

El *Machine Learning* es una subdisciplina de la IA que se focaliza en el desarrollo de los algoritmos que hacen posible a las máquinas aprender de los datos que reciben; es decir, en

vez de programarlas para realizar una sola tarea específica, se les brinda la oportunidad de también reconocer patrones para hacer predicciones o para tomar decisiones basadas en la información recibida. Existen varios tipos de aprendizaje automático, entre los que se encuentran el aprendizaje supervisado (cuyo objetivo es desarrollar un modelo que convierta los *inputs* en *outputs* que se deseen), el no supervisado (aquí los datos no están etiquetados y el modelo deberá organizar los datos por sí mismo) y el aprendizaje por refuerzo (muy común en robótica, el modelo aprende a base de prueba y error).

Por otro lado, el *Deep Learning* es una rama del aprendizaje profundo que modela y resuelve problemas más complejos haciendo uso de redes neuronales profundas, las cuales están compuestas por múltiples capas de neuronas artificiales capaces de extraer de los datos características de interés de forma automática. Además, estas capas de neuronas aprenden unas de otras y son capaces de gestionar grandes volúmenes de datos (*Big Data*), permitiendo esto una mayor precisión del modelo. Es esta precisión lo que hace que el *Deep Learning* sea una herramienta de gran valor en campos como el reconocimiento de imágenes, la traducción en tiempo real o la recomendación de contenidos.

La Inteligencia Artificial ha recorrido un largo camino desde sus inicios, evolucionando a través de diversas fases y tecnologías. El *Machine Learning* y el *Deep Learning* representan avances significativos en el campo, permitiendo a las máquinas aprender y mejorar a partir de los datos de manera autónoma. Con el continuo desarrollo y la integración de estas tecnologías, la IA sigue transformando industrias y aspectos fundamentales de nuestra vida diaria, abriendo nuevas posibilidades y desafíos para el futuro.

2.3 INTERNET DE LAS COSAS (IoT)

“Internet de las Cosas” (o IoT, por sus siglas en inglés), fue el término que acuñó el miembro del Auto-ID Center del MIT Kevin Ashton para referirse a la interconexión de dispositivos físicos a través de Internet, permitiéndoles comunicarse e intercambiar información entre sí.

Hoy en día, esta tecnología está presente en todas partes, desde en electrodomésticos hasta en sensores industriales [5].

Los componentes del Internet de las Cosas son los siguientes:

- **Dispositivos y sensores.** Son la “vista” y el “oído” del IoT. Estos sensores pueden recopilar datos del entorno como la humedad, la luz, el movimiento o la temperatura, entre muchos otros.
- **Comunicaciones.** Los datos recopilados por los sensores pueden transmitirse por redes inalámbricas como el Wi-Fi, el Bluetooth, el 5G o la comunicación vía satélite; sin embargo, para entornos industriales donde la fiabilidad juega un papel clave se suele optar por otras opciones como el Ethernet y el LAN.
- **Procesamiento de los datos.** La información enviada por los dispositivos de IoT es almacenada y procesada en plataformas centralizadas o puede ser enviada también a la nube a través de sistemas informáticos Edge¹. Es en esta parte del proceso donde se analizan los datos obtenidos para extraer información útil y con ella tomar decisiones que estarán automatizadas.
- **Interfaz del usuario.** Por último, los usuarios tienen la capacidad de interactuar con los dispositivos de IoT a través de aplicaciones móviles, interfaces web o sistemas integrados en el propio dispositivo; permitiendo así controlarlos y monitorearlos en tiempo real.

Las aplicaciones del Internet de las Cosas son muy diversas. Puede ser usado en la industria para optimizar procesos de producción o realizar mantenimientos predictivos a equipos; y también tiene usos sanitarios, permitiendo monitorear la salud de un paciente o gestionar sus enfermedades crónicas gracias a las pulseras de actividad y otros tipos de monitores. Otro de los usos más extendidos del IoT es el de los hogares inteligentes, donde dispositivos como

¹ Los sistemas informáticos Edge son plataformas que procesan y filtran los datos provenientes de los dispositivos IoT para reducir el tráfico de datos con la nube.

termostatos inteligentes o electrodomésticos conectados a la red hacen posible a los usuarios automatizar y controlar todos los rincones de sus casas de una forma más cómoda y mejorando la eficiencia energética del hogar.

Sin embargo, el Internet de las Cosas sigue enfrentándose a varios desafíos en el campo de la seguridad. Por ejemplo, una autenticación y autorizaciones mal ejecutadas pueden desembocar en robos de datos, secuestros de dispositivos o la difusión de información sensible a través del IoT. Además, otro factor clave de estos productos debe ser la ciberseguridad (en el desarrollo y durante la vida útil del mismo) a fin de evitar vulnerabilidades en el *firmware* y el *software* de los dispositivos de IoT.

En resumen, el *Internet of Things* está transformando la interacción del ser humano con el entorno y revolucionando diversas industrias. Al conectar dispositivos y sistemas, el IoT proporciona información valiosa y mejora la eficiencia y la calidad de vida, todo ello sin olvidar los desafíos de seguridad que esta tecnología plantea.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Dada la creciente popularidad de la Inteligencia Artificial, sobre todo en el mundo del entretenimiento, era de esperar que antes o después esta herramienta aportara su granito de arena también a sectores tan críticos para nuestra sociedad como son la industria o las finanzas. No es para menos, pues el potencial de la IA parece tender al infinito y ya lo afirmaban en 2017 el 66% de los expertos y empresarios españoles encuestados por PwC, cuando se les preguntó por qué innovaciones tecnológicas podrían considerarse significativas para el crecimiento, véase la Ilustración 2.

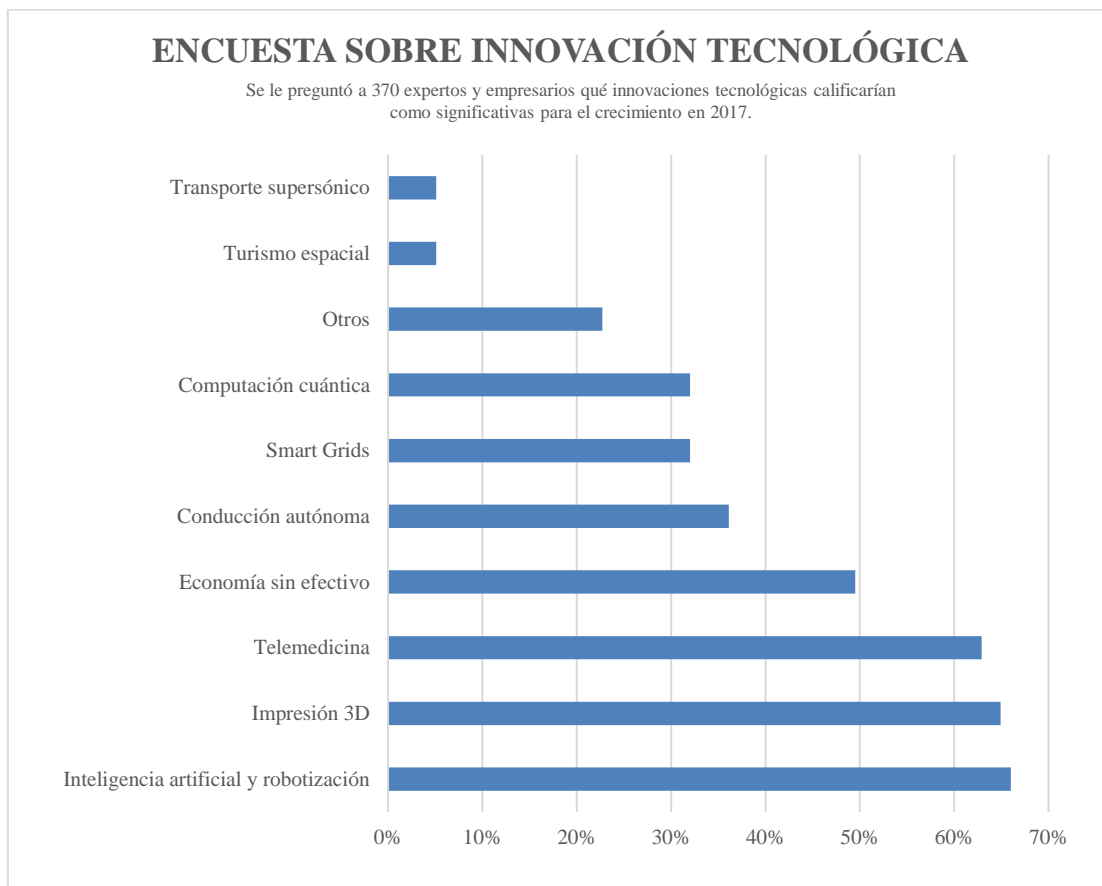


Ilustración 2. Encuesta sobre innovaciones tecnológicas. Fuente: PwC [6].

Mucho ha evolucionado la IA desde 2017, y tales son las pruebas del potencial de esta tecnología que con total seguridad se puede afirmar que gran parte del 34% restante hoy reconsideraría su posición respecto a esta cuestión.

Un síntoma de esta confianza de los empresarios en la Inteligencia Artificial podría ser la potente inversión de las grandes empresas tecnológicas en empresas de reciente creación dedicadas a la IA. Como se puede observar en la Ilustración 3, obtenida de un estudio realizado por CB Insights, hasta 74 *start-ups* fueron adquiridas por las cinco principales *Big Tech* entre 2010 y 2021, y no es para menos pues las grandes empresas buscan mejorar sus servicios y aumentar la eficiencia de sus trabajadores haciendo uso de Inteligencias Artificiales ya existentes o incluso desarrollando IAs propias para uso interno de la empresa.

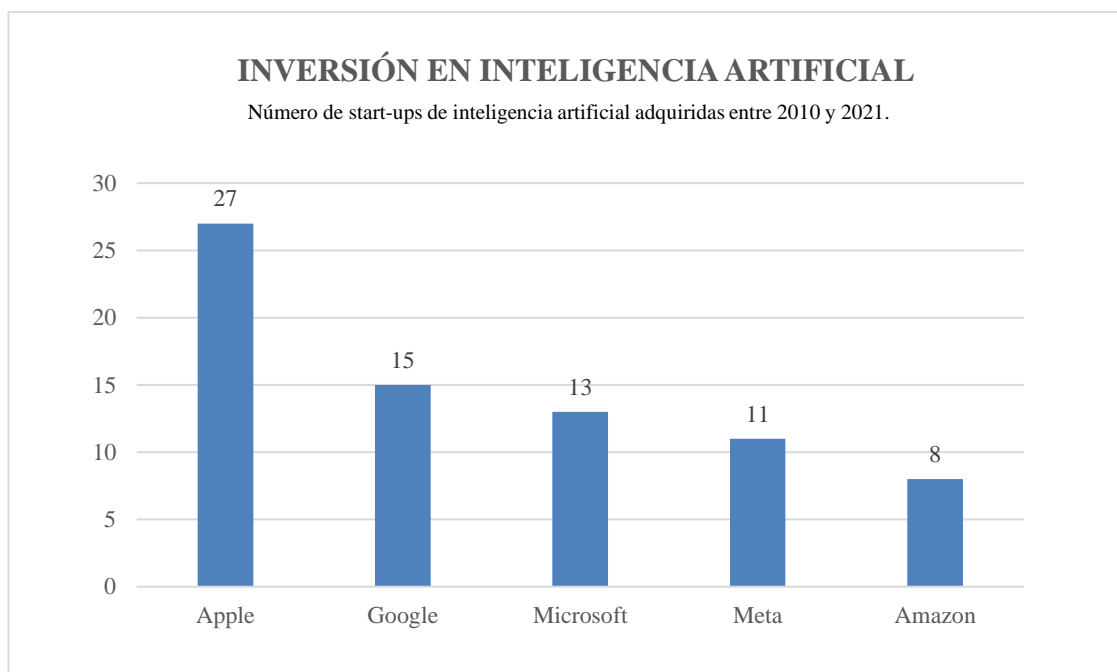


Ilustración 3. Gráfico de inversión de las grandes tecnológicas en start-ups de IA. Fuente: CB Insights [7].

Pero no todo lo que importa es la inversión en la IA, hay que analizar si es rentable y si realmente se le está sacando partido. Las cifras que ofrece el estudio, realizado por la consultora Tractica sobre los ingresos globales de la IA entre 2016 y 2025, hablan por sí solas. En la Ilustración 4 se puede observar que una de las principales aplicaciones de esta

tecnología es el mantenimiento predictivo, un concepto que se analizará y se discutirán sus posibles aplicaciones en el ámbito de las energías renovables más adelante en este documento.

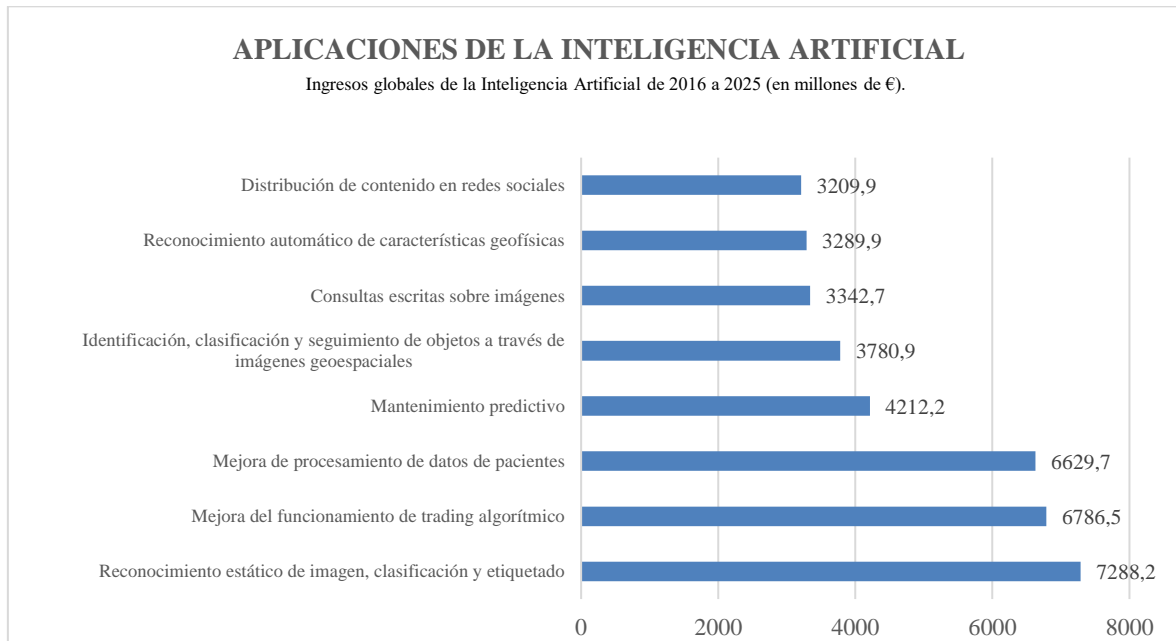


Ilustración 4. Inversión en las distintas aplicaciones de la IA. Fuente: Omdia Tech [8].

Semejante interés y cantidad de recursos dedicados a esta nueva categoría de *software* por parte de las grandes empresas llevaría a más de uno a considerar que nuestra sociedad se encuentra ante una revolución tecnológica a nivel mundial similar a la que se vivió en 1983 con el nacimiento de Internet.

A continuación, se describirá el estado de los proyectos y aplicaciones de la Inteligencia Artificial sobre los que se basarán las propuestas y análisis de potencial expuestos en el Capítulo 4. de la presente memoria.

3.1 INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LAS REDES ELÉCTRICAS

Dada la tendencia del resto de las grandes empresas de apostar por este nuevo tipo de *software*, era de esperar que la energética Iberdrola siguiera la misma tendencia y más teniendo en cuenta que ha invertido más de dos mil millones de euros en I+D+i (y con el objetivo de duplicar esta cifra para 2030), posicionándose a la cabeza de las energéticas privadas a nivel mundial en términos de inversión en Investigación, Desarrollo e Innovación; de acuerdo con la Comisión Europea [9].

Tal es el compromiso con la IA de la empresa de Ignacio Galán que se podría dedicar otro documento entero sólo para enumerar la inmensa cantidad de proyectos de la compañía que involucra este innovador *software*. En este apartado de la memoria únicamente se analizarán aquellos que sirvan como apoyo para las propuestas analizadas en el Capítulo 4. de este documento.

Un ejemplo de estos proyectos es el acuerdo de compraventa de energía renovable a largo plazo² al que han llegado el gigante tecnológico Amazon e Iberdrola. Con la firma de este acuerdo, la compañía de Jeff Bezos ha adquirido 159 MW de energía renovable de Iberdrola proveniente del futuro parque eólico *offshore* East Anglia Three, considerado el segundo mayor parque de aerogeneradores a nivel mundial, con una potencia instalada de 1,4 GW, con una superficie de 305 km² y ubicado en a 69 kilómetros de la costa de Suffolk, en Reino Unido [10].

² Un PPA (Power Purchase Agreement), es un acuerdo o contrato de compraventa de energía entre una empresa generadora y un comprador, generalmente por un largo plazo de tiempo [49].

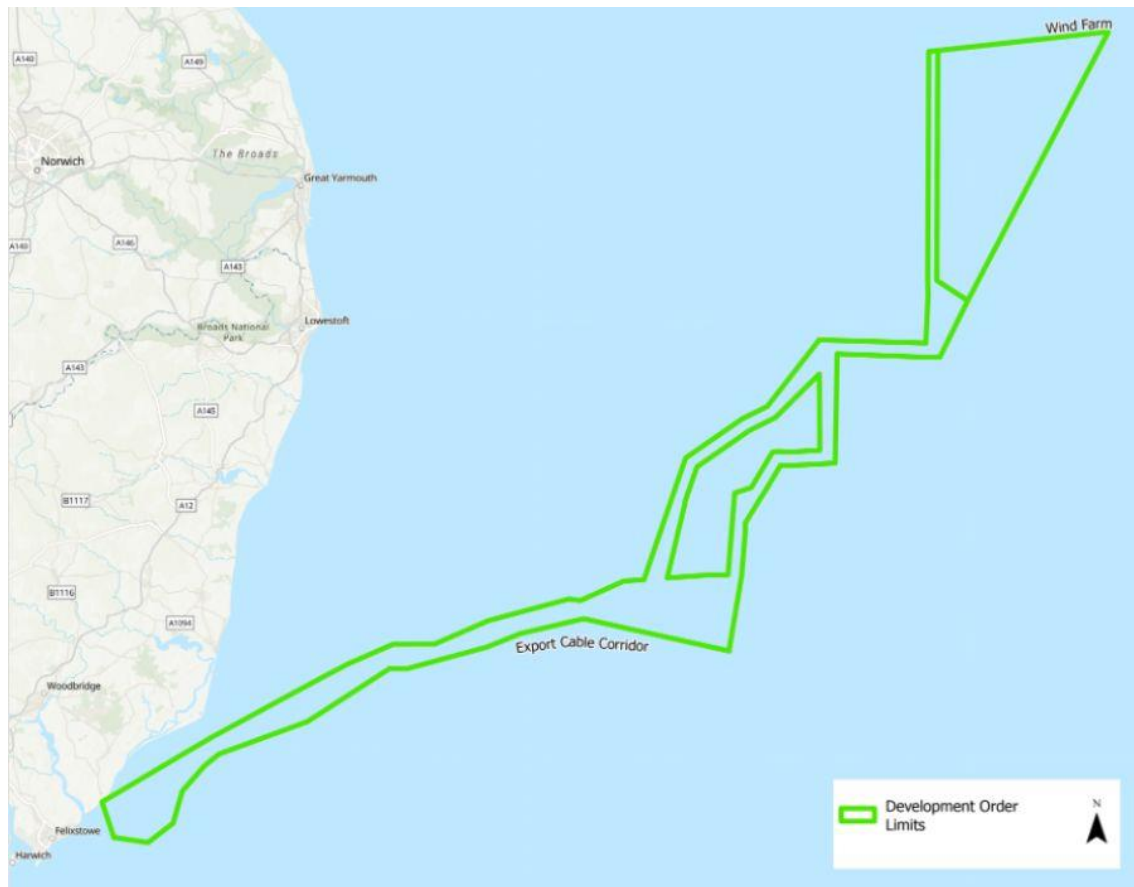


Ilustración 5. Plano del parque eólico offshore de East Anglia Three. Fuente: Scottish Power [10]

Este acuerdo no sólo permite a Amazon abastecerse de energía limpia (su objetivo es que esta suponga el 100% de su consumo para 2025), sino que además permite a Iberdrola aprovechar los servicios computacionales avanzados de *Amazon Web Services* (AWS). Esto permite a la energética realizar simulaciones climáticas complejas en menos tiempo y explotar los servicios de IA y *Machine Learning* de Amazon Sagemaker³, con los que puede evaluar cómo mejorar la eficiencia de sus instalaciones renovables en todo el mundo. Gracias a esto es que Scottish Power (la filial británica de Iberdrola) ha puesto en marcha una

³ Amazon Sagemaker es un servicio de aprendizaje automático (ML) totalmente gestionado, con el que los Data Scientists y los desarrolladores son capaces de crear, entrenar e implementar modelos de aprendizaje automático [50].

iniciativa de Internet de las Cosas (IoT), con el objetivo de tener un mejor entendimiento de su red de baja tensión en el Reino Unido gracias a la recopilación de datos realizada por nueva instrumentación conectada.



Ilustración 6. Complejo eólico offshore East Anglia. Fuente: Iberdrola [11].

Con toda esta nueva información obtenida de la red mejorada con *Internet of Things* y esta nueva alianza comercial con Amazon, ambas compañías se encuentran colaborando y desarrollando proyectos con Inteligencia Artificial Generativa apoyándose en el área de negocio de Amazon centrada en modelos funcionales de alto rendimiento e Inteligencia Artificial, conocida como Amazon Bedrock [12]. De esta forma, no sólo se puede mejorar la calidad del servicio a los clientes y tener un mayor control sobre el estado de salud de la red británica, sino que también es una herramienta que puede apoyar y aumentar la eficiencia de los empleados de Iberdrola [13].

No hace falta irse hasta Reino Unido para encontrar proyectos en los que Iberdrola explore el mundo de la Inteligencia Artificial. Sin ir más lejos, en el Global Smart Grids Innovation Hub de Iberdrola en Bilbao, se llegó a un acuerdo con el BCAM (de sus siglas en inglés

Basque Center for Applied Mathematics) para poner en marcha el proyecto Innovation Data Space (i-DS). Este innovador proyecto busca incrementar y acelerar la obtención de información de la red de BT (baja tensión) a través de la Inteligencia Artificial. Más concretamente, BCAM se encargará del desarrollo de modelos predictivos para la previsión de la demanda y generación, permitiendo así una mejor organización y planificación de los recursos de Iberdrola [14].

La colaboración con el BCAM no acaba con el proyecto i-DS, pues el centro de investigación vasco también forma parte del innovador proyecto IA4TES (Inteligencia Artificial para la Transición Energética Sostenible) [15], en el que colaboran la propia Iberdrola, la consultora Minsait, nueve PYMES expertas en IA y cuatro centros de investigación con un amplio conocimiento en Inteligencias Artificiales. El objetivo es hacer uso de la IA para garantizar una mayor eficiencia y un sistema eléctrico libre de emisiones, todo esto cumpliendo con cinco principios básicos:

- Contribuir a una crear un modelo energético sostenible, reduciendo la huella de carbono sin olvidar la creciente digitalización del sector.
- Apostar por las empresas españolas en la transformación digital que experimenta el sector y la sociedad en su conjunto.
- La colaboración de las PYMES con las grandes empresas y centros de investigación, para fomentar un mayor desarrollo económico de estas primeras, contribuyendo así a su vez con la creación de empleo de calidad a nivel regional.
- Dar a conocer los avances y resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto en foros, seminarios, charlas... con la intención de que estos hallazgos tengan un alcance de nivel internacional.
- La continua investigación de las tecnologías y herramientas estudiadas, para su futura comercialización una vez el proyecto llegue a su fin.

El proyecto IA4TES pone en marcha distintos casos de estudio dentro del marco de la digitalización del sector de las energías renovables, pero sobre todo convendría hablar del

llevado a cabo por, una vez más, BCAM acerca del mantenimiento predictivo de las líneas de amarre de los aerogeneradores flotantes de los parques eólicos *offshore* mediante redes neuronales de *Deep Learning* [16]. El objetivo de este estudio es minimizar los costes de mantenimiento y operación, los cuales acaparan aproximadamente un 20% de la inversión en este tipo de proyectos de eólica *offshore*. La metodología del proyecto se divide en dos etapas. Una primera dedicada a la simulación y obtención de datos, que se llevó a cabo gracias a simulaciones y métodos numéricos en OpenFAST⁴. Introduciendo parámetros meteorológicos, oceanográficos y especificaciones de los propios aerogeneradores, se obtuvieron datos estadísticos (medias, desviaciones típicas, etc.) que se usarían en la segunda etapa del proyecto: el entrenamiento del modelo. Aquí una vez se diseña la Red Neuronal Profunda (RNN), este modelo utiliza los datos generados para simular condiciones de acumulación de organismos marinos o el desgaste de las líneas de amarre (que son los cables que mantienen sujeto al aerogenerador, tal y como se puede observar en la Ilustración 7) para identificar posibles formas de fallo en el sistema de amarre.

El modelo logró una precisión en torno al 95%, demostrando así la viabilidad y efectividad del método. De hecho, esta metodología podría extrapolarse al mantenimiento predictivo de otros componentes de los aerogeneradores (como el sistema de engranaje o la torre) o incluso a otras tecnologías de generación de energía limpia.

⁴ OpenFAST (desarrollado por el Laboratorio Estadounidense de Energías Renovables, NREL por sus siglas en inglés) es uno de los softwares líderes en la industria eólica que destaca por su alta eficiencia computacional [51].



Ilustración 7. Ilustración de un aerogenerador flotante. Fuente: Iberdrola [17].

El papel de la IA en la predicción de sucesos futuros, no se limita sólo al estado de salud de los equipos, también se puede aplicar a la estimación de los recursos naturales necesarios para la generación de energía verde, como son la luz solar o el viento gracias a herramientas como *MeteoFlow*, desarrollado en solitario por Iberdrola Renovables. El principal valor de este *software* reside en la ventaja estratégica que otorga a la compañía en la toma de decisiones dentro de los mercados energéticos, del mismo modo que ofrece información útil para poder organizar los servicios de Operación y Mantenimiento (O&M) de las distintas instalaciones consiguiendo que estas produzcan el menor detrimento posible en el negocio [18].

Procesado y optimización de datos



Ilustración 8. Infografía del funcionamiento de MeteoFlow. Fuente: Iberdrola [18].

El sistema MeteoFlow lleva más de 15 años en funcionamiento, tiempo durante el cual se ha tenido que ir adaptando al nuevo contexto tecnológico y ha integrado herramientas como Inteligencia Artificial, *Machine Learning* y *Big Data*; hasta conseguir unas tasas de acierto superiores a las de sus competidores y con una antelación de hasta 10 días vista.

Siendo este el panorama de la Inteligencia Artificial en sector energético en Europa, era de esperar que Estados Unidos no se iba a quedar atrás, y de hecho son varios los avances que ha conseguido el gigante norteamericano en este ámbito de la mano de su filial de Iberdrola, Avangrid. Esto no es de extrañar considerando que, tal y como muestra la Ilustración 9, EE.UU. es el país líder en inversión privada en Inteligencia Artificial, con casi 250 miles de millones de dólares americanos (USD) a lo largo de 10 años.

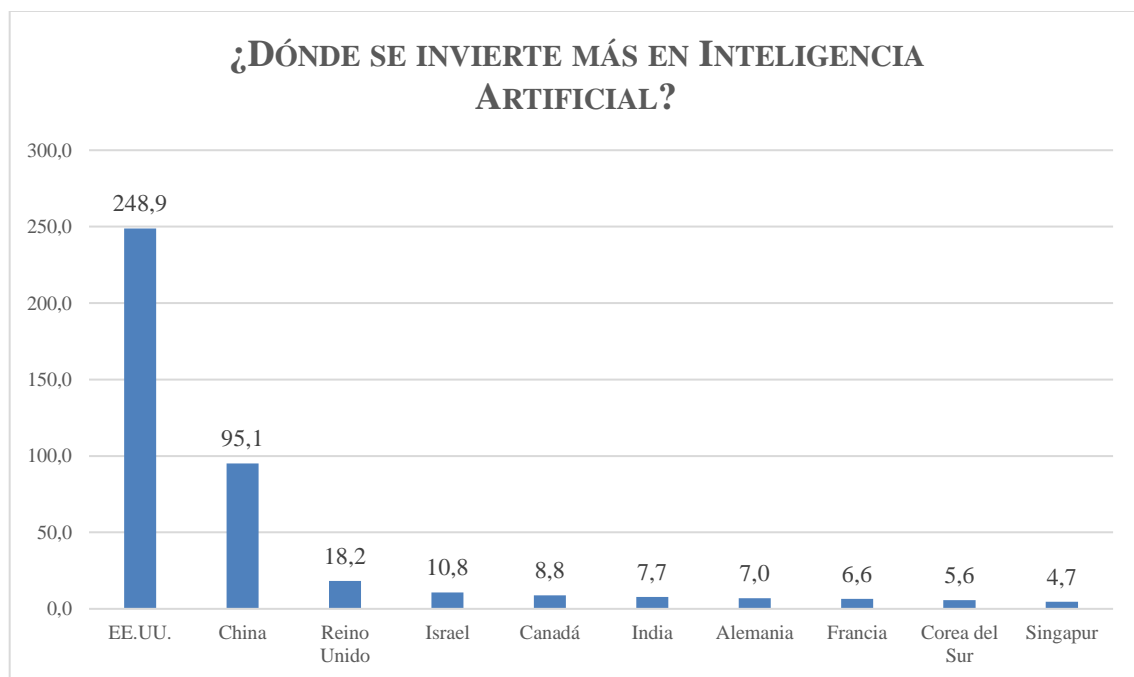


Ilustración 9. Ranking de países según su inversión en IA. Fuente: Stanford University [19].

Uno de los proyectos más destacados de la vertiente americana de la compañía de Ignacio Galán con la IA es el de implementar esta tecnología en sus redes de distribución y transporte, con el objetivo de mejorar la fiabilidad del suministro energético [20]. Siendo más específico, el equipo de *Data Science and Analytics* de la filial estadounidense ha desarrollado tres sistemas de Inteligencias Artificial propios, los cuales serán entrenados con datos de la red eléctrica estadounidense obtenidos de las distintas compañías que forman parte de Avangrid para determinar el estado de salud de la red y pronosticar su futuro rendimiento. Estos sistemas de IA son:

- **Predictive Health Analytics:** Este sistema pretende llevar a cabo un monitoreo de la salud de componentes de las subestaciones eléctricas, como pueden ser los interruptores automáticos, para un plan de sustitución y recambio más eficiente. Actualmente, los elementos de las subestaciones se cambian basándose principalmente en factores de la edad del equipo o en caso de mal funcionamiento y causando una interrupción en el suministro. Este monitoreo basado en datos de frecuencia de uso, de envejecimiento del equipo, de su vida útil, del fabricante y de observaciones durante las labores de mantenimiento permitirá un plan de recambio para aquellos equipos que puedan poner en riesgo la correcta operación de la subestación, antes de que causen una interrupción del servicio, ahorrando así costes a Avangrid y proporcionando un suministro eléctrico más robusto a sus clientes.
- **GeoMesh:** El proyecto consiste en un mapeo de las áreas a las que da servicio Avangrid (véase la Ilustración 10) en Estados Unidos para detectar las flaquezas y fortalezas de sus redes eléctricas, de tal manera que pueda predecir el rendimiento futuro de éstas en cualquier escenario meteorológico; logrando así que la compañía pueda implementar planes de mejora más efectivos y también mejorar la respuesta del sistema ante tormentas.



Ilustración 10. Mapa de los activos de energías renovables de Avangrid en los Estados Unidos de América. Fuente: Avangrid Renewables [21]

El principio de funcionamiento de GeoMesh es dividir las áreas de servicio de Avangrid en secciones más pequeñas para analizarlas individualmente y en cada una, este sistema realiza predicciones gracias al análisis masivo de datos meteorológicos y topográficos (como puede ser la velocidad del viento, la tasa de precipitación o la variedad de árboles autóctonos), así como del historial de parones o eventos relevantes para el suministro eléctrico. Con esta información, según Mark Waclawiak (Senior Manager de Desempeño Operativo en Avangrid), la filial de Iberdrola puede gestionar sus inversiones en la red para hacerla más fiable y contrarrestar el impacto de las tormentas cada vez más intensas a causa del cambio climático.

- **Health AI:** Este proyecto consiste en el análisis de los millones de fotografías con las que cuenta Avangrid de sus activos de la red de distribución a nivel urbano (como postes eléctricos, tendidos de cables, etc.) con el objetivo de identificar cada elemento dentro de las imágenes y eventualmente, realizar diagnósticos sobre el estado de salud de estos elementos. Health AI permitirá a Avangrid detectar ubicaciones de riesgo dentro de su red y mejorar la fiabilidad del suministro.

La filial americana también ha apostado por la IA en el ámbito del mantenimiento activo de sus instalaciones. Prueba de ello es el proyecto piloto que pretende usar robots para la inspección de subestaciones eléctricas haciendo uso de la Inteligencia Artificial, robots como Sparky [22].

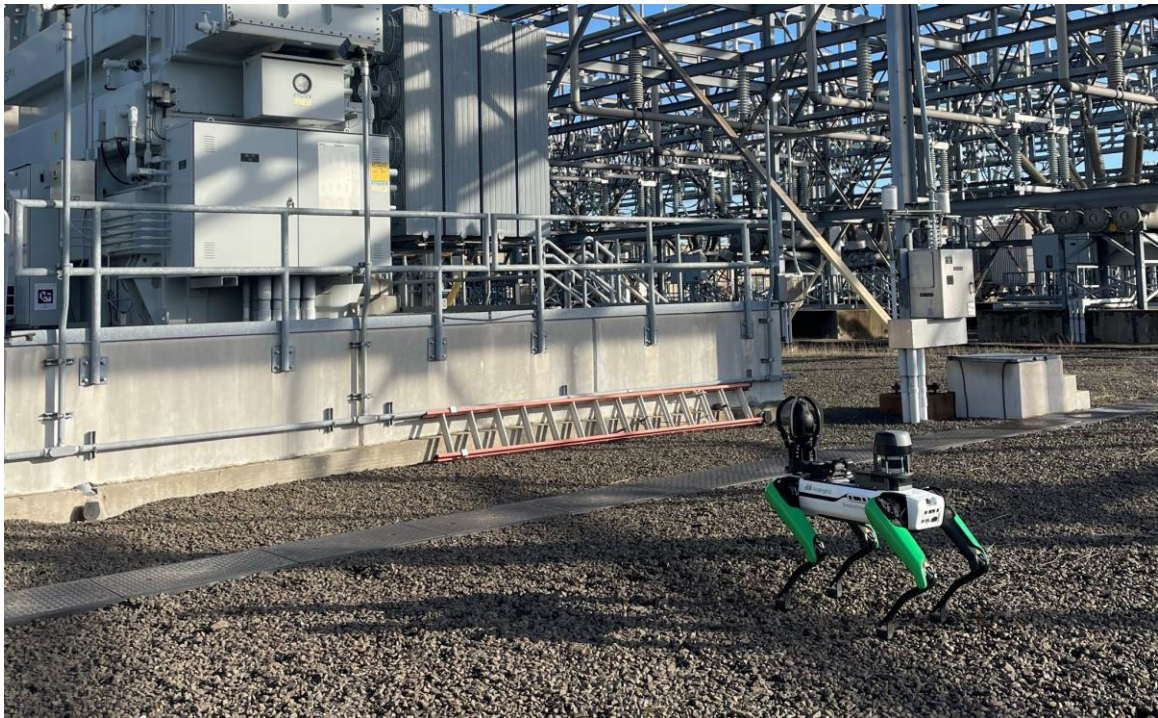


Ilustración 11. Perro robot Sparky realizando tareas de inspección en una subestación eléctrica. Fuente: Avangrid [22].

Sparky es un perro robot que prestará sus servicios a las subestaciones de Singer y de East Shore, en Connecticut, realizando labores de inspección en estas instalaciones. Gracias a sus sensores acústicos, su cámara infrarroja y su Inteligencia Artificial es capaz de realizar

inspecciones a toda la aparamenta de la subestación, detectar anomalías e incluso leer indicadores analógicos y mandar señales digitales con sus lecturas. Esta iniciativa, que surge de la colaboración de Avangrid con Boston Dynamics y LEVATAS, permitirá aumentar las garantías del suministro eléctrico al aumentar considerablemente la frecuencia de las revisiones periódicas de las subestaciones.

Se ha hablado sobre todo de los proyectos de Iberdrola y sus filiales, pero también se debe destacar la aportación de la energética española Endesa al sector con sus investigaciones sobre el uso de la Inteligencia Artificial. Cabe destacar dos proyectos en concreto:

- **Proyecto PASTORA (*Preventive Analysis of Smart Grids with Real Time Operation and Renewable Assets Integration*):** Gracias a la instalación de sensores y dispositivos inteligentes (*Internet of Things*) y al uso de Inteligencias Artificiales basadas en el análisis de millones de datos y de *Deep Learning*, el proyecto PASTORA ha permitido avanzar en términos de descarbonización del sector de la energía y en la electrificación de la economía. Todo esto mediante el análisis masivo de datos históricos para predecir futuras averías o incidencias, así como del uso del *Big Data* para la supervisión en tiempo real de sus activos. En concreto, con PASTORA se han instalado dispositivos inteligentes en centros de transformación de Media y Baja Tensión para controlar, con una precisión nunca vista, los niveles de tensión, y cámaras térmicas que ayudan a prevenir averías, pues gracias al Aprendizaje Profundo se ha conseguido correlacionar imágenes térmicas con variables eléctricas [23].
- **Proyecto LARS (*Localización de Averías y Reposición de Suministro*):** Este sistema actúa como un operador virtual de la red, del mismo modo que lo haría un operador humano, desde el Centro de Control. Es capaz de realizar maniobras de red para aislar averías y reponer el suministro en menos de tres minutos. Además, con la integración de datos históricos de averías, tasas de fallo y previsiones meteorológicas (entre otros muchos datos), LARS puede localizar con gran precisión la ubicación y la causa de la avería gracias al *Big Data* y a la Inteligencia Artificial [24].

Todas las tecnologías descritas en este apartado sirven como demostración de que la Inteligencia Artificial está cada vez más presente en la sociedad y todo apunta a que podría convertirse en uno de los pilares de la distribución eléctrica en un futuro no tan lejano.

3.2 DIGITALIZACIÓN DENTRO DEL SECTOR DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

En el apartado anterior se ha analizado cómo la Inteligencia Artificial se abre camino en el ámbito de las redes de distribución y de transporte, pero ahora se analizará otro eslabón fundamental en cualquier sistema eléctrico: la generación de energía. En concreto, se expondrán algunos de los proyectos e iniciativas que promueven la digitalización de esta área.

Aquí vuelve a ser necesario hablar de Endesa, pues ha realizado una gran apuesta por la digitalización de sus activos. En el momento en el que se redacta esta memoria, la energética española se encuentra desarrollando un gemelo digital de toda la red eléctrica española. Este proyecto, que lleva por nombre Network Digital Twin, modelará digitalmente casi 100.000 km de líneas aéreas, en torno a 1.300 subestaciones eléctricas y casi 150.000 centros de distribución [25]. Este proyecto supondrá claramente un paso de gigante en la digitalización del sector, pero en esta memoria se prestará más atención a la parte de los gemelos digitales de las plantas de generación. En concreto, Endesa ha puesto en marcha el desarrollo e implementación de gemelos digitales en diez de sus centrales hidroeléctricas, siendo la primera de ellas la de El Pintado, en Sevilla (véase la Ilustración 12).



Ilustración 12. Central hidroeléctrica de El Pintado (Sevilla). Fuente: El Periódico de la Energía [26].

Estos gemelos digitales permiten obtener una vista de la central de forma remota similar a la que ofrece Street View con fotografías 360°, permitiendo así las visitas virtuales de proveedores de equipos, la toma de medidas de la instalación e incluso obtener documentación asociada al área que muestre la fotografía 360° (como por ejemplo planos de disposición, esquemas de cableado o manuales de los equipos). Pero el desarrollo de los gemelos digitales no estaba pensado únicamente para estas visitas virtuales, sino que también se han implantado gemelos de diagnóstico en las 38 principales plantas hidroeléctricas de la compañía. Estos gemelos de diagnóstico reciben en tiempo real más de 6000 señales analógicas con las que pueden, por un lado, estimar valores futuros (una vez más se habla de mantenimiento predictivo); y por otro, enviar estas lecturas a expertos en operación y mantenimiento de los distintos equipos, de forma remota.

Esta práctica de crear gemelos digitales de plantas de generación puede tener otras aplicaciones, como preservar la seguridad y salud de los trabajadores. Este es el caso de los gemelos digitales de las centrales nucleares [27]. En España, estos modelos son una realidad y ya se usan en centrales como Almaraz.



Ilustración 13. Simulación de recorridos en planta y localización precisa de equipos de una central nuclear. Fuente: Revista Nuclear España [27].

La implementación de estos modelos digitales en la industria de generación nuclear se ha traducido en:

- Una optimización de los procesos de revisión y mantenimiento, gracias a la localización precisa de los equipos, a la planificación de rutas de inspección más eficientes y a una mejor gestión de los accesos y los trabajos auxiliares en las instalaciones.
- Una mayor seguridad laboral, ya que con esta herramienta se consigue una más detallada y eficaz, que agiliza los procesos de inspección y minimizando así las dosis de radiación que tienen que recibir los trabajadores.
- Una mejor formación y transmisión de conocimientos, pues ya no es necesario que el nuevo personal de inspección tenga que personarse en la central para conocerla y también pueden crear simulaciones de procesos de inspección con los que poder aprender y entrenarse.

Tanto los gemelos de las centrales hidroeléctricas como los de las nucleares requieren una gran cantidad de sensores, cámaras que permitan crear imágenes 360° y demás dispositivos del Internet de las Cosas para su desarrollo, pero existen más formas de crear gemelos digitales. Un ejemplo de ello es el Dron Colibrí, presentado en marzo de 2024 en Bilbao por Iberdrola en el evento WindEurope [28].



Ilustración 14. Dron Colibrí. Fuente: Iberdrola [28].

Este dron desarrollado por la empresa salmantina Arbórea Intellbird permite revisar el estado de las palas de los aerogeneradores sin necesidad de pararlos. Esta nueva forma de inspeccionar los aerogeneradores permite realizar un análisis completo de un aerogenerador en menos 10 minutos, todo esto mientras envía imágenes de alta resolución por vía satélite y sin necesidad de ser controlado por un operador humano, pues el vuelo de este dron está totalmente automatizado. Otra ventaja que tienen estas revisiones con dron es que se evitan los esfuerzos mecánicos a los que se ven sometidos las palas en las maniobras de parada. Todas estas imágenes de alta resolución que captura el Colibrí se recopilan para crear un gemelo digital del parque eólico con el que poder monitorizar su evolución y analizar riesgos de forma predictiva.

En resumen, los gemelos digitales son una herramienta con un inmenso potencial a la hora de monitorizar la salud de las plantas de generación de energía eléctrica, de agilizar las labores de inspección e incluso de predecir su rendimiento futuro mediante el mantenimiento predictivo que puede llevar a cabo la IA.

3.3 INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Este tipo de IA ha cobrado un especial protagonismo en los últimos años y prueba ello es la valoración de las empresas dedicadas al desarrollo de Inteligencia Artificial Generativa (IAG). A continuación, en la Ilustración 15, se expone el valor monetario de seis principales empresas de “Gen AI” que además cuentan con el estado de *unicornio*⁵.

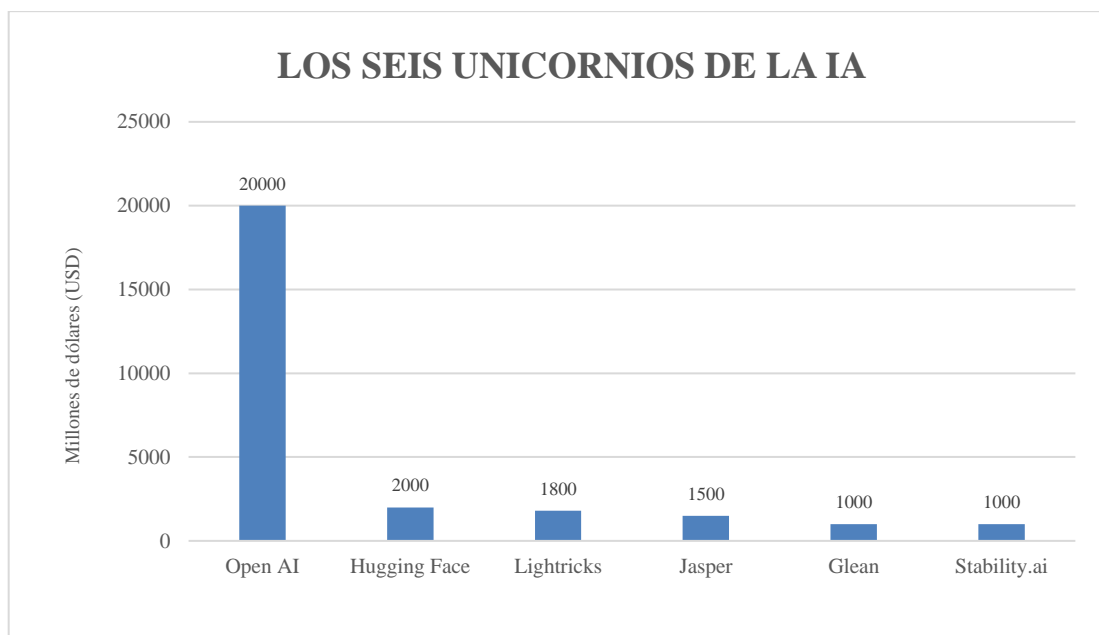


Ilustración 15. Valoración de las seis empresas de IAG con estatus de unicornio en 2022. Fuente CB Insights [29].

Esta rama de la Inteligencia Artificial se enfoca en la creación de contenido nuevo y original a partir de datos existentes haciendo uso de modelos avanzados, como redes neuronales generativas y transformadores, para producir texto, imágenes, música y otros tipos de datos que imitan o amplían los ejemplos proporcionados durante el entrenamiento. Estos modelos no solo reconocen patrones en los datos, sino que también son capaces de generar nuevas

⁵ En economía, se utiliza el término “unicornio” para referirse a aquellas empresas con un valor de mercado mayor o igual a mil millones de dólares americanos (USD).

combinaciones y variaciones, permitiendo aplicaciones en áreas como el arte, la escritura, el diseño y la creación de contenido multimedia.

De entre todas las IAGs, destaca muy por encima del resto Chat GPT (tal y como se aprecia en la Ilustración 15), desarrollada por Open AI. “GPT” se refiere a “*Generative Pre-trained Transformer*”, lo que quiere decir que este *chatbot* basa todas sus respuestas en la información con la que se le entrenase hasta su última actualización (su versión más reciente, GPT-4 Omni, cuenta con información actualizada hasta octubre de 2023). Esto hace que no sea una gran herramienta de la que obtener información reciente, pero esto no es un problema pues su verdadero valor reside en su capacidad de ofrecer respuestas coherentes, con un lenguaje natural y cada vez en más idiomas.

No es de extrañar entonces que cada vez más empresas utilicen esta herramienta en su día a día. Por ejemplo, en la Ilustración 16 se puede comprobar cómo en enero de 2023 más de 900 compañías del sector industrial reconocían utilizar los productos de Open AI.

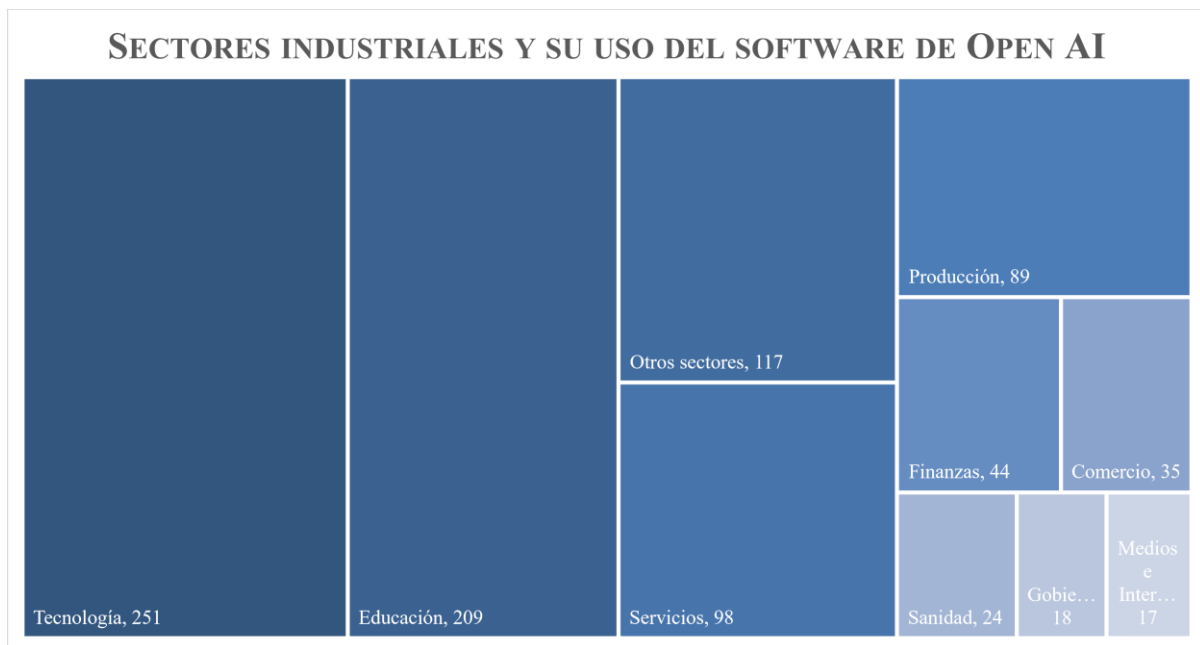


Ilustración 16. Gráfico de compañías que utilizan productos de Open AI, según su sector industrial. Fuente: Enterprise Apps Today [30].

Como se puede ver, uno de los sectores que mejor ha acogido a Chat GPT, hasta el punto de que se ha convertido en la herramienta favorita del 83,3% de los 47.195 desarrolladores de *software* encuestados en mayo de 2023 (en 185 países) por Stack Overflow (véase la Ilustración 17).

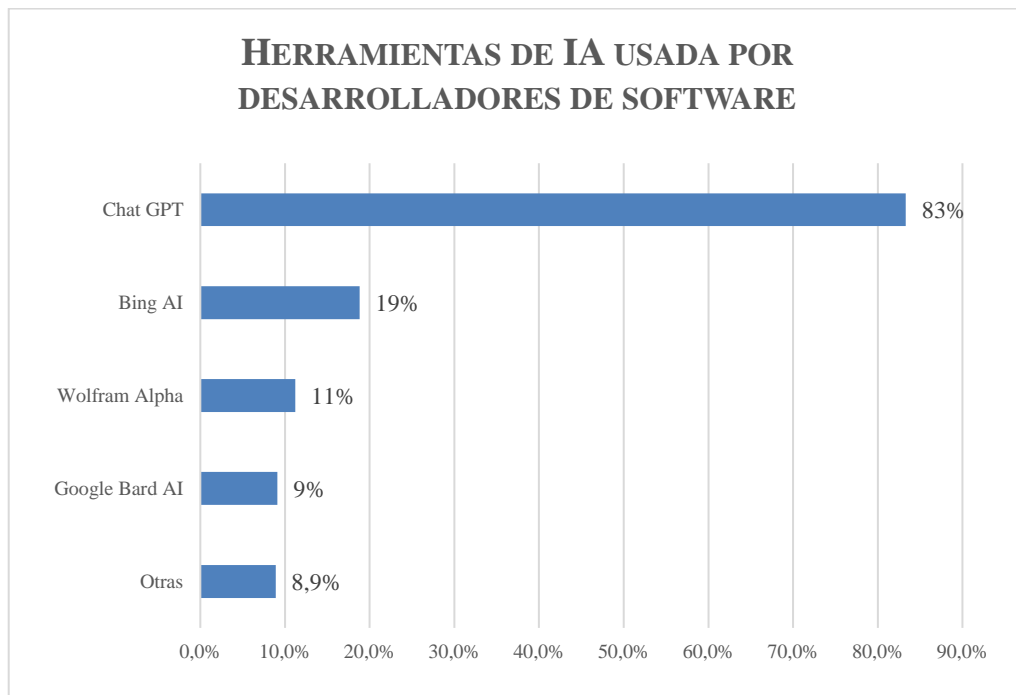


Ilustración 17. Herramientas de búsqueda basadas en IA que los desarrolladores de software usaron regularmente en 2022. Fuente: Stack Overflow [31].

Es por esto por lo que se considera que, si la Inteligencia Artificial Generativa es una herramienta tan apreciada y con tanto potencial en sectores como la programación, no debería existir motivo por el cual no pueda aplicarse de igual manera al sector eléctrico, y en especial, al de las energías renovables, como la solar fotovoltaica.

Capítulo 4. APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA

Tras examinar en el Capítulo 3. el estado actual del uso de la Inteligencia Artificial en el sector energético queda claro que esta tecnología está revolucionando la manera en que las empresas energéticas gestionan y optimizan sus operaciones. Se ha visto cómo la IA puede usarse para la predicción de la generación energética renovable, la optimización de redes eléctricas y la mejora de los sistemas de inspección y mantenimiento. Sin embargo, el potencial de la IA va más allá de las aplicaciones actuales y en este cuarto capítulo, se propondrán nuevas ideas sobre cómo aprovechar esta tecnología para impulsar las energías renovables.

La transición hacia fuentes de energía renovable es crucial para reducir las emisiones de carbono y combatir el cambio climático. Sin embargo, la naturaleza intermitente de las energías renovables, como la solar y la eólica, plantea desafíos significativos. Aquí es donde la IA puede marcar una diferencia. Mediante el análisis avanzado de datos y el aprendizaje automático, la IA puede mejorar la previsión de la generación de renovables, optimizar la gestión de la red y diseñar nuevas instalaciones de generación de energía limpia, entre otras funciones. Todas las propuestas expuestas en este capítulo buscarán no sólo mejorar la fiabilidad y eficiencia de las energías renovables, sino que también facilitarán su integración en las redes eléctricas a gran escala.

En resumen, este apartado presentará ideas innovadoras para maximizar el impacto positivo de la Inteligencia Artificial en el sector de las energías renovables, contribuyendo a un sistema energético más sostenible y eficiente.

4.1 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DEL MODELO DE RED ELÉCTRICA APOYADA POR IA EN ESPAÑA

En este apartado se estudiará cuán viable sería implementar las tecnologías basadas en Inteligencia Artificial que posee la red eléctrica de Estados Unidos, en España partiendo de las herramientas ya existentes en la red eléctrica española descritas en el capítulo anterior (PASTORA, LARS, etc.).

4.1.1 ESPECIFICACIÓN DEL DISEÑO

La propuesta consiste en la implementación en España de las Inteligencias Artificiales implementadas por Avangrid en la red eléctrica estadounidense, apoyándose en iniciativas ya activas como PASTORA o LARS. A continuación, se exponen algunos ejemplos de cómo se podrían aunar estas tecnologías:

- La IA Predictive Health Analytics, apoyada por drones similares Sparky o al Colibrí proporcionará un monitoreo más exhaustivo de la aparamenta de las subestaciones eléctricas españolas, reduciendo a mínimos las probabilidades de cualquier incidencia que pueda suponer un fallo en el suministro eléctrico.

Con un dron similar a Sparky (equipado con cámaras térmicas) se podrán prevenir averías haciendo uso de la Inteligencia Artificial del Proyecto PASTORA, relacionando las imágenes térmicas que el dron obtenga durante sus rondas de inspección a la subestación con variables eléctricas que proporcionen un mejor entendimiento del estado de salud de los equipos. Estas lecturas del dron sumadas a los datos que emplea Predictive Health Analytics para sus diagnósticos, permitirá una mejor gestión de los planes de recambio de los equipos. Además, estos recambios podrán realizarse mediante la ayuda de un operador virtual de la red (o en este caso de la subestación) como LARS para que pueda realizar las maniobras necesarias para poner en mantenimiento la línea en la que se ubique el equipo a sustituir.

- La combinación de la tecnología LARS y la Health AI de Avangrid son otro ejemplo de cómo refinar aún más la gestión de la red y mejorar la calidad del suministro. Una base de datos que contenga millones de fotografías de los activos a nivel urbano (e incluso también interurbano) de las distintas energéticas similar a la Health AI permitirá detectar ubicaciones de riesgo dentro de la red, que podrán ser más fácilmente inspeccionadas por el personal técnico gracias a la localización e identificación precisa de la avería que ofrece LARS.
- La integración de la Inteligencia Artificial GeoMesh podría suponer el complemento perfecto para el sistema MeteoFlow, pues así no sólo tendría en consideración los recursos naturales necesarios para la generación de energía renovable, sino también el rendimiento y estado de salud de los equipos necesarios para esta generación eléctrica. Esto no es baladí, pues un mal funcionamiento no previsto de los aerogeneradores puede acabar con la ventaja estratégica que ofrecen las predicciones de MeteoFlow y dificultar la gestión de los servicios de O&M.

Estos son tan sólo algunos beneficios que pueden suponer la integración de IAs similares a las descritas en el apartado 3.1. Todo esto con la esperanza de contribuir a una mejor gestión de la red eléctrica y de los activos destinados a la generación de energías renovables, mediante la optimización y automatización de los procesos de mantenimiento e inspección de cada uno de los agentes del parque eléctrico.

4.1.2 VIABILIDAD

Es cierto que en la Ilustración 9 España no aparecía siquiera en el ranking de países que más invierte en IA, pero esa estadística es de 2013 a 2022, y lo cierto es que en los últimos años esa tendencia ha cambiado. De hecho, como se puede apreciar en la Ilustración 18, España se encuentra a la cabeza de los países miembros de la UE en términos de inversión en Inteligencia Artificial, por lo que no sería descabellado pensar que al menos una parte de los

1.200 millones de euros que España está dispuesta a invertir en Inteligencia Artificial fuera destinada a su aplicación al sector de las energías renovables.

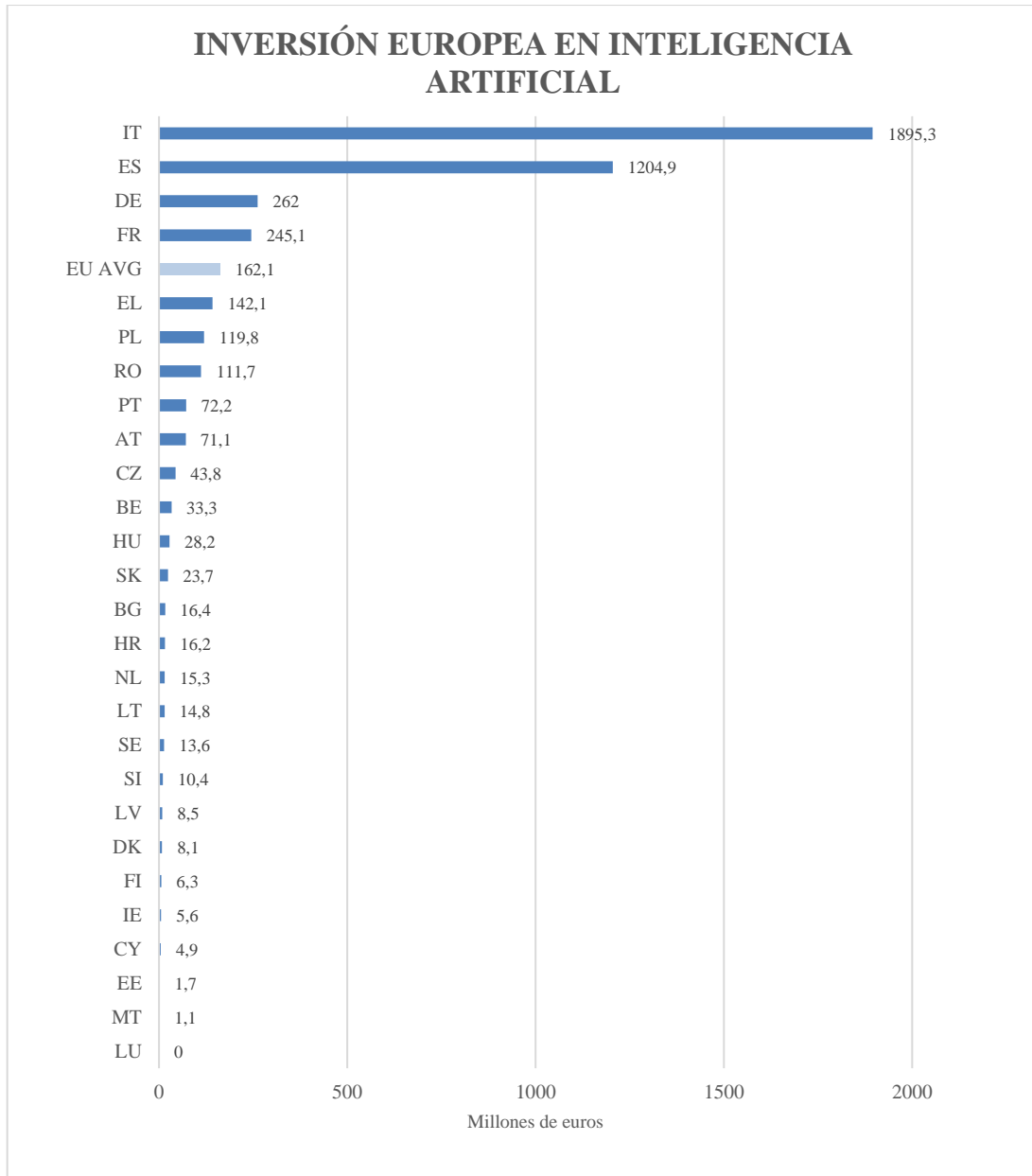


Ilustración 18. Inversión de los distintos países de la Unión Europea en el campo de la Inteligencia Artificial. Fuente: Comisión Europea [32].

Además de la inversión que pueda realizar España como país, no hay que olvidar al sector privado. Por ejemplo, Iberdrola no tendría que dedicar tantos recursos para la creación de nuevas Inteligencias Artificiales, sino tan solo a la adaptación de las IAs de su filial americana para España. Todo esto sin contar que la energética española, gracias a su PPA de East Anglia Three, ahora cuenta con herramientas como Amazon Sagemaker o Amazon Bedrock con las que seguir apostando por la Inteligencia Artificial como una agente más de la red eléctrica.

Un motivo más por el que la implementación de estas tecnologías en España sería factible es que la red eléctrica española es mucho más pequeña que la americana en prácticamente todos los aspectos. En 2023 la capacidad de generación española llegó a los 266.807 GWh, mientras que en Estados Unidos se alcanzó la cifra de 4.178 TWh (aunque cabe destacar, que todo esto con un porcentaje de generación verde considerablemente menor que España, véanse las Ilustración 1 Ilustración 19 y Ilustración 20).

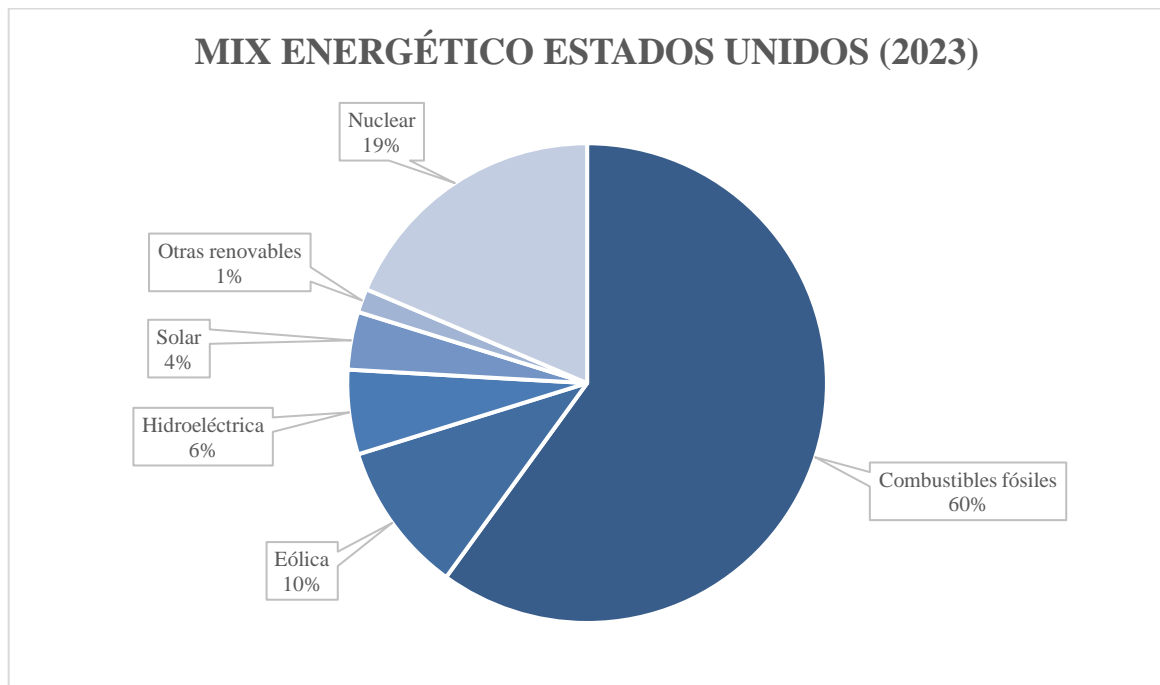


Ilustración 19. Mix energético de Estados Unidos en el año 2023. Fuente: EIA [33].

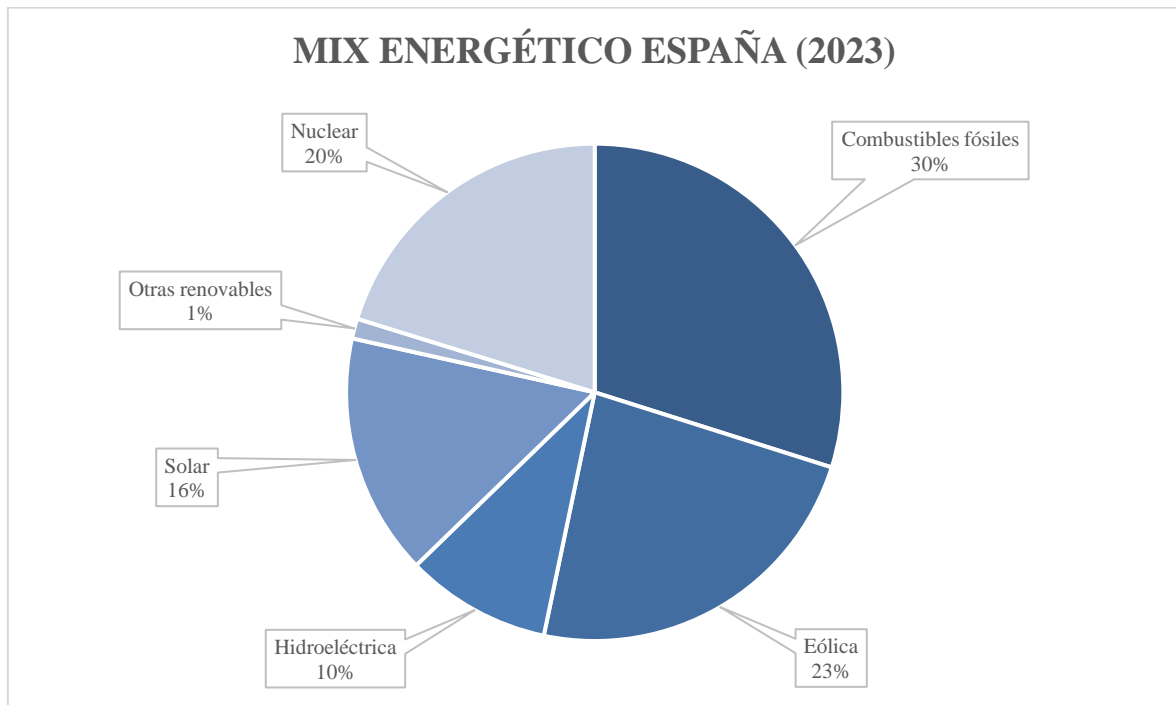


Ilustración 20. Mix energético de España en el año 2023. Fuente: REE [34].

Esta diferencia de escala no solo se da a niveles energéticos sino también a nivel de las propias redes de alta tensión. La red norteamericana cuenta con más de 250.000 km de líneas de alta tensión [35], mientras que la extensión de las redes de transporte España no llega a los 50.000 km [36]. Como ya se ha mencionado, esto lejos de ser un inconveniente, es una ventaja ya que una red de menor tamaño requiere una menor gestión. Además, en caso de que se automatizase esta gestión de la red, la infraestructura necesaria para gestionar tal cantidad de información sería considerablemente menor que la que se precisaría en EE.UU. (aunque más adelante se mencionarán otros motivos por los que la infraestructura puede llegar a ser un factor limitante).

Otra razón por la cual España sería una buena candidata para la implementación de estas Inteligencias Artificiales es que posee un clima mucho menos adverso que los Estados Unidos de América. Tan solo el pasado año, Norteamérica se enfrentó a un total de 28 desastres climáticos entre los que se incluyen tornados, ciclones e inundaciones, causando a

su paso daños por valor de 92.900 millones de dólares [37]. Los estragos que estos fenómenos pueden afectar al suministro energético y dañar los distintos componentes de la red, tal y como muestra la Ilustración 21.



Ilustración 21. Fotografía de torres eléctricas derruidas a causa de las fuertes tormentas en Texas, EE.UU. en mayo de 2024. Fuente: Yakima Herald [38]

En España, afortunadamente, no se observan este tipo de fenómenos meteorológicos tan violentos, de modo que se podría asegurar que tanto el equipo existente como la nueva aparatamenta del Internet de las Cosas que fuese necesaria para la implementación de las IAs en la red eléctrica española no sufrirían daños graves y mucho menos se vería comprometido el suministro.

Sin embargo, uno de los mayores obstáculos para llevar a cabo esta iniciativa es la infraestructura necesaria para el procesamiento de toda la información con la que se va a trabajar. El consumo energético de los centros de datos es tal que se plantea la duda de si una gestión un poco más eficiente compensa aumentar a niveles extremos la demanda

energética. Este aspecto se explorará más en detalle en el siguiente apartado, pues también será un factor limitante para la siguiente propuesta.

4.2 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DEL APRENDIZAJE DE LA IAG MEDIANTE GEMELOS DIGITALES DE INSTALACIONES DE GENERACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

Esta segunda propuesta se basa en la idea de que todos los gemelos digitales de la red eléctrica puedan tener otro propósito: servir de aprendizaje para Inteligencias Artificiales Generativas, de tal forma que en un futuro éstas sean capaz de diseñar nuevas plantas de generación, así como otros componentes de la red. Además de esto, la Inteligencia Artificial podrá realizar simulaciones del rendimiento y efectividad de la instalación a construir, permitiendo así determinar si su construcción y puesta en marcha es viable o no.

4.2.1 ESPECIFICACIÓN DEL DISEÑO

El objetivo de este proyecto es aprovechar los gemelos digitales ya existentes (así como aquellos que se desarrollen en el futuro) de los distintos componentes de la red eléctrica para entrenar a una Inteligencia Artificial que será capaz de generar diseños de nuevas plantas de generación, subestaciones y demás instalaciones eléctricas.

Como se observa en la Ilustración 22, el siguiente paso es que la Inteligencia Artificial realice simulaciones sobre el modelo que ha creado. Mediante técnicas de supercomputación, análisis de *Big Data* y *Machine Learning*, se pueden obtener predicciones sobre la eficiencia de la instalación. Por ejemplo, para un modelo de un parque eólico se pueden emplear sistemas similares al Proyecto SEDAR (Simulación Eólica de Alta Resolución) de Iberdrola [39], con los que poder estimar de antemano la capacidad de producción del conjunto de aerogeneradores durante toda su vida útil. Estas predicciones permitirán minimizar los riesgos a la hora de invertir en la construcción de nuevas plantas de generación eléctrica, haciendo más viable la apuesta por las tecnologías de generación de energía verde y

contribuyendo así a la descarbonización y a la reducción de emisiones de carbono a la atmósfera.

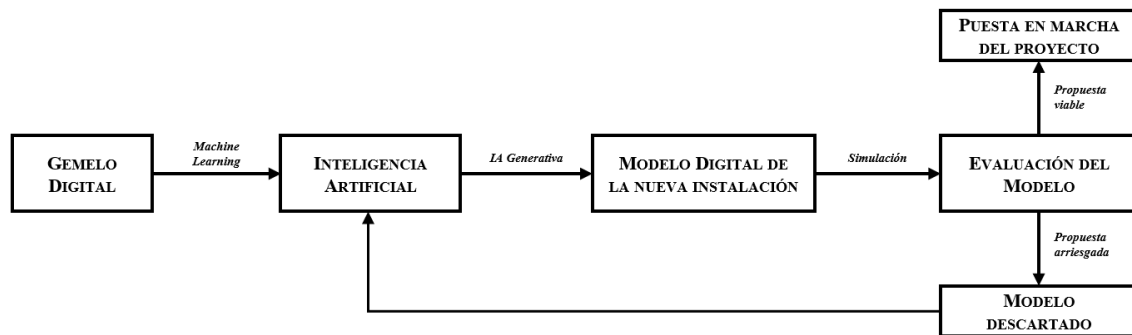


Ilustración 22. Diagrama de la arquitectura del sistema. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 VIABILIDAD

Atendiendo a criterios económicos, la viabilidad de esta iniciativa estará ligada a los beneficios que puedan aportar las instalaciones diseñadas por la Inteligencia Artificial. Nótese que no se han mencionado las posibles pérdidas que pudieran ocasionar estas nuevas construcciones, pues con los modelos predictivos de alta precisión que ofrece este proyecto no hay riesgos, sino certezas. En caso de que el coste de una nueva planta no pudiera amortizarse en un plazo asumible, simplemente se descartaría esta nueva construcción y la IA se encargaría de buscar un mejor emplazamiento para esta planta o realizaría las correcciones necesarias sobre el diseño original.

En el apartado 3.2 se ha hablado de gemelos digitales en plantas de generación de energía renovable, gemelos digitales para instalaciones más críticas como pueden ser las centrales nucleares y también de nuevos métodos con los que obtener la información necesaria para el desarrollo de estos gemelos, como puede ser el dron Colibrí para los parques eólicos. A esto se le suma la tendencia que sigue la información de aumentar constantemente las “3 V’s del Big Data”: el volumen de datos cada vez es mayor, se generan a una mayor velocidad y día a día el formato de estos continúa variando. Pero todo esto, además de ser un reto para

la gestión de toda esta información, también es una oportunidad: los gemelos digitales cada vez aportarán más información sobre el sistema al que imitan y en consecuencia más será capaz de aprender la Inteligencia Artificial. A medida que la IA vaya recibiendo más inputs de los gemelos digitales, más sofisticada se volverá y será capaz de generar modelos y diseños mucho más precisos y fiables.

Sin embargo, ha de tenerse en consideración las limitaciones que presenta la infraestructura actual. Para la gestión de semejante cantidad de información, es imperativa la construcción de un gran número de centros de datos, pero esto plantea un gran dilema: la descomunal demanda energética de estos centros.

Un centro de datos es una instalación donde se albergan servidores, grandes ordenadores, sistemas de almacenamiento de información y demás equipos de computación dedicados al procesamiento, gestión, almacenamiento y diseminación de datos. Actualmente, estas instalaciones consumen en torno a 200 TWh por año a nivel global y se estima que para 2030 puedan suponer en torno al 10% de la demanda mundial energética. Por este motivo, las empresas que trabajan con un gran flujo de datos buscan formas de garantizar el suministro de sus centros de datos, de ahí el PPA entre Amazon e Iberdrola que se mencionó en el apartado 3.1. Microsoft va incluso más allá y apuesta por los SMRs⁶ para tener un suministro energético fiable y sin emisiones de gases de efecto invernadero [40].

Con todo lo mencionado, se planea el complicado dilema de si estas nuevas propuestas para la digitalización de la red eléctrica y la implementación de la Inteligencia Artificial en el sector suponen un avance en el campo de la eficiencia energética. ¿Merece acaso la pena? Está claro que el avance del *Big Data* y de la Inteligencia Artificial es imparable y consecuentemente también será imparable el crecimiento de los centros de datos y su alta demanda energética, pero quizá no es necesario que el sector eléctrico se digitalice a este nivel pues el suministro energético es bastante fiable. De hecho, en lo que va de año en

⁶ Por sus siglas en inglés, Small Modular Reactors.

España solo se han perdido 0,73 MWh de suministro, con una disponibilidad mensual de la red de transporte nacional que supera el 97% [36], así que el margen de mejora es diminuto en comparación con la ampliación de la red de generación y de la infraestructura de datos que se necesitaría para implantar estas medidas.

En resumen, el sistema eléctrico español es lo suficientemente fiable como para prescindir de las posibles innovaciones que la Inteligencia Artificial pueda ofrecer al sector. En su lugar esta novedosa tecnología podría ser bienvenida en otros sectores que puedan beneficiarse en mayor medida de la IA, como por ejemplo la medicina o las finanzas.

4.3 ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LA IAG PARA EL DISEÑO DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS EN DOMICILIOS PARTICULARES

Dado que la famosa Inteligencia Artificial Chat GPT de Open AI, es cada día una herramienta más común en multitud de sectores, se pondrá a prueba su utilidad a la hora de diseñar un sistema de placas solares destinadas al autoconsumo de un domicilio particular. No es el objetivo de este capítulo realizar un diseño exhaustivo y detallista de la instalación, pues el tema principal de este proyecto es la Inteligencia Artificial. En su lugar se analizará hasta dónde es capaz de llegar la IA Generativa, determinar si es correcta su propuesta de diseño y explorar otras posibles aplicaciones de esta tecnología en este sector.

4.3.1 EXPECTATIVAS DEL EXPERIMENTO

En este apartado se expondrán los pasos que debería seguir la Inteligencia Artificial Generativa para llevar a cabo el proyecto correctamente. No aporta ningún valor al experimento preguntar a la IA cuál es el proceso, pues como se ha explicado ya Chat GPT se entrena con información previa a octubre de 2023, fecha en la que ya estaba bastante extendido el uso de placas fotovoltaicas en domicilios particulares. Por este motivo Chat GPT no aporta nada que no pudiera hacer ya Google, pues es realizar una búsqueda en su base de datos, del mismo modo que puede hacer cualquiera buscando en Internet.

Mismamente, la empresa de energía solar fotovoltaica TuVatio [41] ofrece una guía sobre el proceso de instalación de placas fotovoltaicas en un domicilio particular. Los pasos a seguir son los siguientes:

- **Evaluación del sitio:** Se determina la viabilidad de la instalación analizando varios factores clave como el consumo energético de la vivienda (estimación consumo mensual promedio y de posibles variaciones estacionales), la ubicación (detectar posibles sombras y analizar las horas de sol de la zona) y las características del tejado (orientación y espacio disponible para la instalación de las placas).
- **Diseño del sistema:** Se debe calcular y establecer el número de paneles que serán necesarios y de qué tipo (de policristalino, de monocristalino, etcétera), los inversores a instalar (el tipo y la capacidad de estos), la estructura del montaje y otros componentes como el cableado de conexión o las protecciones eléctricas. Todas estas decisiones se toman teniendo en cuenta las necesidades energéticas de la vivienda, la regulación local que aplique y el espacio del que se disponga.
- **Obtención de permisos y trámites:** Antes de comenzar la instalación se deben conseguir los permisos y realizar los trámites que sean necesarios, para asegurar que la instalación cumple con la legislación vigente. Estas gestiones pueden ir desde la solicitud de la licencia de obra al ayuntamiento, hasta la aprobación de la compañía eléctrica local.
- **Instalación de los paneles solares:** Se asegura la estabilidad de los paneles y que la estructura esté bien fijada; además se realizan las conexiones eléctricas de los paneles entre sí y al inversor. Por último, se conecta la salida de corriente alterna del inversor al cuadro eléctrico del hogar.

- **Conexión a la red eléctrica:** Una vez conectada, la energía generada con los paneles podrá aprovecharse en el hogar y en caso de que la generación supere al consumo, este surplus energético se inyecta a la red eléctrica.
- **Ensayos y puesta en marcha:** Se realizan pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, que los paneles generen energía eficientemente y que esta energía se distribuya correctamente por el domicilio.
- **Mantenimiento y monitoreo:** Ya instaladas las placas, se deben realizar labores de mantenimiento de forma periódica para garantizar el buen funcionamiento de la instalación, comprobando la limpieza de los paneles, la conexión de los cables y la ausencia de corrosión. Además, se suele recurrir a dispositivos o aplicaciones móviles que permitan realizar un seguimiento de la producción de energía y así poder detectar cualquier tipo de fallo.

Resulta obvio apuntar que no se puede esperar que una Inteligencia Artificial realice algunas de las tareas descritas, pero en el apartado 4.3.3 se estudiarán posibles alternativas y soluciones.

4.3.2 DATOS DE PARTIDA

En este apartado se definirán los datos de partida que la Inteligencia Artificial estime necesaria para realizar el diseño del sistema. Con el objetivo de extraer el máximo potencial de esta herramienta, se le preguntará a la propia IA cuáles son los *inputs* que requiere para poder llevar a cabo el diseño, los cuales deberán ser muy similares a los mencionados en párrafo de sobre el estudio previo, en el apartado 4.3.1 de esta memoria.

Usuario:

¿Podrías diseñar una instalación de placas fotovoltaicas en un domicilio particular? ¿Qué inputs necesitarías?

Chat GPT 4o:

Claro, puedo ayudarte a diseñar una instalación de placas fotovoltaicas para un domicilio particular. Aquí están los principales inputs que necesitaría para comenzar:

Información Básica del Domicilio

1. **Ubicación geográfica:** Ciudad, país, y coordenadas si es posible.
2. **Orientación y ángulo del techo:** Norte, sur, este, oeste y el ángulo de inclinación del techo.
3. **Superficie disponible:** Metros cuadrados disponibles para la instalación de las placas.
4. **Tipo de techo:** Material del techo y si es plano o inclinado.
5. **Sombra:** Información sobre la sombra proyectada por árboles, edificios, o cualquier otro obstáculo.

Consumo Energético

1. **Consumo eléctrico mensual o anual:** Facturas de electricidad recientes para determinar el consumo promedio.
2. **Patrón de consumo:** Si hay picos específicos en el consumo diario o mensual.

Detalles Técnicos

1. **Tipo de conexión eléctrica:** Monofásica o trifásica.
2. **Capacidad del inversor:** Si ya existe algún equipo instalado o si es necesario instalar uno nuevo.

Presupuesto y Preferencias

1. **Presupuesto estimado:** Cuánto se está dispuesto a invertir en la instalación.
2. **Preferencias de marca:** Si hay alguna preferencia por marcas específicas de paneles o inversores.
3. **Objetivos específicos:** Por ejemplo, si se busca una reducción completa de la factura eléctrica, una independencia energética parcial, etc.

Información Adicional

1. **Regulaciones locales:** Normativas y permisos necesarios para la instalación de paneles solares en la localidad.
2. **Posibles subvenciones o incentivos:** Información sobre programas de apoyo financiero o incentivos fiscales para la instalación de energía solar.

Si puedes proporcionar estos detalles, estaré encantado de ayudarte a diseñar una solución específica para tu domicilio.

Se procederá entonces a establecer las características del domicilio de estudio, dividiendo estos inputs en las mismas categorías que ha definido la Inteligencia Artificial.

En primer lugar, ha de definirse la información básica del domicilio. Se trata de un piso, en la zona noreste de la ciudad de Madrid, el tejado es una azotea plana a unos 25 metros de altura, sin ningún elemento ni otras edificaciones cercanas que puedan darle sombra y con unos 25 metros cuadrados de azotea disponibles por vecino para la instalación de placas.

En cuanto a los datos de consumo energético, en la Tabla 1 se puede observar un desglose por meses del consumo eléctrico de la vivienda y además el consumo semanal se reparte de forma aproximada en un 60% en las horas valle (de 00h a 08h de lunes a viernes y durante todo el día los sábados y domingos), 15% en horario llano (de lunes a viernes, de 08h a 10h, de 14h a 18h y de 22h a 00h) y el 25% restante en las horas punta (de lunes a viernes, de 10h a 14h y de 18h a 22h).

<i>Mes</i>	<i>Energía consumida (kWh)</i>
Enero	246
Febrero	256
Marzo	262
Abril	286
Mayo	232
Junio	204
Julio	104
Agosto	93
Septiembre	243
Octubre	255
Noviembre	276
Diciembre	305

Tabla 1. Datos de consumo del domicilio de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Representando gráficamente los datos de la Tabla 1 (véase Ilustración 23), se puede observar que el mayor consumo se produce en otoño e invierno (debido a la calefacción), un ligero descenso a medida que suben las temperaturas en primavera y verano, seguido de un

descenso brusco los meses de julio y agosto que se asocia al desuso de esta vivienda en la época vacacional.

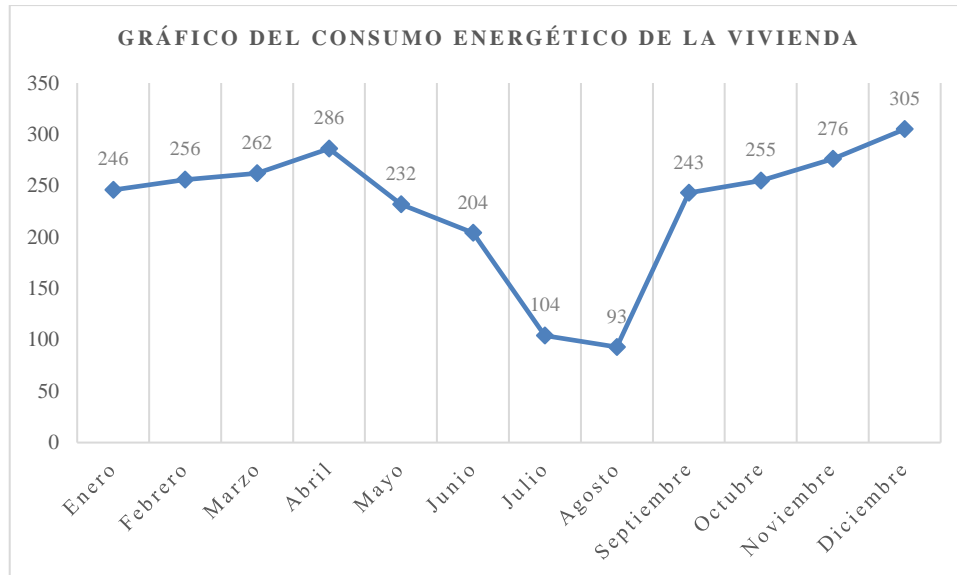


Ilustración 23. Gráfico del consumo energético de la vivienda de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El sistema eléctrico del hogar es monofásico (230 Vca) y sin ningún inversor instalado. Se estima un presupuesto de entre 5000 y 7500 €, no se tiene ninguna preferencia de marca y el objetivo es conseguir una reducción en la factura de la luz.

En lo referente a la normativa vigente, el Real Decreto 244/2019 del 5 de abril [42] establece que los permisos necesarios para la instalación de placas fotovoltaicas en domicilios particulares para autoconsumo son la Declaración Responsable Urbanística, los Permisos de Acceso y Conexión (a excepción de las instalaciones de autoconsumo sin excedentes están no requieren este permiso) y la Licencia Urbanística, entre otros. Además, la instalación deberá cumplir con la normativa técnica y de seguridad que aplique, así como contar con dispositivos de medida de la generación y del consumo (y en caso de una instalación sin excedentes serán necesarios equipos que eviten el vertido de energía a la red).

En la Comunidad de Madrid existen subvenciones que pueden llegar a cubrir la mitad de los costes de instalación, pero esta información no se le facilitará a la IA, ya que, al ser un

modelo de aprendizaje previamente entrenado, estas ayudas podrían cambiar y entonces contradecir aquella información con la que se entrenó a Chat GPT 4o en octubre de 2023; lo que puede traer como consecuencia unas estimaciones imprecisas o directamente información errónea. Tampoco se le aportará información sobre los beneficios fiscales que puede traer consigo la instalación de placas para autoconsumo, como las bonificaciones del IBI (Impuesto sobre Bienes Inmuebles) y el ICIO (Impuesto sobre Construcciones, Instalaciones y Obras) o la deducción en el IRPF del importe total de la obra.

4.3.3 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

En este apartado se expondrá y analizará el diseño que ofrezca la Inteligencia Artificial Generativa Chat GPT 4o para la instalación de placas solares en un domicilio con las características descritas en los Datos de partida.

Chat GPT 4o:

Con la información proporcionada, podemos proceder con el diseño de una instalación de placas fotovoltaicas para tu domicilio. Aquí están los pasos detallados para el diseño y la propuesta:

Análisis del Consumo Energético

1. Consumo mensual:

- Enero: 246 kWh
- Febrero: 256 kWh
- Marzo: 262 kWh
- Abril: 286 kWh
- Mayo: 232 kWh
- Junio: 204 kWh
- Julio: 104 kWh
- Agosto: 93 kWh
- Septiembre: 243 kWh
- Octubre: 255 kWh
- Noviembre: 276 kWh
- Diciembre: 305 kWh

2. Consumo anual total: 2758 kWh

Distribución del Consumo por Horas

- **Horas valle:** 60% del consumo.
- **Horas llano:** 15% del consumo.
- **Horas punta:** 25% del consumo.

Sistema Eléctrico del Hogar

- **Tipo de conexión:** Monofásico (230 VCA).
- **Inversor:** No instalado.

Presupuesto Estimado

- **Rango:** 5000 - 7500 €

Diseño del Sistema Fotovoltaico

1. Cálculo de la Potencia Necesaria

Para reducir la factura de la luz de manera significativa, idealmente se buscaría cubrir el consumo anual con la generación fotovoltaica. Para esto, utilizaremos la irradiación solar promedio en la ubicación del domicilio (especifica la ciudad para mayor precisión). Asumamos una irradiación promedio anual de 4 kWh/m²/día.

Energía anual necesaria = 2758 kWh

Energía diaria necesaria = {2758 kWh} / {365 días} ≈ 7.56 kWh/día

Potencia del sistema = {7.56 kWh/día} / {4 kWh/m²/día} ≈ 1.89 kW

2. Selección de Paneles Solares

Suponiendo paneles solares con una potencia de 300 W cada uno:

Número de paneles = {1.89 kW} / {0.3 kW/panel} ≈ 6.3 paneles

Redondeando, necesitaríamos 7 paneles solares de 300 W cada uno.

3. Selección del Inversor

Para un sistema de 1.89 kW, un inversor de 2 kW sería adecuado. Ejemplos de inversores monofásicos disponibles en el mercado pueden incluir marcas como Fronius, SMA o Huawei, todos de buena calidad.

4. Cálculo de Costes

- **Paneles solares:** 7 paneles * 300 € = 2100 €
- **Inversor:** Aprox. 800 €
- **Estructura de montaje, cables, protección, y otros componentes:** Aprox. 1200 €
- **Mano de obra e instalación:** Aprox. 1200 €

- **Total estimado:** 5300 €

Esto se ajusta dentro del presupuesto estimado.

Propuesta Detallada

1. Componentes Principales

- **Paneles solares:** 7 unidades de 300 W
- **Inversor:** 1 unidad de 2 kW (monofásico)
- **Estructura de montaje y otros accesorios:** Cables, protecciones, etc.

2. Instalación y Conexión

- **Tipo de instalación:** Sobre el techo, orientación óptima hacia el sur con el ángulo adecuado.

- **Conexión eléctrica:** Directamente a la red interna del hogar con protección para evitar vertidos en caso de ser sin excedentes.

3. Trámites y Permisos

- **Declaración Responsable Urbanística:** Presentación necesaria.
- **Licencia Urbanística:** Solicitud según la normativa local.
- **Permisos de Acceso y Conexión:** No requeridos si es sin excedentes.

Proceso de Implementación

1. **Evaluación del sitio:** Confirmar condiciones del techo y sombra.
2. **Adquisición de componentes:** Comprar los paneles, inversor y demás componentes.
3. **Instalación:** Realizar la instalación física y conexión del sistema.
4. **Puesta en marcha:** Verificar funcionamiento y realizar ajustes necesarios.
5. **Registro y monitoreo:** Asegurar que el sistema cumpla con la normativa y registrar para posibles incentivos.

Si necesitas detalles adicionales o ajustes específicos, estaré encantado de ayudarte.



Ilustración 24. Ilustración generada por Inteligencia Artificial (DALL-E) de la instalación diseñada. Fuente: Open AI [43].

La primera impresión que causa esta propuesta de diseño generada por la IA es que se trata de un estudio poco exhaustivo, muy generalista e incluso simplista. Para comprobar si estos

juicios son fundados, se procederá a contrastar cada uno de los puntos clave del diseño de Chat GPT.

4.3.3.1 Cálculo de la potencia necesaria

Del texto generado por Chat GPT llama la atención que asume un único nivel de irradiación para todo el año, considerando este constante y de 4 kWh/m²/día. Esto parece un cálculo no sólo simplificado al haber diferencias significativas en las horas e intensidad del sol en las distintas épocas del año, sino también incorrecto, pues tal como ilustra el mapa de la Ilustración 25, Madrid pertenece a la Zona IV. Esto quiere decir que tiene unos niveles de radiación medios que oscilan entre los 4,2 y 4,6 kWh/h/día, ambos valores superiores al que ha considerado la Inteligencia Artificial. No considerar esta irradiación extra puede implicar sobredimensionamiento de la instalación y por supuesto, el consecuente sobrecoste de instalar más placas de las necesarias.

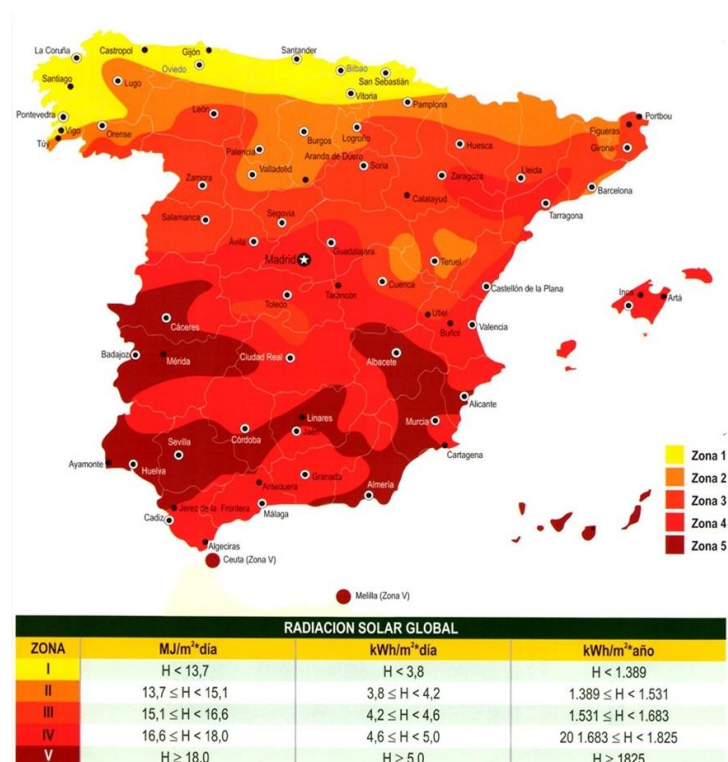


Ilustración 25. Mapa de zonas de radiación solar en España. Fuente: Plasol [44].

Aun así, dimensionar la instalación basándose en niveles medios de irradiación anuales puede resultar impreciso. Esto debido a que la relación entre los niveles de irradiación solar y el consumo energético de la vivienda no tiene por qué mantenerse a lo largo de todo el año. Por este motivo, se calculará la potencia necesaria para cada mes, consiguiendo así un dimensionamiento más preciso de la instalación. Ya se cuenta con el desglose del consumo energético por meses y para obtener los datos de irradiación mensuales en la zona se recurrirá al *software* PVGIS [45].

<i>Year</i>	<i>Month</i>	<i>H(h)_m</i>	<i>H(i_opt)_m</i>	<i>Hb(n)_m</i>
2020	Jan	65.34	115.14	115.34
2020	Feb	96.07	145.07	147.52
2020	Mar	123.84	153.93	133.73
2020	Apr	150.51	159.90	127.20
2020	May	212.38	206.72	216.44
2020	Jun	234.42	217.94	241.74
2020	Jul	243.77	231.70	266.42
2020	Aug	209.96	220.28	239.24
2020	Sep	156.09	186.33	175.54
2020	Oct	112.94	158.06	147.29
2020	Nov	66.10	104.60	92.38
2020	Dec	60.16	108.64	106.90

Tabla 2. Niveles de irradiación en la zona del domicilio de estudio. Fuente: PVGIS [45].

En la Tabla 2 se muestran los niveles de irradiación solar del año 2020 (PVGIS no ofrece esta información de años más recientes) en la zona donde se ubica la vivienda de estudio. La columna $H(h)$ se refiere a la irradiación en el plano horizontal en kWh/m²/mes, la columna $H(i_{opt})$ a la irradiación en el plano con un ángulo de inclinación óptimo (de este ángulo óptimo se hablará más en detalle en el apartado 4.3.3.2 más adelante en esta memoria) en las mismas unidades y la columna $Hb(n)$ a la irradiación mensual directa sobre el plano siempre normal a los rayos de sol (en kWh/m²/mes también). Se considerará la instalación con el

ángulo óptimo de inclinación, ya que es aquel que permite sacar mayor partido a la instalación sin el sobrecoste de un dispositivo que mueva las placas para estar siempre perpendiculares a los haces luz solar.

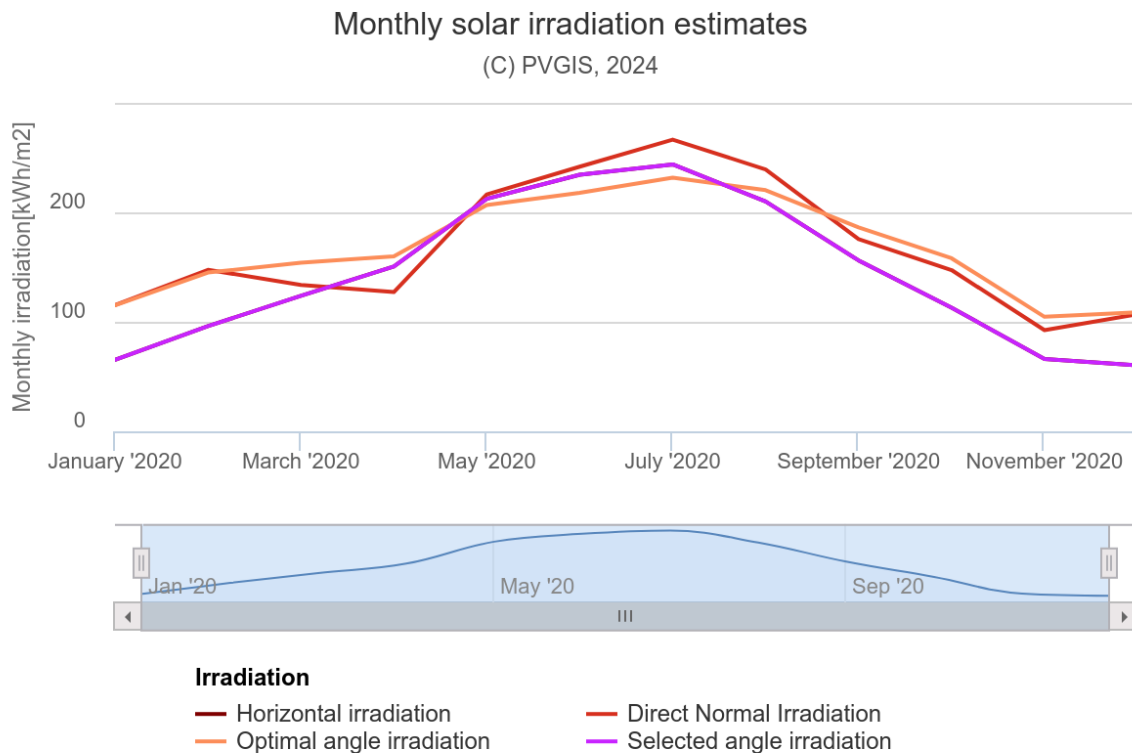


Ilustración 26. Niveles de irradiación solar en la zona. Fuente: PVGIS [45].

Como ya se había dicho la gráfica de los niveles de irradiación que se muestran en la Ilustración 26 no sigue el mismo comportamiento que la curva del nivel de consumo energético de la vivienda (véase la Ilustración 23). Queda demostrado entonces que, en efecto, el cálculo que había hecho la Inteligencia Artificial no era preciso.

Para un correcto dimensionamiento de la instalación se deberá calcular la máxima potencia que vaya a necesitar el domicilio en un año. Este número se obtiene de la ecuación que se muestra a continuación:

$$P = \frac{E_{consumida} [kWh]}{\eta \cdot \frac{I_{solar} [kWh/m^2]}{1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]}}$$

En esta ecuación “ η ” se refiere al rendimiento del sistema, que está sujeto a distintos tipos de pérdidas de energía que pueden darse en la instalación (por suciedad de las placas, por las pérdidas del inversor, el efecto Joule en el cableado, debidas a la temperatura...). Calcular este valor puede llegar a ser muy difícil ya que depende de múltiples factores, por lo que se asignará un valor bastante conservador del 80% de rendimiento de la instalación. El “1000 W/m²” que aparece en la ecuación se trata de un factor de conversión que se le aplica a la irradiación solar para así obtener lo que se conoce como *Horas de Sol Pico* (HSP). Dividiendo la energía consumida por las HSP, se obtiene el valor de la potencia necesaria para cubrir dicha demanda. Sabiendo esto y con los datos obtenidos de las Tabla 1 y Tabla 2, se obtienen los niveles de potencia de cada mes, véase la Tabla 3.

<i>Mes</i>	<i>Consumo energético mensual (kWh)</i>	<i>Irradiación solar mensual (kWh/m²)</i>	<i>Potencia (W)</i>
Jan	246,00	115,14	2670,66
Feb	256,00	145,07	2205,83
Mar	262,00	153,93	2127,59
Apr	286,00	159,90	2235,77
May	232,00	206,72	1402,86
Jun	204,00	217,94	1170,05
Jul	104,00	231,70	561,07
Aug	93,00	220,28	527,74
Sep	243,00	186,33	1630,17
Oct	255,00	158,06	2016,64
Nov	276,00	104,60	3298,28
Dec	305,00	108,64	3509,30

Tabla 3. Cálculo de la potencia a instalar. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, la instalación requiere más potencia instalada en diciembre. Esto tiene sentido porque en este mes hay escasas horas de sol (es decir, poca generación por parte de las placas) y el consumo se dispara por la calefacción. Para garantizar el autoconsumo durante todo el año, se dimensionará la instalación tomando como potencia a instalar el valor de 3,51 kW (muy superior a los 1,89 kW que había estimado Chat GPT 4o).

4.3.3.2 Selección e instalación del equipo

Aunque la Inteligencia Artificial haya elegido placas de 300 W, para una potencia a instalar de 3,51 kW serían necesarios unos 12 paneles solares. El margen de espacio está limitado, por lo que instalar tantas placas puede que no sea la opción óptima y más si se tiene en cuenta que hay que dejar espacio libre entre los paneles para que no se den sombra unos a otros (se recuerda que los paneles se instalarán con cierto grado de inclinación).

En su lugar se optará por la compra de paneles de mayor potencia (545 W), mayores dimensiones y precio más elevado, pero que bajará el precio total de la instalación y dejará más espacio libre para mantener la distancia necesaria entre placas.

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{3\,510 \text{ W}}{545 \text{ W/panel}} \approx 7 \text{ paneles}$$

Las dimensiones de la mayoría de placas fotovoltaicas de 545 W rondan los 2,6 m² de superficie con un espesor inferior a 5 cm (tómese como ejemplo la ficha técnica del modelo JAM72S30-545/MR de JA Solar, adjunta en los ANEXO I del presente documento), de modo que el espacio no sería un factor limitante para el proyecto, incluso con la separación que hay que dejar entre paneles.

Este modelo de panel solar tiene un precio unitario de 179 € [46], que se traduce en un coste total de las placas de 1253 €, un descuento notable en comparación con los 2100 € que había propuesto la Inteligencia Artificial.

Al estar el domicilio ubicado en Madrid, las placas deberán estar orientadas hacia el sur (por estar por encima del Ecuador). Ahora bien, ¿con qué grado de inclinación? ¿Cuál es ese “ángulo adecuado de las placas” del que hablaba la Inteligencia Artificial al comienzo del apartado 4.3.3? A continuación, se le pide a Chat GPT que elabore sobre este tema:

Usuario:

En el diseño hablas un "ángulo adecuado para las placas". Teniendo en cuenta que la vivienda está en la ciudad de Madrid ¿Cuál sería ese ángulo?

Chat GPT 4o:

Para optimizar la producción de energía solar, la inclinación de los paneles solares debe ajustarse según la latitud de la ubicación y las condiciones específicas de la región. En el caso de Madrid, que se encuentra aproximadamente a 40 grados de latitud norte, el ángulo de inclinación óptimo puede calcularse utilizando las siguientes pautas generales:

1. Ángulo de inclinación básico: Una buena regla general es que el ángulo de inclinación de los paneles solares debe ser igual a la latitud del lugar. Para Madrid, esto sería aproximadamente 40 grados.

2. Ajuste estacional:

- **Verano:** Para maximizar la captación de energía en verano, se recomienda restar 15 grados a la latitud. En este caso, el ángulo sería aproximadamente 25 grados.
- **Invierno:** Para maximizar la captación de energía en invierno, se recomienda sumar 15 grados a la latitud. En este caso, el ángulo sería aproximadamente 55 grados.

3. Ángulo fijo anual: Si no se desea ajustar el ángulo estacionalmente, un ángulo fijo alrededor de 35-40 grados sería una buena elección para maximizar la producción de energía a lo largo de todo el año.

Recomendación

Para una instalación fija en Madrid, un ángulo de inclinación de ****35-40 grados**** sería adecuado para optimizar la producción de energía solar durante todo el año.

Ajuste Estacional (Opcional)

Si deseas optimizar aún más la producción de energía dependiendo de la temporada, podrías ajustar los paneles a **25 grados en verano** y a **55 grados en invierno**.

Estos ajustes ayudan a mejorar la captación de energía según la posición del sol en diferentes épocas del año, aunque implican una intervención manual o un

sistema de ajuste automatizado que puede aumentar el costo inicial de la instalación.

Esta respuesta que ofrece la IA no anda del todo desencaminada y el razonamiento parece bastante lógico. De hecho, el *software* PVGIS había considerado que la inclinación óptima para la instalación es de 34°. Ha de tenerse en cuenta que este ángulo de inclinación hará que los paneles creen una sombra que por motivos de eficiencia (y lógica) no deberá alcanzar a ninguno de los otros paneles. Esto no será problema, pues la superficie que ocupan las placas es de unos 16,8 m², incluso menos pues esta inclinación también se traducirá en que su extensión en el plano horizontal se vea reducida. Con los 25 m² con los que se cuenta para la instalación completa el espacio necesario entre placas está garantizado.

En cuanto a la selección del inversor, es una práctica habitual en instalaciones de autoconsumo que la potencia instalada y la potencia del inversor sigan una relación de entre 1,15 y 1,25. Se considerará un valor intermedio de 1,2 así que la potencia nominal del inversor deberá ser aproximadamente:

$$\frac{3510 \text{ W}}{1,2} = 2925 \text{ W}$$

Se escogerá entonces el modelo SUN2000-3KTL-L1 de Huawei (ver ficha técnica en el ANEXO I), que cuenta con una potencia nominal de 3000 W (por encima de la calculada) y que admite una potencia fotovoltaica máxima de 4500 W.

Una vez más, la IA ha estimado un coste superior al real. Chat GPT proponía un inversor de 800 € mientras que el inversor escogido tiene un coste de unos 520 € [47], un precio que hace más atractiva la oferta de esta instalación.

A todo lo mencionado anteriormente, habría que sumarle otros puntos clave del diseño (sobre los cuales la IA no ha ofrecido ningún tipo de indicación), como son:

- **Protecciones eléctricas:** El sistema deberá contar con protecciones diferenciales para evitar contactos indirectos, así como protecciones contra cortocircuitos, sobretensiones y sobreintensidades. La protección contra el rayo no es alcance de este proyecto, pues el edificio ya cuenta con su propio sistema de protección contra descargas atmosféricas.
- **Cableado:** Las secciones y el aislamiento de los cables deberá elegirse atendiendo a los criterios expuestos el REBT⁷ y sus ITC⁸.
- **Puesta a tierra:** Se realizará la conexión a la red de tierras del edificio y se seleccionarán los materiales necesarios para esta tarea según los criterios expuestos en el REBT y sus ITC.

4.3.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el apartado 4.3.1 se han descrito los pasos del proceso, entre los que destaca el Diseño del Sistema. Cuando se le ha encargado esta tarea a la Inteligencia Artificial de Open AI se ha obtenido un sistema impreciso e infradimensionado, con casi 2 kW menos de los necesarios para garantizar el autoconsumo durante todo el año. Además, ha ofrecido un presupuesto inflado, que puede excusarse con que al ser una IA previamente entrenada y no puede acceder en tiempo real a Internet para ofrecer precios actualizados de los materiales a emplear en esta instalación. También se han echado en falta otros elementos críticos en la fase de diseño como son las protecciones eléctricas, el sistema de cableado o la puesta a tierra de la instalación.

Tampoco se considera que este diseño sea del todo inútil, pues puede servir como un punto de partida para el proyecto sobre el que un profesional del sector puede corregir los errores que haya podido cometer la IA y completar aquellos puntos del diseño donde Chat GPT se haya quedado corto. Esto no es sino otro ejemplo de que el uso de la Inteligencia Artificial

⁷ Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión.

⁸ Instrucciones Técnicas Complementarias.

puede ser beneficioso siempre y cuando no se deposite una fe ciega en ella y se miren siempre sus aportaciones con ojos críticos.

En cuanto al resto de los pasos descritos en el apartado 4.3.1, todavía resulta distópico un mundo en el que la IA sea capaz de realizar tareas como la evaluación del sitio, la obtención de los permisos requeridos o la instalación y puesta en marcha. Sin embargo, no es tan descabellada la idea de que una Inteligencia Artificial realice tareas de monitoreo y mantenimiento predictivo. Como ya se ha mencionado en el Capítulo 2. y en el Capítulo 3. el uso del *Internet of Things* está ya relativamente extendido para este tipo de tareas, y su implementación en el sector de las instalaciones solares para autoconsumo podría traducirse en un ahorro para la empresa, pues no precisería de tanto personal para realizar las revisiones de las instalaciones en persona, todas las variables que afecten a la generación fotovoltaica podrían controlarse en remoto y sólo sería necesario que los trabajadores se personasen en las casas de los clientes en caso de que fuera necesario algún tipo de reparación.

En conclusión, el sector de las instalaciones fotovoltaicas para autoconsumo es uno más de los que podrían beneficiarse del uso de la Inteligencia Artificial. Por el momento, no se trata de nada más que una herramienta capaz de esbozar un primer boceto de un sistema de paneles solares sobre el que deba corregir y matizar un profesional; pero con más tiempo e inversión en esta tecnología es probable que hasta se puedan desarrollar modelos de IAG capaces de diseñar de forma precisa este tipo de sistemas y monitorizar su rendimiento.

Capítulo 5. ALINEACIÓN CON LOS ODS

En este apartado se explicará cómo las propuestas discutidas en esta memoria contribuyen al cumplimiento de algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) impulsados por las Naciones Unidas [48].

OBJETIVO N° 7: ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE



Tanto la implementación de sistemas de Inteligencia Artificial para tener un mejor seguimiento del estado de salud de los activos de generación de energías renovables como la capacidad de una IAG para diseñar instalaciones de generación de energía verde y predecir si serán rentables, son algunos de los caminos que la industria energética podría seguir para aumentar la participación de las energías renovables en el mix energético gracias a la IA. Este mayor protagonismo de las energías renovables en el mix energético se traduciría a su vez en una reducción del precio de la energía, haciéndola así más asequible.

OBJETIVO N° 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES



Si el objetivo es reducir los niveles de consumo, uno de los primeros pasos a dar es sustituir los sistemas de suministro energético por unos más sostenibles y mejor gestionados gracias a las IAs. Además, del desarrollo de sistemas de Inteligencia Artificial que ayuden al diseño de instalaciones de autoconsumo o a la estimación de la viabilidad de nuevas plantas de generación contribuyen a una generación de energía mucho más responsable y considerada con el medio ambiente. Sin embargo, todas estas medidas han de tener presente que una mayor inversión en *Big Data* e Inteligencia Artificial va acompañada de un gran despliegue de medios y de un aumento descontrolado de la demanda energética, lo que podría llegar a ser contraproducente en términos de consumo responsable.

OBJETIVO N° 13: ACCIÓN POR EL CLIMA



De nuevo, todas las iniciativas propuestas en este proyecto apuestan por una mejor gestión de los activos de generación verde y una mayor eficiencia de toda la red eléctrica, resultando esto en una mayor eficiencia del sistema eléctrico y en una menor dependencia de las energías no renovables, promoviendo a su vez una reducción drástica de las emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero causadas por estas tecnologías de generación de energía.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se ha comentado el estado de la Inteligencia Artificial y otras tecnologías como el *Big Data* en el sector eléctrico, y se han propuesto iniciativas que promueven una mejor gestión de la energía, tanto a nivel de la red eléctrica completa como a escala de pequeños generadores para autoconsumo; de los que se han podido extraer conclusiones varias.

En primer lugar, muchas son las pruebas de que la Inteligencia Artificial es un aliado valioso para la industria eléctrica, permitiendo estimar niveles de generación, optimizando las labores de inspección de la infraestructura energética y refinando la gestión de la red. Pese a ello, hay que ser consciente del reto que la implementación de esta tecnología a gran escala puede tener sobre la red española, la cual no está capacitada actualmente para abastecer a todos los centros de datos requeridos para el funcionamiento de estas herramientas. Siguiendo la tendencia de crecimiento que seguirán los datos (mostrada en la Ilustración 1), el consumo energético de estos centros no hará más que aumentar de igual manera en los años venideros, llegando a representar una parte no despreciable de la demanda a nivel mundial. Es por este motivo que se considera que una red eléctrica tan fiable como es la española no tiene necesidad de contribuir a este incremento excesivo del gasto energético, reservando esos recursos a otros sectores que puedan verse más necesitados de las innovaciones que pueda ofrecer la IA.

Por otro lado, se ha demostrado en el Capítulo 4.3 que en ocasiones se sobrevaloran las capacidades de la Inteligencia Artificial Generativa Chat GPT. Tampoco es de extrañar viendo la trayectoria del producto estrella de Open AI y no sería de extrañar que en un futuro pueda llegar a estar a la altura de los elogios que recibe. Sin embargo, a la hora de diseñar sistemas de placas fotovoltaicas para autoconsumo todavía tiene mucho por aprender, pues en el momento en el que se redacta la presente memoria Chat GPT ofrece un diseño muy

simplificado, en algunos aspectos incluso erróneo y con unos sobrecostes considerables. Esto pone de manifiesto que la Inteligencia Artificial no viene para acabar los trabajos de la gente. Al menos, en lo que a instalaciones fotovoltaicas se refiere, seguirá siendo necesaria la labor de profesionales cualificados para evaluar y corregir el diseño preliminar que pueda ofrecer la IA.

En conclusión, la Inteligencia Artificial puede que esté lejos de ser una tecnología perfecta por el momento y que su desarrollo pueda verse limitado por su abastecimiento energético, pero no cabe duda de que esta tecnología esconde un inmenso potencial aún por explotar y que es una herramienta que seguirá cobrando importancia en el día a día de la sociedad y transformando diversos sectores.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Motivaction Insights & Strategy, «Big Data: The 6 Vs You Need to Look at for Important Insights,» 22 Junio 2017. [En línea]. Available: <https://www.motivaction.nl/en/actualities/news/big-data-the-6-vs-you-need-to-look-at-for-important-insights>.
- [2] Statista, «Digital Economy Compass 2019,» 17 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/grafico/17734/cantidad-real-y-prevista-de-datos-generados-en-todo-el-mundo/> .
- [3] IBM, «Hadoop vs Spark,» 27 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/blog/hadoop-vs-spark/>.
- [4] Iberdrola, «Historia de la Inteligencia Artificial,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/historia-inteligencia-artificial>. [Último acceso: 2024].
- [5] MIT - Santander Open Academy, «Curso de Internet of Things,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.santanderopenacademy.com/es/courses/iot.html>.
- [6] PwC, «Consenso Económico,» 9 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.pwc.es/es/publicaciones/economia/assets/consenso-economico-1T-2017.pdf>.

- [7] CB Insights, «Research Briefs - Big Tech's AI Ambitions,» 30 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.cbinsights.com/research/big-tech-ai-acquisitions-2020/>.
- [8] Omdia Tech, «Artificial Intelligence,» [En línea]. Available: <https://omdia.tech.informa.com/topic-pages/artificial-intelligence>. [Último acceso: 2024].
- [9] Comisión Europea, «The 2023 EU Industrial R&D Investment Scoreboard,» 14 Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://iri.jrc.ec.europa.eu/scoreboard/2023-eu-industrial-rd-investment-scoreboard>.
- [10] Scottish Power Renewables, «East Anglia Three,» 2022. [En línea]. Available: https://www.scottishpowerrenewables.com/pages/east_anglia_three.aspx.
- [11] Iberdrola, «Complejo eólico marino East Anglia Hub,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-eolica-offshore/complejo-eolico-marino-east-anglia-hub>. [Último acceso: 2024].
- [12] Amazon, «Amazon Bedrock,» 2024. [En línea]. Available: https://aws.amazon.com/es/bedrock/?gclid=Cj0KCQjwsPCyBhD4ARIsAPaaRf11c75GdFTkikPQ7aUB2FSmD33-nYs1wPz6mxGTivXxrcUm_ZD2Rs4aAIU4EALw_wcB&trk=5eef8ffa-5155-4b81-9303-69672b9516c1&sc_channel=ps&ef_id=Cj0KCQjwsPCyBhD4ARIsAPaaRf11c75GdFTkikPQ7aUB2FSmD33-nYs1wPz6.
- [13] Iberdrola, «Amazon firma un nuevo acuerdo con Iberdrola para adquirir 159 MW de energía renovable de East Anglia Three, el segundo mayor parque eólico del mundo,» 20 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sala->

comunicacion/noticias/detalle/firmamos-un-nuevo-acuerdo-con-amazon-que-adquiere-159-mw-de-energia-renovable-de-east-anglia-three-el-segundo-mayor-parque-eolico-del-mundo.

- [14] Iberdrola, «Nota de prensa: Iberdrola y BCAM colaborarán en el proyecto Innovation Data Space de IA para optimizar las redes,» 29 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/documents/20125/3867737/240129-iberdrola-y-bcam-colaboraran-en-el-proyecto-innovation-data-space-de-ia-para-optimizar-las-redes.pdf>.
- [15] IA4TES, «Proyecto IA4TES,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.ia4tes.org/>.
- [16] V. N. A. A. D. P. N. Gorostidi, «Mantenimiento Predictivo de Líneas de Amarre de Turbinas Eólicas Flotantes Offshore usando Redes Neuronales Profundas,» *Journal of Physics: Conference Series*, 2022.
- [17] Iberdrola, «Eólica Marina Flotante,» [En línea]. Available: https://www.iberdrola.com/documents/20125/41584/Eolica_Marina_Flotante_746x419.jpg/d4b0a8c8-3b67-18b3-5b91-9fdab8b1f687?t=1629437750743 . [Último acceso: 2024].
- [18] Iberdrola, «Proyecto MeteoFlow,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/proyecto-meteoflow>. [Último acceso: 2024].
- [19] Stanford University, «AI Index Report 2023,» 2024. [En línea]. Available: <https://aiindex.stanford.edu/report/> .
- [20] Avangrid , «Avangrid Pioneers In-House Creation of Artificial Intelligence to Increase Reliability,» 16 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www.avangrid.com/es/w/avangrid-pioneers-in-house-creation-of-artificial->

intelligence-to-increase-
reliability?p_1_back_url=%2Fes%2Fsearch%3Fq%3Dgeomesh.

- [21] Avangrid Renewables, «AGR-REN-US Power Assets Map,» [En línea]. Available: <https://www.avangrid.com/documents/453723/3564177/AGR-REN-US-Power-Assets-12062019.pdf/29d443ad-3a5f-2a81-bd58-4b8fdeb97e9b?t=1664386896649>. [Último acceso: 2024].
- [22] Avangrid, «Avangrid Pilots Mobile Robot Dog to Advance Substation Inspections with Artificial Intelligence,» 8 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.avangrid.com/es/w/avangrid-pilots-mobile-robot-dog-to-advance-substation-inspections-with-ai>.
- [23] Endesa, «Endesa avanza en el control en tiempo real de la red de distribución con la ayuda de la inteligencia artificial,» 5 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/prensa/sala-de-prensa/noticias/transicion-energetica/digitalizacion/endesa-avanza-control-red-distribucion-con-inteligencia-artificial>.
- [24] Endesa, «Inteligencia artificial para mejorar nuestros servicios,» 2 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/proyectos/todos-los-proyectos/transicion-energetica/digitalizacion/inteligencia-artificial-mejorar-servicios>.
- [25] Endesa, «Gemelo digital: una red eléctrica virtual para construir el futuro de la energía,» 10 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/proyectos/todos-los-proyectos/transicion-energetica/redes-inteligentes/gemelo-digital-red-electrica-virtual>.

- [26] El Periódico de la Energía, «Endesa aplica la inteligencia artificial para crear “gemelos digitales” de sus centrales hidroeléctricas,» 8 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/endesa-aplica-inteligencia-artificial-crear-gemelos-digitales-centrales-hidroelectricas/>.
- [27] A. B. Barrio, «Gemelos digitales en inspecciones estructurales en centrales nucleares,» *Revista Nuclear España*, 2024.
- [28] Iberdrola, «Llevamos a WindEurope Bilbao las más innovadoras tecnologías en generación eólica,» 20 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/noticias/detalle/iberdrola-lleva-a-windeurope-bilbao-las-mas-innovadoras-tecnologias-en-generacion-eolica>.
- [29] CB Insights, «Research Briefs - The generative AI boom in 6 charts,» 27 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.cbinsights.com/research/generative-ai-funding-top-startups-investors-2023/>.
- [30] B. Elad, «OpenAI Statistics 2024 By Demographics, Products, Revenue and Growth,» 20 Mayo 2024. [En línea]. Available: https://www.enterpriseappstoday.com/stats/openai-statistics.html#By_Industry.
- [31] Stack Overflow, «2023 Developer Survey,» Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://survey.stackoverflow.co/2023/#ai>.
- [32] European Commission, Joint Research Centre, «Mapping EU level funding instruments to Digital Decade targets,» 2023. [En línea]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7e2b493b-5c27-11ee-9220-01aa75ed71a1/language-en>.

- [33] U.S. Energy Information Administration, «What is U.S. electricity generation by energy source?,» 29 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3#:~:text=In%202023%2C%20about%204%2C178%20billion,facilities%20in%20the%20United%20States.&text=About%2060%25%20of%20this%20electricity,%2C%20petroleum%2C%20and%20other%20gases..>
- [34] Red Eléctrica Española, «Generación total 2023,» Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico/generacion/generacion-de-energia-electrica/generacion-total-de-energia-electrica>.
- [35] U.S. Energy Information Administration, «U.S. electric system is made up of interconnections and balancing authorities,» 20 Julio 2016. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27152>.
- [36] Red Eléctrica Española, «Transporte,» Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/transporte>.
- [37] National Oceanic and Atmospheric Administration, «2023: A historic year of U.S. billion-dollar weather and climate disasters,» 8 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/beyond-data/2023-historic-year-us-billion-dollar-weather-and-climate-disasters>.
- [38] Yakima Herald, «Severe storms kill at least 4 in Houston knock out power to 900.000 homes,» 2024.
- [39] Iberdrola, «Instalación de aerogeneradores ¿Dónde es más eficiente instalar un aerogenerador?,» [En línea]. Available:

- <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/instalacion-de-aerogeneradores>. [Último acceso: 2024].
- [40] J. Hiller, «Microsoft Targets Nuclear to Power AI Operations,» *The Wall Street Journal*, 2023.
- [41] TuVatio, «El proceso de instalación de placas solares en casa: Todo lo que necesitas saber,» 28 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://tuvatio.es/blog/placas-solares-casa/>.
- [42] Boletín Oficial del Estado, «Disposición 5089 del BOE núm. 83 de 2019,» 2019 Abril 6. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2019/04/06/pdfs/BOE-A-2019-5089.pdf>.
- [43] Open AI, «Chat GPT 4o,» 2024. [En línea]. Available: <https://chatgpt.com/>.
- [44] Plasol, «Mapa de zonas de radiación solar en España,» [En línea]. Available: <https://plasol.com/wp-content/uploads/2019/04/MAPA-ZONAS-RADIACION-SOLAR-ESPA%C3%91A.jpg>. [Último acceso: 2024].
- [45] PVGIS, «Photovoltaic Geographical Information System,» 2024. [En línea]. Available: <https://pvgis.com/#>.
- [46] Autosolar, «Panel Solar 545W Ja Solar Mono PERC,» [En línea]. Available: https://autosolar.es/panel-solar-24-voltios/panel-solar-545w-ja-solar-mono-perc?_gl=1*1uoh0hz*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjwg8qzBhAoEiwAWagLrKRovOVkxIGTtDnisT2VDCfgseHroOKF0-3y_cylG37j1kjwt0-Ra0BoCUJQQAyD_BwE&gclid=aw.ds. [Último acceso: 2024].

- [47] Autosolar, «Inversor Huawei SUN2000-3KTL-L1 3000W,» [En línea]. Available: <https://autosolar.es/inversores-hibridos-monofasicos/inversor-huawei-sun2000-3ktl-11-3000w> . [Último acceso: 2024].
- [48] ONU, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [49] Iberdrola, «Contrato de compraventa de energía,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/conocenos/contrato-ppa-energia>.
- [50] Amazon, «Amazon Sagemaker,» 2023. [En línea]. Available: https://docs.aws.amazon.com/es_es/sagemaker/latest/dg/sagemaker-dg.pdf#whatis .
- [51] National Renewable Energy Laboratory (NREL), «OpenFAST,» [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/wind/nwtc/openfast.html>. [Último acceso: 2024].

ANEXO I. FICHAS TÉCNICAS DE EQUIPOS

Ficha técnica de placas solares JAM72S30-545/MR, de JA Solar

Harvest the Sunshine



DEEP BLUE 3.0

Mono 555W MBB Half-cell Module
JAM72S30 530-555/MR Series

Introduction

Assembled with 11BB PERC cells, the half-cell configuration of the modules offers the advantages of higher power output, better temperature-dependent performance, reduced shading effect on the energy generation, lower risk of hot spot, as well as enhanced tolerance for mechanical loading.



Higher output power



Lower LCOE



Less shading and lower resistive loss



Better mechanical loading tolerance

Superior Warranty

- 12-year product warranty
- 25-year linear power output warranty



■ New linear power warranty ■ Standard module linear power warranty

Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC 61730, UL 61215, UL 61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- ISO 45001: 2018 Occupational health and safety management systems
- IEC 62941: 2019 Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Quality system for PV module manufacturing





www.jasolar.com

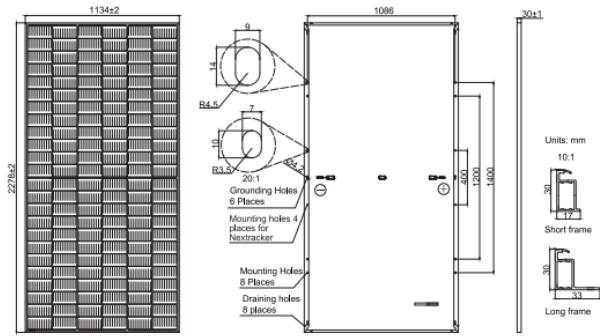
Specifications subject to technical changes and tests. JA Solar reserves the right of final interpretation.



JA SOLAR

JAM72S30 530-555/MR Series

MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	27.8kg
Dimensions	2278±2mm×1134±2mm×30±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
No. of cells	144(6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	MC4-EVO2/ QC 4.10-351
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 200mm(+)/300mm(-); Landscape: 1300mm(+)/1300mm(-)
Packaging Configuration	36pcs/Pallet 720pcs/40HQ Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S30 -530/MR	JAM72S30 -535/MR	JAM72S30 -540/MR	JAM72S30 -545/MR	JAM72S30 -550/MR	JAM72S30 -555/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	530	535	540	545	550	555
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49,30	49,45	49,60	49,75	49,90	50,02
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	41,31	41,47	41,64	41,80	41,96	42,11
Short Circuit Current(Isc) [A]	13,72	13,79	13,86	13,93	14,00	14,07
Maximum Power Current(Imp) [A]	12,83	12,90	12,97	13,04	13,11	13,18
Module Efficiency [%]	20,5	20,7	20,9	21,1	21,3	21,5
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0,045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0,275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0,350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1,5G					

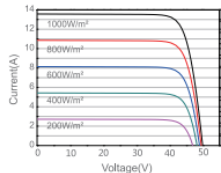
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

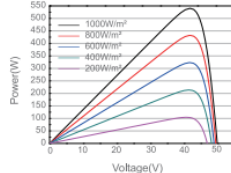
TYPE	JAM72S30 -530/MR	JAM72S30 -535/MR	JAM72S30 -540/MR	JAM72S30 -545/MR	JAM72S30 -550/MR	JAM72S30 -555/MR	OPERATING CONDITIONS
Rated Max Power(Pmax) [W]	401	405	408	412	416	420	Maximum System Voltage 1000V/1500V DC
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46,18	46,31	46,43	46,55	46,68	46,85	Operating Temperature -40 C ~+85 C
Max Power Voltage(Vmp) [V]	38,57	38,78	38,99	39,20	39,43	39,66	Maximum Series Fuse Rating 25A
Short Circuit Current(Isc) [A]	11,01	11,05	11,09	11,13	11,17	11,21	Maximum Static Load Front* 5400Pa(112lb/ft ²) Maximum Static Load Back* 2400Pa(50lb/ft ²)
Max Power Current(Imp) [A]	10,39	10,43	10,47	10,51	10,55	10,59	NOCT 45±2 C
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1,5G						Safety Class Class II
*For NexTracker installations, Maximum Static Load, Front is 1800Pa while Maximum Static Load, Back is 1800Pa.							Fire Performance UL Type 1

CHARACTERISTICS

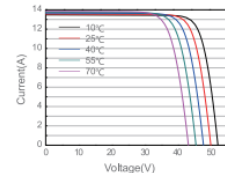
Current-Voltage Curve JAM72S30-540/MR



Power-Voltage Curve JAM72S30-540/MR



Current-Voltage Curve JAM72S30-540/MR



Premium Cells, Premium Modules

Version No. : Global_EN_20220802A

Ficha técnica del inversor SUN2000-3KTL-L1, de Huawei

Smart Energy Center



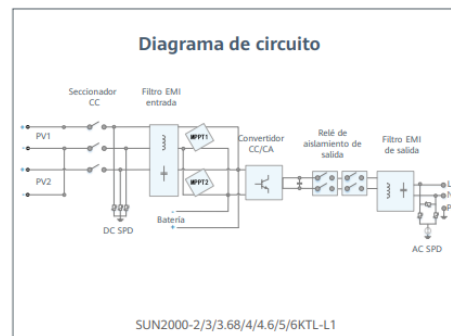
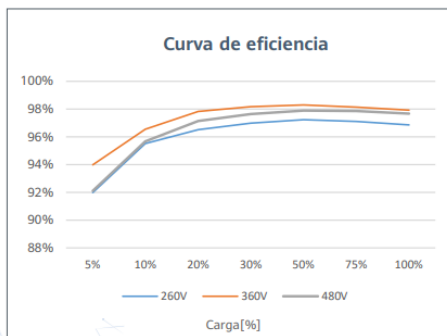
Seguridad activa
Protección contra arcos eléctricos
active con tecnología de IA



Mayor rendimiento
Hasta un 30 % más de
energía con optimizadores



2x POTENCIA de Batería
5kW de Salida en CA más
5kW de Carga en Baterías



SUN2000-2/3/3.68/4/4.6/5/6KTL-L1
Especificaciones técnicas

Especificaciones técnicas	SUN2000 -2KTL-L1	SUN2000 -3KTL-L1	SUN2000 -3.68KTL-L1	SUN2000 -4KTL-L1	SUN2000 -4.6KTL-L1	SUN2000 -5KTL-L1	SUN2000 -6KTL-L1 ¹
Eficiencia							
Eficiencia Máxima	98.2 %	98.3 %	98.4 %	98.4 %	98.4 %	98.4 %	98.4 %
Eficiencia europea	96.7 %	97.3 %	97.3 %	97.5 %	97.7 %	97.8 %	97.8 %
Entrada (FV)							
Entrada de CC máxima recomendada ²	3,000 Wp	4,500 Wp	5,520 Wp	6,000 Wp	6,900 Wp	7,500 Wp	9,000 Wp
Máx. tensión de entrada	600 V ³						
Tensión de arranque	100 V						
Rango de tensión de operación de MPPT	90 V – 560 V ³						
Tensión nominal de entrada	360 V						
Máx. intensidad por MPPT	12.5 A						
Máx. intensidad de cortocircuito por MPPT	18 A						
Cantidad de MPPTs	2						
Máx. número de entradas por MPPT	1						
Entrada (Batería CC)							
Batería compatible	LG Chem RESU 7H_R / 10H_R						
Rango de tensión de operación	350 – 450 Vcc						
Max. corriente de operación	10 A @7H_R / 15 A @10H_R						
Potencia de carga máxima	3,500 W @7H_R / 5,000 W @10H_R						
Potencia máxima de descarga @ 7H_R	2,200 W	3,300 W	3,500 W	3,500 W	3,500 W	3,500 W	3,500 W
Potencia máxima de descarga @ 10H_R	2,200 W	3,300 W	3,680 W	4,400 W	4,600 W	5,000 W	5,000 W
Batería compatible HUAWEI Smart ESS Battery 5kWh – 30kWh ¹							
Rango de tensión de operación	350 – 560 Vdc						
Max. corriente de operación	15 A						
Potencia de carga máxima	5,000 W ⁴						
Potencia máxima de descarga	2,200 W	3,300 W	3,680 W	4,400 W	4,600 W	5,000 W	5,000 W
Salida							
Conexión a la red eléctrica	Monofásica						
Potencia de salida nominal	2,000 W	3,000 W	3,680 W	4,000 W	4,600 W	5,000 W ⁵	6,000 W
Máx. potencia aparente de CA	2,200 VA	3,300 VA	3,680 VA	4,400 VA	5,000 VA ⁶	5,500 VA ⁷	6,000 VA
Tensión nominal de Salida	220 Vac / 230 Vac / 240 Vac						
Frecuencia nominal de red de CA	50 Hz / 60 Hz						
Máx. intensidad de salida	10 A	15 A	16 A	20 A	23 A ⁸	25 A ⁶	27.3 A
Factor de potencia ajustable	0.8 leading ... 0.8 lagging						
Máx. distorsión armónica total	≤ 3 %						
Salida para SAI	Sí (a través de Backup Box-B0 ¹)						
Protección & Características							
Protección anti-ista	Sí						
Protección contra polaridad inversa de CC	Sí						
Monitorización de aislamiento	Sí						
Protección contra descargas atmosféricas CC	Sí, clase de protección TIPO II compatible según EN / IEC 61643-11						
Protección contra descargas atmosféricas CA	Sí, clase de protección TIPO II compatible según EN / IEC 61643-11						
Monitorización de la corriente residual	Sí						
Protección contra sobreintensidad de CA	Sí						
Protección contra cortocircuito de CA	Sí						
Protección contra sobretensión de CA	Sí						
Protección contra sobrecalentamiento	Sí						
Protección de falla de arco	Sí						
Carga inversa de la batería desde la red	Sí						
Datos generales							
Rango de temperatura de operación	-25 ~ +60 °C						
Humedad relativa de operación	0 %RH – 100 %RH						
Altitud de operación	0 ~ 4,000 m (disminución de la capacidad eléctrica a partir de los 2000 m)						
Ventilación	Convección natural						
Pantalla	Indicadores LED; WLAN integrado + aplicación FusionSolar						
Comunicación	RS485, WLAN a través del módulo WLAN incorporado en el inversor Ethernet a través de Smart Dongle-WLAN-FE (Opcional); 4G / 3G / 2G a través de Smart Dongle-4G (Opcional)						
Peso (incluido soporte de montaje)	12.0 kg						
Dimensiones (incluido soporte de montaje)	365mm * 365mm * 156 mm						
Grado de protección	IP65						
Consumo de energía durante la noche	< 2,5 W						
Compatibilidad con optimizadores							
Optimizador compatible con MBUS CC	SUN2000-450W-P						
Cumplimiento de estándares (más opciones disponibles previa solicitud)							
Seguridad	EN/IEC 62109-1, EN/IEC 62109-2						
Estándares de conexión a red eléctrica	G98, G99, EN 50549-1, CEI 0-21, VDE-AR-N-4105, AS 4777.2, C10/11, ABNT, UTE C15-712, RD 1699, TOR D4, IEC61727, IEC62116						

¹ 1 Disponible en Q3 del 2020.

² La potencia fotovoltaica de entrada máxima del inversor es de 10.000 Wp cuando las cadenas largas se diseñen y conecten al completo de optimizadores de potencia SUN2000-450W-P.

³ El límite máximo de tensión de entrada y de operación se reducirán a 495 V cuando el inversor se conecte y funcione con la batería LG.

⁴ 2.500 W en las baterías HUAWEI ESS de 5kWh

⁵ 5 AS4777.2: 4,991W; ⁶ VDE-AR-N 4105: 4,600VA / AS4777.2: 4,999VA; ⁷ AS4777.2: 4,999VA / C10/11: 5,000VA; ⁸ AS4777.2: 21.7A.

