

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

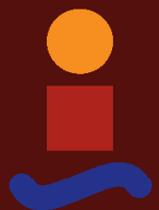
Diseño de una instalación híbrida eólico-fotovoltaica
de 10 MWp

Autor: Pablo Pérez-Leiva Florido

Tutor: Miguel Ángel González Cagigal

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño de una instalación híbrida eólico- fotovoltaica de 10 MWp

Autor:

Pablo Pérez-Leiva Florido

Tutor:

Miguel Ángel González Cagigal

Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Proyecto Fin de Carrera: Diseño de una instalación híbrida eólico-fotovoltaica de 10 MWp

Autor: Pablo Pérez-Leiva Florido

Tutor: Miguel Ángel González Cagigal

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mis amigos

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría darle las gracias a mi familia, que siempre han estado apoyándome en los buenos y malos momentos durante mi paso por la Escuela sin importar los resultados académicos y siempre priorizando mi bienestar. Por otro lado, quería agradecer a mis compañeros y amigos que me han ayudado a que mi etapa universitaria pase a formar una parte fundamental en mi vida y de la que tendré recuerdos para el resto de mi vida.

Por último, me gustaría agradecer a mis profesores el esfuerzo diario por enseñarnos todo lo que está en su mano para que podamos desarrollarnos como los mejores ingenieros posibles, en especial a mi tutor de este trabajo Miguel Ángel González Cagigal, quién considero la viva imagen del buen maestro, con ilusión por su trabajo y lo más importante de todo, con ilusión por el aprendizaje del alumno.

Pablo Pérez-Leiva Florido

Sevilla, 2024

En este trabajo se ha realizado el diseño de una instalación de energía renovable, que combina la generación eólica con la fotovoltaica de una manera híbrida.

Para comenzar este trabajo, se ha hecho un análisis sobre la evolución histórica que han sufrido la energía eólica y la energía fotovoltaica. Se ha podido comprobar que, aunque es en los últimos tiempos cuando mayor importancia se les ha dado a estas energías, el comienzo de su uso se remonta al principio de la Historia y han sufrido una gran evolución hasta llegar a su estado de implantación actual.

A continuación, se ha realizado un estudio meteorológico para poder valorar la situación geográfica óptima de la instalación, valorando tanto la velocidad y densidad del viento como la irradiancia y las horas de sol en diferentes zonas. Gracias a estos datos y a la comparativa realizada se ha podido llegar a elegir el punto óptimo para la implantación de esta instalación.

Una vez que se ha decidido la ubicación geográfica de la instalación se ha realizado un un diseño de la instalación mediante los *softwares* más avanzados y utilizados en el mercado laboral para poder ajustarse de la mejor manera posible a la realidad. Este diseño incluye tanto implantación y distribución como cálculos eléctricos necesarios para poder cumplir con la legislación y obtener el mayor rendimiento de la instalación. En esta sección del trabajo se realiza la elección de los diferentes elementos que conforman la planta como son los seguidores, los módulos, los inversores y los generadores eólicos, ajustándose de la mejor manera posible a las necesidades de la instalación.

Una vez que se ha diseñado la instalación se ha realizado un análisis económico de la instalación para poder valorar la rentabilidad de ésta. En este análisis, se ha realizado un presupuesto del gasto económico que supondría la instalación basándose en precios del mercado actual. Además, se han tenido en cuenta diferentes parámetros como el VAN, la TIR y el Payback, valores fundamentales para poder valorar la inversión a largo plazo que supondría esta instalación.

Abstract

In this work, the design of a renewable energy installation has been carried out, which combines wind and photovoltaic generation in a hybrid way.

To begin this work, an analysis has been made on the historical evolution of wind energy and photovoltaic energy. It has been shown that although it is in recent times when these energies have been given greater importance, the beginning of their use dates to the beginning of history and they have undergone a great evolution until reaching their current state of implementation.

Next, a meteorological study has been carried out to evaluate the optimal geographical location of the installation, assessing both the speed and density of the wind and the irradiance and hours of sunshine in different areas. Thanks to this data and the comparative study, it has been possible to choose the optimum location for the installation of this facility.

Once the geographical location of the installation has been decided, a design of the installation has been made by means of the most advanced software used in the labor market to be able to adjust in the best possible way to the reality. This design includes both implementation and distribution as well as electrical calculations necessary to comply with the legislation and to obtain the best performance of the installation. This section of the work includes the selection of the different elements that make up the plant, such as the *trackers*, the modules and the wind generators, adjusting them in the best possible way to the needs of the installation.

Once the installation has been designed, an economic analysis of the installation has been carried out in order to evaluate its profitability. In this analysis, an estimate of the economic cost of the installation has been made based on current market prices. In addition, different parameters have been considered such as NPV, IRR and Payback, fundamental values to be able to value the long-term investment that this installation would entail.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de ilustraciones	xvii
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos</i>	1
1.2 <i>Antecedentes, análisis del sector energético actual y previsión a futuro</i>	2
1.3 <i>Normativa vigente y alcance de la planta.</i>	4
1.4 <i>Metodología</i>	5
2 Generación fotovoltaica	7
2.1 <i>Evolución histórica de la generación fotovoltaica</i>	7
2.2 <i>Situación global actual de la generación fotovoltaica</i>	9
2.3 <i>Instalaciones fotovoltaicas y códigos de red</i>	11
3 Generación eólica	15
3.1 <i>Evolución histórica de la generación eólica</i>	15
3.2 <i>Situación global de la generación eólica</i>	19
3.3 <i>Instalaciones Eólicas y Códigos de Red</i>	20
4 Análisis de la ubicación geográfica de la instalación	23
4.1 <i>Análisis de ubicación óptima de una planta fotovoltaica</i>	23
4.2 <i>Análisis de ubicación óptima de una planta eólica</i>	25
4.3 <i>Conclusión de ubicación óptima</i>	29
5 Análisis de la instalación solar fotovoltaica	33
5.1 <i>Diseño de la instalación en PVCas</i>	33
5.2 <i>Informe extraído de PVsyst</i>	34
5.3 <i>Cálculo de cableado</i>	34
5.3.1 <i>Cálculo de cableado de string</i>	34
5.3.2 <i>Cálculo cableado AC de baja tensión</i>	37
5.3.2.1 <i>Criterio de caída de tensión</i>	37
5.3.2.2 <i>Criterio de corriente máxima admisible</i>	38
5.3.2.3 <i>Criterio térmico</i>	39
5.3.3 <i>Cálculo de puesta a tierra</i>	40
6 Análisis instalación eólica	41
6.1 <i>Metodología</i>	41
6.2 <i>Cálculo del cableado</i>	45
6.2.1 <i>Criterio de caída de tensión</i>	46
6.3.2.2 <i>Criterio de corriente máxima admisible</i>	46
6.3.2.3 <i>Criterio térmico</i>	47

7 Análisis económico de la instalación	48
7.1 Presupuesto y mediciones de equipos principales de la instalación	48
8 Conclusiones	50
Referencias	51
Anexos	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Periodo de tiempo de funcionamiento según rango de frecuencia	12
Tabla 3-1:Horas de sol anuales en Andalucía	25
Tabla 3-2:Horas de sol anuales en Murcia	25
Tabla 3-3:Horas de sol anuales en Extremadura	25
Tabla 7-1:Presupuesto instalación	48
Tabla 7-2: Tabla de Payback desglosado	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Evolución histórica de la energía [3]	2
Ilustración 1-2: Comparativa potencia instalada-cobertura de la demanda 2019 [5]	3
Ilustración 1-3: Objetivos PNIEC de capacidad renovable [7]	4
Ilustración 2-1: Primer módulo fotovoltaico	8
Ilustración 2-2: Evolución histórica generación fotovoltaica	9
Ilustración 2-3: Ranking potencia instalada [13]	10
Ilustración 2-4: Paneles Fotovoltaicos actuales [15]	11
Ilustración 2-5: Conexión de la instalación fotovoltaica [16]	13
Ilustración 3-1: Primer molino diseñado para generar electricidad	16
Ilustración 3-2: Aerogenerador de eje horizontal	17
Ilustración 3-3: Aerogenerador de eje vertical Savonius	18
Ilustración 3-4: Aerogenerador Darrieus	18
Ilustración 3-5: Ranking países de potencia terrestre [20]	19
Ilustración 3-6: Generación en España [22]	20
Ilustración 3-7: Partes de un aerogenerador	21
Ilustración 3-8: Instalación eólica conectada a red [25]	22
Ilustración 4-1: Distribución radiación en Europa [26]	24
Ilustración 4-2: División mapa de España por radiación	24
Ilustración 4-3: Viento medio a 30 m de altitud	26
Ilustración 4-4: Viento medio a 60 m de altitud	26
Ilustración 4-5: Viento medio a 80 m de altitud	27
Ilustración 4-6: Densidad de potencia del viento a 30 m de altitud	28
Ilustración 4-7: Densidad de potencia del viento a 60 m de altitud	28
Ilustración 4-8: Densidad de potencia del viento a 80 m de altitud	29
Ilustración 4-9: Ubicación de la instalación	30
Ilustración 4-10: Ubicación de la instalación	30
Ilustración 4-11: Ubicación de la instalación	31
Ilustración 5-1: Distribución instalación fotovoltaica	33
Ilustración 5-2: Sección según material y valor de corriente [29]	36
Ilustración 5-3: Factor de agrupación [30]	37
Ilustración 5-4: Secciones de cable según intensidad [31]	39
Ilustración 5-5: Factores de corrección por agrupamiento	40
Ilustración 6-1: Velocidad del viento anual	41
Ilustración 6-2: Gráfica de densidad de aire anual	42
Ilustración 6-3: Potencia del aire por unidad de área	42

Ilustración 6-4: Modelo de turbina seleccionado [32]	43
Ilustración 6-5: Curva de potencia de la turbina	44
Ilustración 6-6: Producción de potencia anual	44
Ilustración 6-7: Distancias necesarias entre aerogeneradores	45
Ilustración 6-8: Layout instalación	45
Ilustración 6-9: Secciones cable de media tensión [33]	47

1 INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más consciente de los desafíos ambientales y la necesidad imperante de encontrar soluciones sostenibles, las energías renovables se han erigido como pilares fundamentales para modelar el futuro energético del planeta. Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se adentra en el crucial campo de las energías renovables, explorando diversas tecnologías y tendencias que están redefiniendo la manera en que generamos y consumimos energía.

La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles ha adquirido una relevancia sin precedentes en la agenda global, impulsada por la necesidad de mitigar el cambio climático y reducir nuestra dependencia de los recursos fósiles.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en el diseño de una instalación renovable, la cual combina generación fotovoltaica con eólica de una manera híbrida. Dicha instalación tendrá una potencia máxima 10 MW y estará instalada en el sistema eléctrico español a un nivel de tensión de 36 kV, a lo largo del trabajo analizaremos las posibles ubicaciones de nuestra instalación y estableceremos el lugar óptimo para su localización.

Como objetivos específicos del trabajo tenemos:

- Análisis de los recursos energéticos disponibles en la región.
- Examinar los factores cruciales para diseñar eficientemente un parque híbrido.
- Calcular la capacidad óptima de generación de cada tecnología (eólica y fotovoltaica) para maximizar la producción de energía y satisfacer la demanda eléctrica de la red.
- Evaluar la capacidad de conexión de la planta híbrida a la red eléctrica existente, considerando los requisitos técnicos y normativas vigentes.
- Realizar un análisis económico exhaustivo del proyecto, incluyendo el cálculo de la rentabilidad del mismo.

1.2 Antecedentes, análisis del sector energético actual y previsión a futuro

Para comenzar a hablar del sector energético se hablará en primer lugar sobre cómo ha sido la evolución energética a lo largo de la historia, hasta llegar a la actualidad:

La historia de la energía es extensa, marcada por la evolución de las demandas energéticas de nuestra sociedad a lo largo del tiempo. Desde sus inicios, la humanidad ha confiado en la energía como un recurso para satisfacer sus necesidades diarias. En los primeros días, esto implicaba el uso de leña para calefacción y cocina. Con el transcurso del tiempo, se descubrió que el carbón representaba una fuente de calor y electricidad más eficiente que la madera. Si bien el carbón era un combustible más limpio para aplicaciones domésticas, también demostró ser idóneo para impulsar locomotoras, barcos y otros medios de transporte. En épocas más recientes, la dependencia del carbón como fuente primaria de energía ha disminuido, ya que se reconoce que no es tan respetuoso con el medio ambiente como otras alternativas, como la energía solar o eólica, [1]

Desde el inicio de la revolución industrial, la matriz energética de la mayoría de los países ha estado fuertemente dominada por el uso de combustibles fósiles. Esta situación ha tenido consecuencias significativas tanto para el clima global como para la salud humana. Tres cuartas partes de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero provienen de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, siendo estos los principales responsables de la considerable contaminación atmosférica a nivel local. Como respuesta a esta problemática, el 12 de diciembre de 2015, en la COP21, abreviatura utilizada para referirse a la Conferencia 21 de las partes de Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se estableció el denominado Acuerdo de París. Este compromete a las naciones a trabajar en conjunto para limitar el aumento de la temperatura media global del planeta a menos de 2 °C durante el presente siglo. De esta manera, se establece un compromiso colectivo en la lucha contra el cambio climático, con el objetivo de promover un desarrollo que sea bajo en emisiones, resiliente al clima y sostenible, [2].

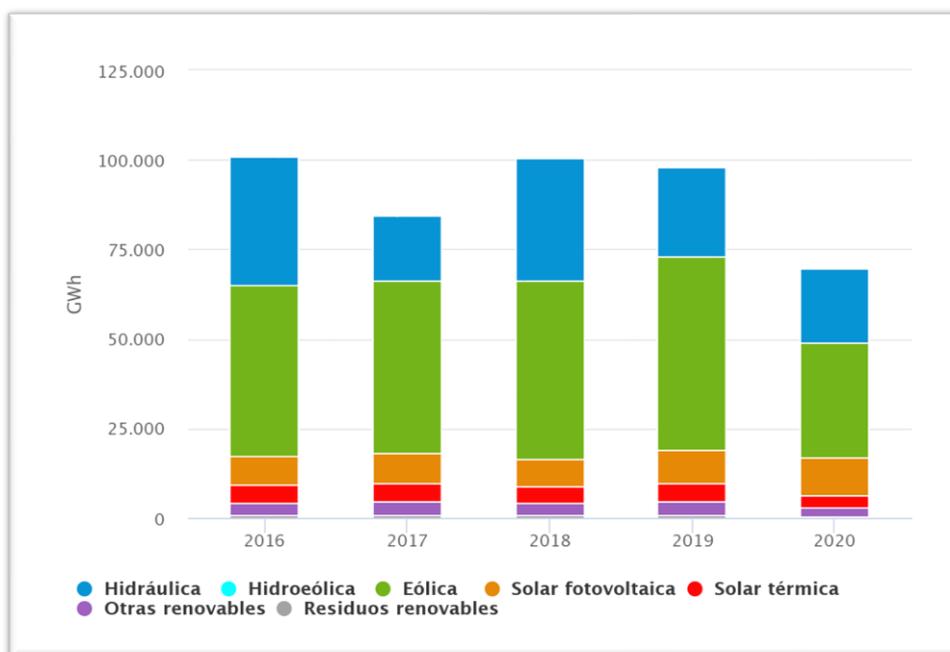


Ilustración 1-1: Evolución histórica de la energía [3]

En la Ilustración 1-1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra cómo ha evolucionado el uso de los distintos tipos de fuentes de generación como petróleo, gas natural, nuclear y renovables. Analizando la gráfica observamos cómo la demanda ha aumentado a lo largo de la

historia, también podemos observar como en los años más recientes ha caído el uso de combustibles fósiles como forma de generación y comienza a aumentar la generación renovable.

En el año 2022, la producción de energía eléctrica en España alcanzó aproximadamente los 276,320 GWh. De esta energía generada, el 22.1 % tuvo origen eólico, perdiendo este año su estatus como la principal fuente energética nacional, ocupando esta posición el ciclo combinado, responsable de casi el 25 % de la generación eléctrica. La generación nuclear ocupó el tercer lugar en la matriz energética, contribuyendo con el 20.5 % de la electricidad producida durante ese periodo. Toda esta información puede verse recogida en el gráfico de sectores de la Figura 1-1.

En lo que respecta a potencia instalada, España ha experimentado un crecimiento continuo de las energías renovables, representando alrededor del 59.2 % de la capacidad total instalada en 2022. Entre estas, la generación eólica destacó significativamente sobre otras tecnologías gracias en gran medida a regiones como Castilla y León, Galicia y Aragón, que han emergido como los principales centros de producción de energía limpia en España, consolidando así su papel fundamental en la transición hacia un sistema energético más sostenible, [4].

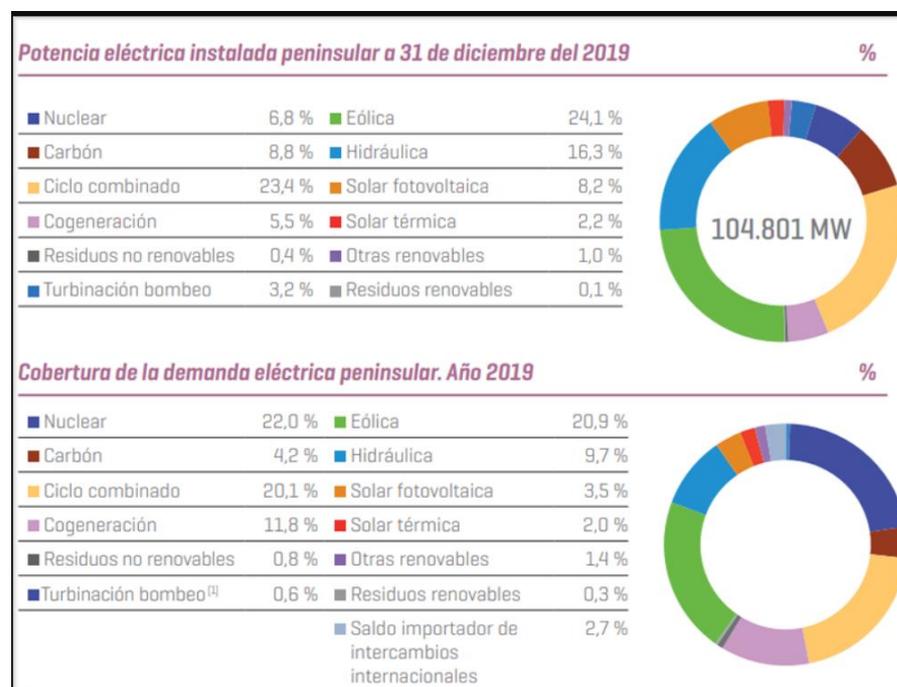


Ilustración 1-2: Comparativa potencia instalada-cobertura de la demanda 2019 [5]

Poniendo el foco en los planes a futuro de España, y observando la Ilustración 1-2 vemos que una instalación híbrida eólico-fotovoltaica, como la planteada en este trabajo, estará muy alineada con lo que se prevé como el futuro energético, el cual se perfila con un enfoque hacia las fuentes renovables, con el objetivo ambicioso de generar el 81 % de la electricidad a partir de fuentes de energía limpias para el año 2030. Este compromiso representa un gran avance en la lucha contra el cambio climático y refuerza el liderazgo del país en la transición hacia un sistema energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

En lo que respecta a las fuentes renovables involucradas en la instalación que aborda este trabajo, en el borrador aprobado por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), se establece que pasará de los 39 GW proyectados en la versión anterior del PNIEC a los 76 GW y con la eólica ocurrirá algo parecido y se prevé un aumento de 50 a 62 GW, como puede observarse en la Ilustración 1-3, [6].

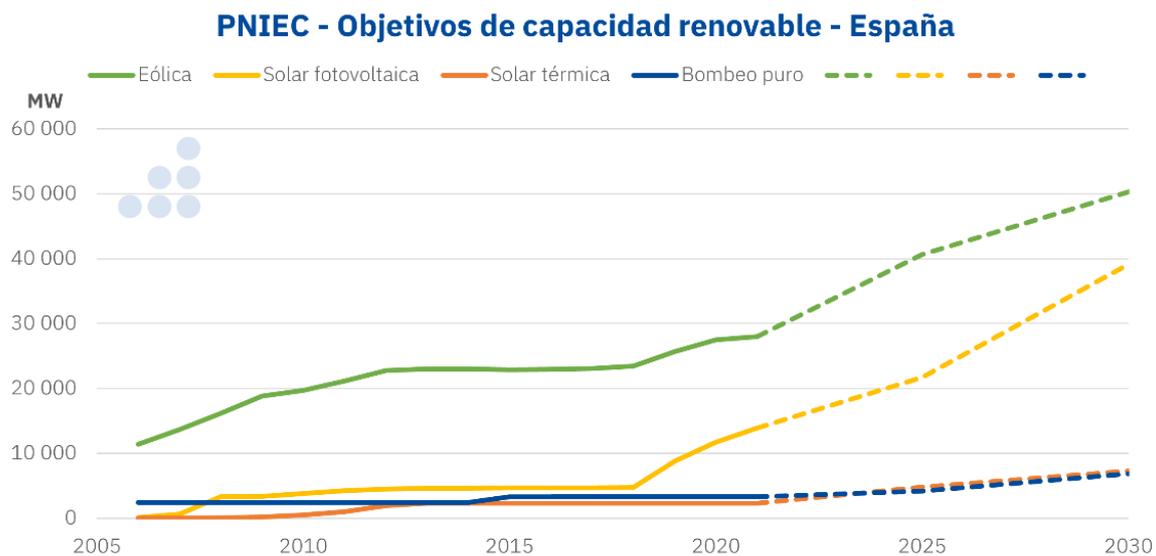


Ilustración 1-3: Objetivos PNIEC de capacidad renovable [7]

1.3 Normativa vigente y alcance de la planta.

La normativa aplicable para las centrales fotovoltaicas se diferencia mucho dependiendo de si la potencia de la instalación es superior a 100 kW o no. Así, para instalaciones de potencia igual o menor a 100 kW, la legislación se puede hacer en gran parte atendiendo únicamente a lo fijado en el RD 1699/2011, que regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia. Con todo, la mayoría de las instalaciones de baja potencia se diseñan como aplicaciones de autoconsumo y, por consiguiente, la normativa puede cambiar.

En cuanto a las centrales de más de 100 kW, las normas principales que rigen las instalaciones renovables son:

- El RD 413/2014 que regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables.
- El RDL 23/2020 en el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica.
- El RD 1183/2020 de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.
- La Circular 1/2021 de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología y condiciones del acceso y de la conexión a las redes de transporte y distribución de las instalaciones de producción de energía eléctrica, [3].

El desarrollo de este proyecto se basará en datos proporcionados por fabricantes existentes en el mercado, así como en la evaluación de un emplazamiento específico que aún está por determinar. Se estimarán aquellos factores no disponibles utilizando valores de referencia y extrapoliéndolos a partir de datos reales. La obtención de datos meteorológicos específicos del lugar se llevará a cabo mediante el uso de bases de datos o, en el caso de la energía eólica, a través de una torre meteorológica de referencia.

La evaluación del diseño del proyecto abarcará diversos parámetros con el objetivo de determinar la configuración óptima tanto desde un punto de vista técnico como económico. Se realizará un análisis detallado de la sensibilidad, centrándose en la producción y los costes, prestando especial

atención a aquellos factores que tienen una influencia significativa.

Es esencial tener en cuenta que las instalaciones híbridas representan una novedad en el mercado y se consideran innovadoras, ofreciendo múltiples ventajas en términos de rentabilidad económica y gestión de la energía. Su capacidad para generar electricidad prácticamente las 24 horas del día les confiere un atractivo adicional en el panorama actual de desarrollo energético. [8]

1.4 Metodología

Para la parte de la instalación de generación fotovoltaica usaremos el *software* de diseño PVcase [9], el cual es uno de los *softwares* más usados en la industria fotovoltaica, dentro de este programa podemos encontrar herramientas como localización de nuestra instalación, análisis meteorológico de la ubicación elegida y diferentes mediciones eléctricas. Además, se va a usar también el *software* PVsyst [10], *software* especializado en los cálculos eléctricos de la instalación y en el análisis de los datos de generación eléctrica.

Para la parte de generación eólica se usarán también dos *softwares* para su diseño. En primer lugar, se usará el *software* Furoow para el análisis del perfil de viento en la ubicación elegida y para el análisis de la instalación en sí misma, este *software* cuenta con un amplio catálogo de aerogeneradores para así poder elegir el que más se adecúe a la instalación diseñada. Además, con este *software* se pueden obtener las diferentes gráficas necesarias para el estudio de la instalación, como los perfiles de velocidad del viento en una ubicación en específico o las curvas de potencia de los diferentes aerogeneradores.

Mediante el *software* AutoCad [11] se representarán las ubicaciones elegidas para los aerogeneradores dentro de la instalación gracias a las facilidades gráficas que este *software* aporta, pudiendo realizar las diferentes mediciones necesarias para la correcta ubicación de esta planta.

2 GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

En este capítulo, se va a realizar un análisis a lo largo de la historia de la generación de energía solar fotovoltaica, viendo cómo ha evolucionado hasta la actualidad, además se explicará la situación actual de esta generación a nivel global y se darán las condiciones necesarias para poder establecer la conexión a la red eléctrica.

2.1 Evolución histórica de la generación fotovoltaica

En primer lugar, se va a explicar cómo ha influido la energía solar y fotovoltaica en la vida del ser humano y cómo ha sido su evolución hasta la actualidad:

Esta forma de energía ha sido conocida desde la antigua Grecia, siendo los griegos pioneros en idear estructuras que aprovechaban la luz y el calor solar alrededor del año 400 a.CR.

Posteriormente, los romanos descubrieron cómo utilizar invernaderos con ventanas de cristal para favorecer el crecimiento adecuado de alimentos mediante la captación de la luz solar.

En un período que abarca desde 1838 hasta 1890, varios científicos, como Horace de Saussure y Edmond Becquerel, así como el menos conocido Charles Fritts, contribuyeron al desarrollo de dispositivos para generar electricidad a partir de la energía solar. Fue en 1883 cuando Fritts logró concretar el efecto fotovoltaico mediante un ingenio que daría origen a las modernas placas solares.

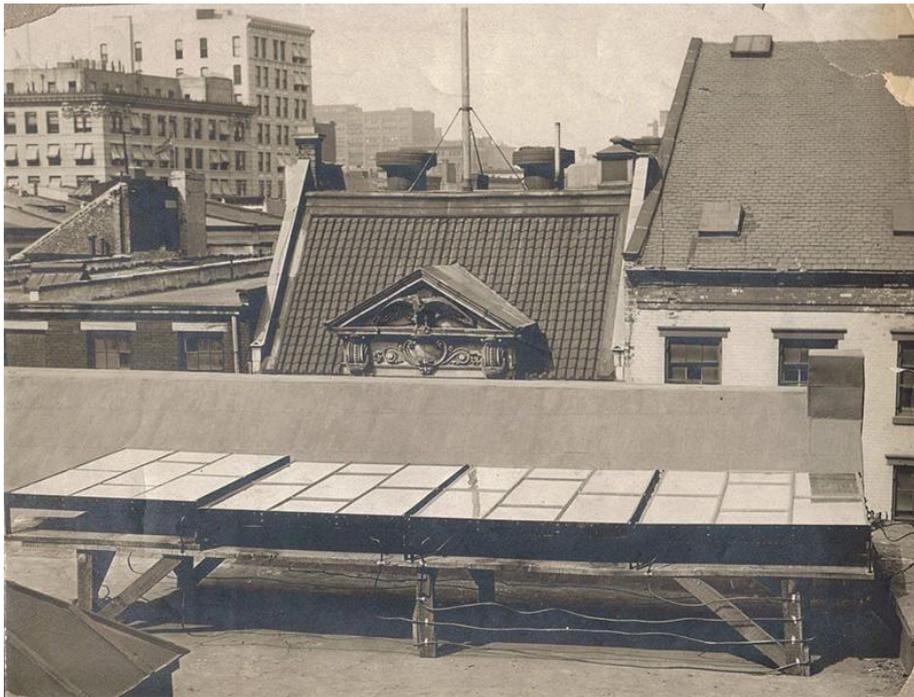


Ilustración 2-1: Primer módulo fotovoltaico

En la Ilustración 2-1 podemos ver el primer modelo de panel fotovoltaico creado por Charles Fritts el cuál consistió en una capa de selenio sobre una plancha de metal y recubierta con una fina película de pan de oro.

La verdadera implementación de la célula solar de Fritts no ocurrió hasta setenta años después, cuando los laboratorios Bell lograron desarrollar una célula fotovoltaica funcional y comercializable.

En apariencia, el interés en la energía solar disminuyó en la década de 1970. No fue hasta después de la década de 1990 que algunos presidentes de Estados Unidos decidieron implementar políticas relacionadas con la energía solar, lo que impulsó su uso.

Aunque la evolución de la energía solar ha estado en marcha durante décadas, la atención a lo largo de los años se ha centrado en hacer que la tecnología sea más rentable y aplicable al mundo actual. En este sentido, ha habido un gran éxito con las principales potencias mundiales en el ámbito de la energía fotovoltaica, como Estados Unidos, China y Alemania.

La segunda generación de células solares se introdujo en la década de 1990, utilizando un método de producción epitaxial para crear láminas más flexibles y delgadas que sus predecesoras. Aunque su eficiencia, que oscila entre el 28% y el 30%, es una ventaja significativa, su alto costo actualmente las limita a los sectores aeronáutico y espacial.

La tercera generación busca mejorar aún más los paneles solares. Investigadores y empresas de todo el mundo trabajan en diversas tecnologías, como los huecos cuánticos, nanotubos de carbono o nanoestructuras de óxido de titanio con colorante (DSSC). Estas tecnologías podrían utilizarse para crear pinturas que generen energía al recubrir casas o carreteras. Se espera que la eficiencia de estos sistemas alcance entre el 30% y el 60%.

La cuarta generación de paneles solares combinaría nanopartículas con polímeros para lograr células más eficientes y económicas. Estos paneles se basarían en varias capas que aprovecharían no solo los diferentes tipos de luz, sino también el espectro infrarrojo. La NASA ha empleado esta tecnología multiunión en sus misiones a Marte.

Para hacer que la energía solar sea competitiva y accesible para todos, los científicos están explorando alternativas al silicio mediante materiales fotovoltaicos diseñados específicamente para captar

eficientemente la luz solar.

De estas nuevas tecnologías, las perovskitas son las más prometedoras. Este material híbrido con propiedades fotovoltaicas descubiertas en 2012 ha atraído la atención de científicos de todo el mundo, logrando casi igualar al silicio en eficiencia, con un récord del 22%. [5]

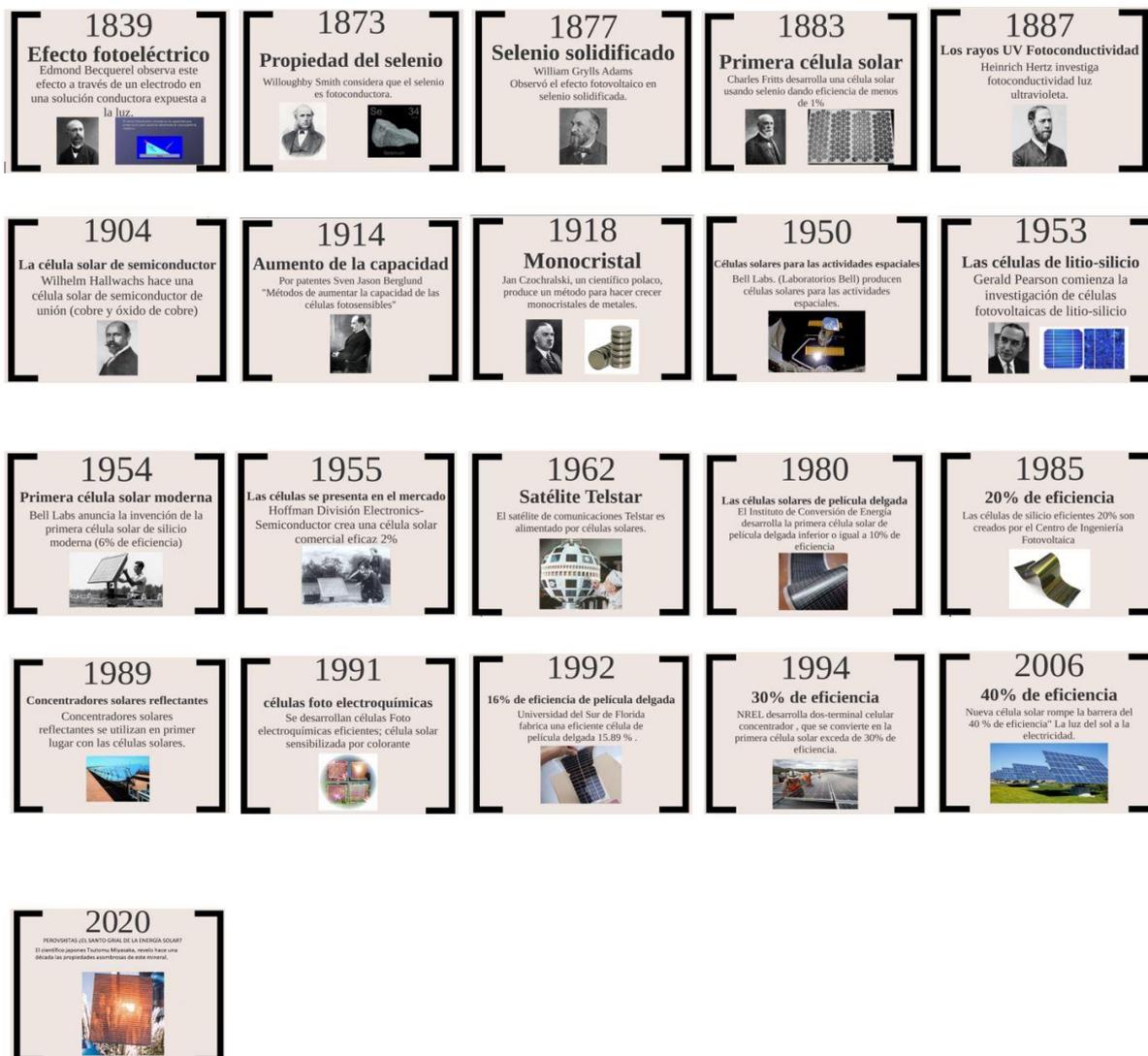


Ilustración 2-2: Evolución histórica generación fotovoltaica

En la Ilustración 2-2 se presentan los avances en la tecnología de paneles solares a lo largo de la historia remarcando los hitos más importantes. En el año 2009, la potencia de un panel era de 209 W y, doce años después, ha triplicado su capacidad de potencia a 670 W. Se espera seguir avanzando en la tecnología en los próximos años para aumentar la potencia y eficiencia de cada panel, lo que reducirá la necesidad de paneles en los techos y, por lo tanto, los costos. Esto permitirá que más personas accedan a esta tecnología, [12].

2.2 Situación global actual de la generación fotovoltaica

Gracias a todas estas mejoras en los últimos años hemos podido ver un aumento del uso de la fotovoltaica alrededor de todo el mundo

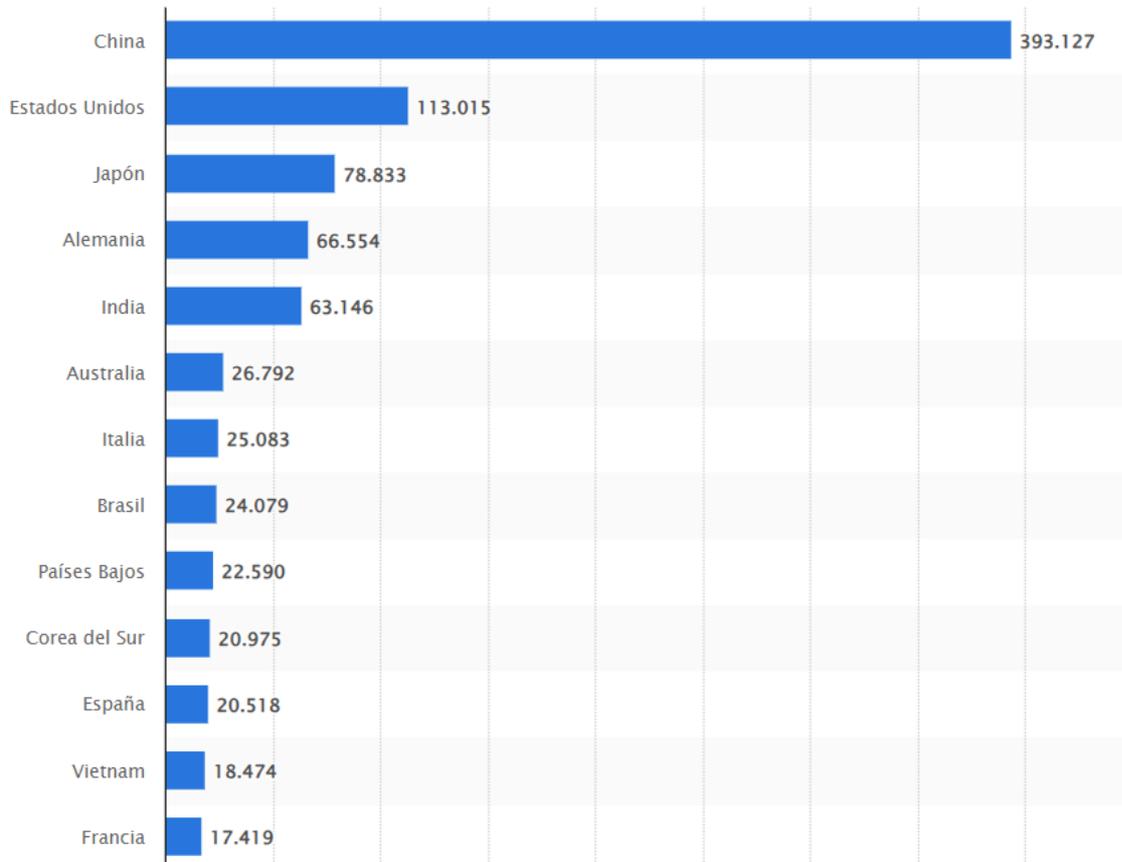


Ilustración 2-3: Ranking potencia instalada [13]

Como podemos ver en la ilustración 2-3 los países que lideran la instalación de energía fotovoltaica son China, Estados Unidos y Japón con 393.127 MW, 113.015 MW y 78.833 MW instalados, respectivamente.

Asia está realizando inversiones significativas en el ámbito de la energía solar, así como en nuevas corrientes energéticas y tecnologías emergentes. Numerosos líderes en la generación de energía mundial provienen de este continente. En particular, China destaca como el principal referente a nivel mundial en la adopción de la energía solar fotovoltaica, posición que ostenta desde 2015 cuando superó a Alemania. En un lapso de apenas dos años, entre 2016 y 2018, lograron duplicar su capacidad solar instalada acumulada. Este notable crecimiento se atribuye en parte al hecho de que China es el principal fabricante mundial de paneles solares.

Incluso algunos proveedores de energía chinos están explorando la posibilidad de establecer una estación de energía solar en órbita la cual se prevé que comience a generar energía antes de 2040.

Por otro lado, Estados Unidos tiene una extensa trayectoria en el ámbito de la energía solar, marcada por hitos como la construcción de la central térmica SEGS en 1983, que ha generado más de 17 TWh desde su inicio. Asimismo, el país cuenta con algunas de las plantas solares más grandes a nivel mundial.

En paralelo a China, Estados Unidos está experimentando un notorio crecimiento en la implementación de instalaciones solares fotovoltaicas, especialmente en el sector residencial. Numerosos estados han establecido metas ambiciosas en el ámbito de las energías renovables, y en el primer trimestre de 2019, el sector de las energías renovables en Estados Unidos generó más electricidad que las centrales de carbón del país por primera vez en la historia, [14].

2.3 Instalaciones fotovoltaicas y códigos de red

La energía solar fotovoltaica constituye una fuente de energía renovable y respetuosa con el medio ambiente que aprovecha la radiación solar para generar electricidad. Su funcionamiento se fundamenta en el fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico, mediante el cual ciertos materiales tienen la capacidad de absorber fotones (partículas lumínicas), liberando electrones y generando así una corriente eléctrica.

Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de un dispositivo denominado celda o célula fotovoltaica. Estas células pueden estar compuestas de materiales semiconductores como el silicio monocristalino, policristalino o amorfo, así como de otros materiales de capa fina. Las células de silicio monocristalino, obtenidas a partir de un único cristal de silicio puro, alcanzan la máxima eficiencia, promediando entre el 18 % y el 20 %. Por otro lado, las células de silicio policristalino se fabrican a partir de varios cristales en bloque, lo que las hace más económicas, con una eficiencia media de entre el 16 % y el 17.5 %. Por último, las células de silicio amorfo presentan una estructura cristalina desordenada, ofreciendo un rendimiento inferior (eficiencia media entre el 8 % y el 9 %), pero a su vez, tienen un costo más bajo, [7].



Ilustración 2-4: Paneles Fotovoltaicos actuales [15]

Los parques fotovoltaicos actuales como Ilustración 2-4 con conexión a red eléctrica son la aplicación de mayor expansión que tiene esta tecnología. La utilización a gran escala ha requerido un desarrollo de los niveles tecnológicos utilizados, que permita optimizar diseño y funcionamiento de todos los equipos e instalaciones, es por ello que se siguen desarrollando mejoras en componentes (paneles solares, inversores, cajas de conexión, estructura soporte, monitorización, etc.) evaluando siempre su integración en conjunto y respetando el entorno técnico y socioambiental de la instalación.

Para poder conectar una instalación fotovoltaica a la red eléctrica de distribución debe cumplir una serie de requisitos de calidad y seguridad exigidos por ley. En el caso planteado en este trabajo vamos a asumir en todo momento la ley aplicable a la Península Ibérica.

En primer lugar, se va a hablar de los requerimientos relacionados con el control potencia-frecuencia. En este campo se usará lo definido en el **Reglamento UE 2016/631**, el cual regula los periodos de tiempo mínimos durante los que un módulo de generación eléctrica (MGE) debe ser capaz de funcionar a diferentes valores de frecuencia los cuales se pueden observar en Tabla 2-1 Periodo de tiempo de funcionamiento según rango de frecuencia, desviándose del valor nominal, sin desconectarse de la red.

Zona	Rango de frecuencias	Periodo de tiempo de funcionamiento
España peninsular	47,5 Hz-48,5 Hz	30 minutos
	48,5 Hz-49,0 Hz	Ilimitado
	49,0 Hz-51,0 Hz	Ilimitado
	51,0 Hz-51,5Hz	30 minutos

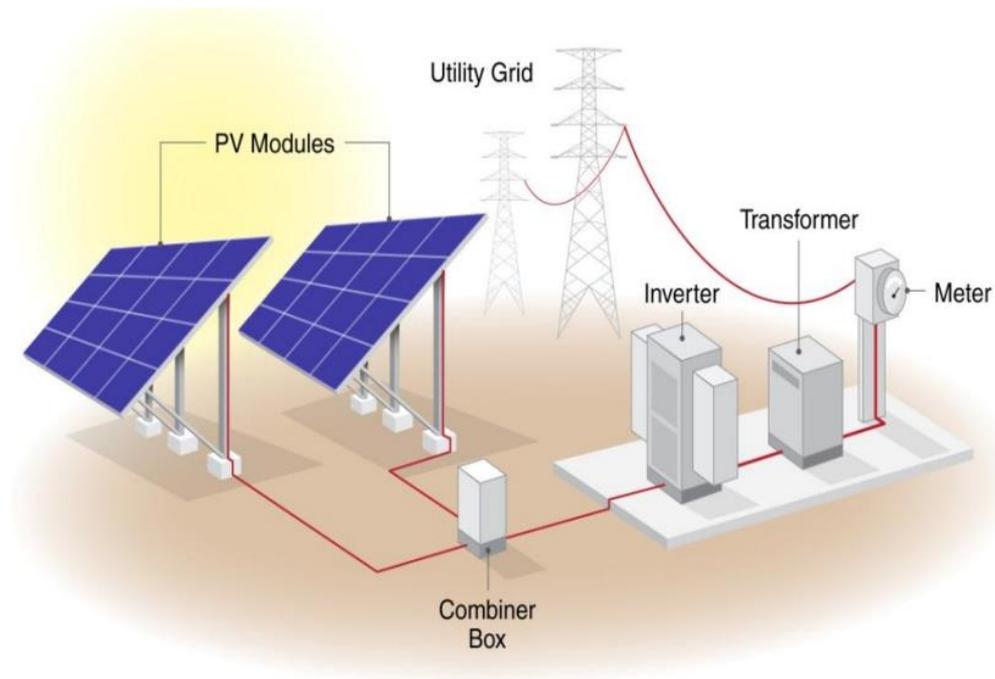
Tabla 2-1 Periodo de tiempo de funcionamiento según rango de frecuencia

Por otro lado, también se exige una capacidad y rango de control de la potencia activa con el objetivo de verificar que el módulo de parque eléctrico (MPE) es capaz de ajustar una consigna de potencia activa conforme a las instrucciones proporcionadas al propietario por el Gestor de red pertinente (GRP). Los realizarán entidades acreditadas, conforme al **subapartado 8.4.2** de la norma **IEC 61400-21-1**. El informe del ensayo será evaluado por el certificador autorizado.

Otra de las mediciones a tener en cuenta es la **emulación de inercia**, el objetivo de esta prueba es verificar que el MPE es capaz de emular inercia durante variaciones de frecuencia muy rápidas. Será una capacidad voluntaria por parte del MPE, mientras esta capacidad no este regulada. La evaluación de este requisito técnico será realizada por el GRT a través de simulaciones. Para poder simular inercia aportada desde un sistema estático como es una instalación fotovoltaica na de técnicas más utilizadas es la denominada como convertidores sincrónicos (CS) que busca replicar la operación de un generador sincrónico (GS) utilizando convertidores CC/CA. De hecho, un SV permite que los sistemas eléctricos de potencia controlen las plantas de energía renovable conectadas a la red y evita la pérdida de estabilidad de voltaje y frecuencia durante su operación.

También se debe tener en cuenta la capacidad de potencia reactiva a la capacidad máxima y por debajo de la capacidad máxima con el objetivo de verificar que el módulo de generación eléctrica (MGE) es capaz de suministrar la potencia reactiva requerida a la capacidad máxima del MGE y por debajo de la capacidad máxima del MGE conforme a lo indicado en el reglamento. En este apartado hay diferentes apartados a cumplir por parte de la instalación:

- Los módulos de generación de electricidad (MGE) síncronos deberán compensar toda la energía reactiva, ya sea generada o absorbida, desde su instalación hasta el punto de conexión.
- La capacidad de potencia reactiva de los MGE síncronos a su **capacidad máxima (Pmax)**, será tal que, dentro del rango de tensión $0,95 \leq V \leq 1,05$ pu estos deberán disponer de la capacidad técnica para generar y absorber potencia reactiva (Q) dentro de un rango mínimo obligatorio
- La aportación de potencia reactiva estará disponible tanto en régimen permanente como perturbado



Source: NREL

Ilustración 2-5: Conexión de la instalación fotovoltaica [16]

En la Ilustración 2-5 observamos la forma de conexión de una instalación fotovoltaica a la red de distribución, en la cual intervienen elementos como el inversor para pasar de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA) y el transformador para elevar la tensión a la tensión del punto de red al que se va a conectar la instalación.

3 GENERACIÓN EÓLICA

En este capítulo se habla sobre cómo ha evolucionado a través de la historia y todas las funciones que ha cumplido la generación de energía eólica en la vida del ser humano. Por otro lado, al igual que en el capítulo anterior se discutirá sobre la situación actual de la generación eólica y los códigos de red a cumplir para poder conectarlos a la red eléctrica.

3.1 Evolución histórica de la generación eólica

La energía eólica se obtiene aprovechando la velocidad del viento para generar electricidad. Este proceso implica el movimiento de las palas de una estructura, cuando el viento las impulsa. Esta acción, a su vez, activa un generador que convierte la energía cinética del viento en electricidad. La energía eólica es una fuente renovable y limpia, desempeñando un papel crucial en los esfuerzos por disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, gracias a su abundancia y sostenibilidad.

El avance más importante en la historia de la energía eólica; la invención del molino de viento de eje vertical. Se cree que los primeros molinos de viento se originaron en Persia alrededor del siglo VII. Estos primeros dispositivos eran muy diferentes de los que conocemos hoy, pero su objetivo era el mismo: convertir la energía del viento en una forma útil de energía.

La llegada y difusión de la electricidad en el siglo XIX marcaron un hito significativo en la evolución de la energía eólica. En la década de 1880, el inventor escocés James Blyth construyó el primer molino de viento registrado con el propósito de generar electricidad. Aunque esta primera turbina eólica era primitiva como se puede observar en comparación con las actuales, su existencia demostró la viabilidad de utilizar la energía eólica para la producción de electricidad, abriendo así un horizonte de posibilidades para el futuro.

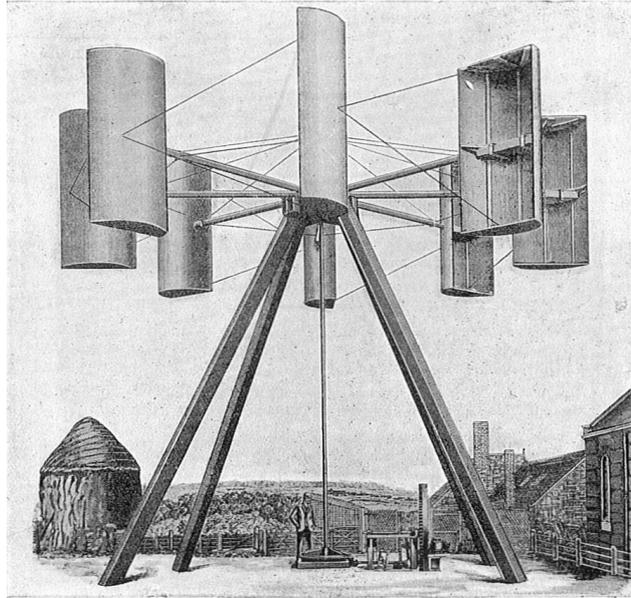


Ilustración 3-1: Primer molino diseñado para generar electricidad

En el siglo XX, la energía eólica experimentó rápidos avances tecnológicos y un creciente reconocimiento de la importancia de las energías renovables. Este período presenció el desarrollo de las primeras turbinas eólicas para la generación de electricidad a gran escala. En 1941, el ingeniero Palmer Putnam construyó en Vermont, Estados Unidos, una turbina eólica pionera que logró generar 1.25 MW de potencia eléctrica, marcando un hito sin precedentes en ese momento. Estos eventos contribuyeron a dar forma y relevancia a la energía eólica en nuestro mundo.

El auge real de la energía eólica tuvo lugar en la década de 1970 como respuesta a la crisis del petróleo. En medio de la escasez de combustibles fósiles y los altos precios, los gobiernos y los científicos buscaron alternativas energéticas sostenibles. La energía eólica emergió como una solución atractiva y viable.

Durante este periodo, se realizaron considerables inversiones en investigación y desarrollo enfocadas en la energía eólica. Se establecieron parques eólicos, se perfeccionaron las turbinas y se idearon nuevas tecnologías para incrementar la eficiencia y accesibilidad de la energía eólica.

En el siglo XXI, la energía eólica ha experimentado avances notables que la han convertido en un pilar fundamental en la lucha global contra el cambio climático y la promoción de la sostenibilidad. Las turbinas eólicas contemporáneas son auténticas maravillas de la ingeniería, siendo más grandes, eficientes y sofisticadas que nunca, alcanzando alturas por encima de los 200 metros, con palas de una longitud superior a 100 metros. Estas estructuras capturan la energía eólica con una eficiencia sin precedentes, convirtiendo una proporción significativamente mayor del viento en electricidad, [17].

Además, las turbinas eólicas modernas incorporan tecnología de vanguardia que permite un control más preciso y una integración más efectiva con la red eléctrica. Mediante sistemas avanzados de monitorización, se recopilan datos sobre la velocidad y dirección del viento, así como la producción de energía, permitiendo ajustes en tiempo real para maximizar la eficiencia.

Existen diferentes tipos de generadores eólicos según la orientación de sus palas y ejes, estos son algunos ejemplos:

- **Aerogeneradores de palas y eje horizontal.** Son los más comunes que podemos ver en la mayoría de los parques eólicos españoles. El eje de giro es paralelo al suelo, y tienen una gran altura de buje y un mecanismo de rotor que orienta el aerogenerador para seguir los cambios de las direcciones del viento.

Los modelos comunes de aerogeneradores de eje horizontal adoptan tres palas y son la solución más eficiente.



Ilustración 3-2: Aerogenerador de eje horizontal

- **Aerogeneradores con palas y eje vertical.** El eje de rotación es perpendicular al suelo. Los bordes no tienen que estar orientados hacia el viento y no necesitan una gran altura para aprovechar su potencia.

Hay cuatro tipos:

- **Savonius:** pueden tener diferentes formas de pala y ejes de transmisión diferenciales.

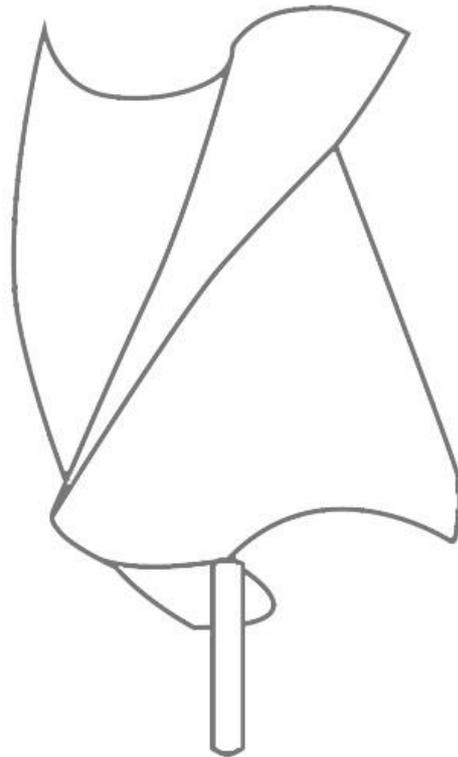


Ilustración 3-3:Aerogenerador de eje vertical Savonius

- **Darrieus:** sus palas son curvas y giran sobre su eje.

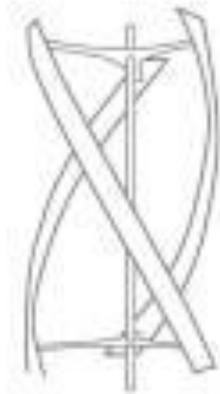


Ilustración 3-4:Aerogenerador Darrieus

- **Turbina mixta:** mezcla los dos modelos anteriores.
- **Giromill:** tienen palas verticales unidas al eje por brazos horizontales.

En este trabajo se va a considerar un aerogenerador de eje horizontal y 3 palas, ya que como se ha explicado anteriormente es el más común en el sistema español. Más adelante se especificará que modelo y que condiciones reunirá la turbina utilizada, [18].

3.2 Situación global de la generación eólica

En los últimos años se ha experimentado, al igual que con la generación fotovoltaica, un gran aumento en la instalación de aerogeneradores en todo el mundo.

La capacidad global de generación eólica experimentó un aumento en 2021, alcanzando los 780,3 GW, según informes del Global Wind Energy Council (GWEC). Los cinco principales mercados a nivel mundial (China, EE. UU., Alemania, India y España) contribuyeron con el 71 % de las instalaciones globales realizadas durante ese año. Además, el 77.6 % de la capacidad eólica nueva instalada y conectada en el mundo en 2022 provino de estos mercados líderes, [19].

Ranking de países por potencia terrestre acumulada

Fuente: GWEC

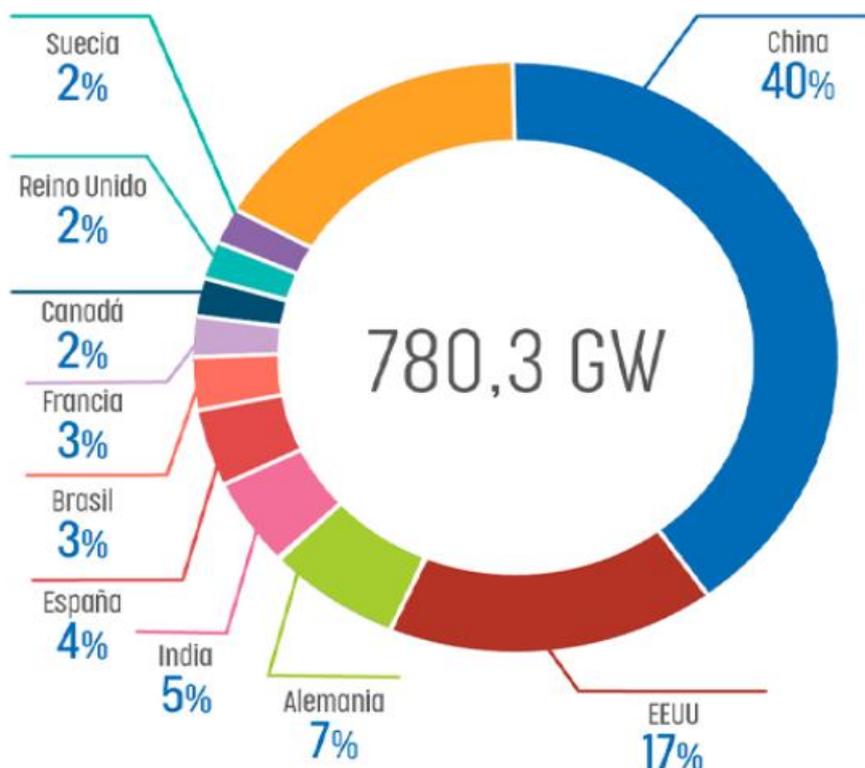


Ilustración 3-5: Ranking países de potencia terrestre [20]

Si nos centramos en datos sobre España, podemos observar una clara evolución tanto en generación como en instalación en los últimos años.

Con una capacidad acumulada de 28.139 MW, la energía eólica lideró la generación eléctrica en España en 2021, cubriendo más del 23% de la demanda. Se anticipa que los resultados de 2022 seguirán una tendencia similar, consolidando a la energía eólica como la principal fuente de electricidad en el país. Los más de 21.500 aerogeneradores instalados generaron 60.485 GWh de energía eólica en 2021, un aumento del 10% con respecto a 2020.

A lo largo de 2021, se añadieron 842,61 MW de capacidad eólica, una cifra notable pero significativamente inferior a los 2,2 GW anuales que serían necesarios instalar hasta 2030 para alcanzar los objetivos establecidos en el PNIEC. Este plan tiene como meta reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 23% con respecto a 1990, lo que implica un aumento en la capacidad de energías renovables, incluyendo duplicar la potencia eólica, [21].

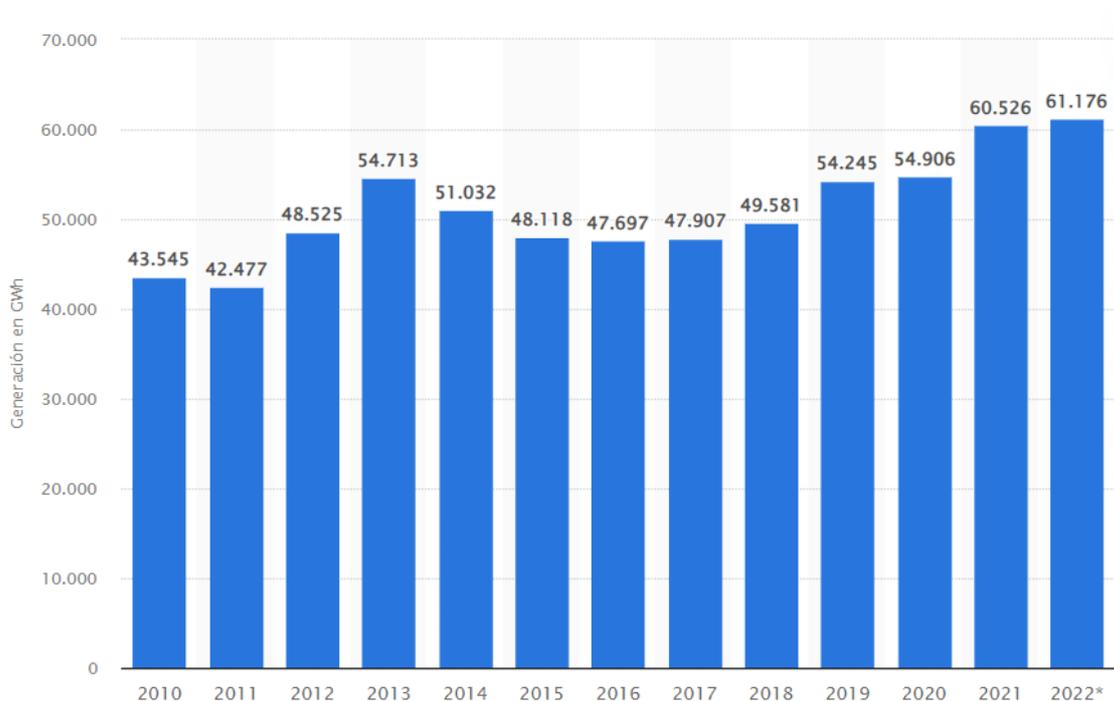


Ilustración 3-6: Generación en España [22]

3.3 Instalaciones Eólicas y Códigos de Red

Las instalaciones eólicas, como hemos podido comprobar, suponen una parte importante en la generación eléctrica mundial y española.

En el modelo de aerogenerador utilizado, se pueden observar cuatro partes principales que lo componen:

- **Las palas**, que capturan la energía del viento y la convierten en energía mecánica.
- **El rotor**, donde se produce la transmisión del movimiento.
- **La multiplicadora** es la componente encargada de gestionar los cambios de velocidad de la máquina.
- **El generador** desempeña la función de convertir la energía mecánica en electricidad, [13].

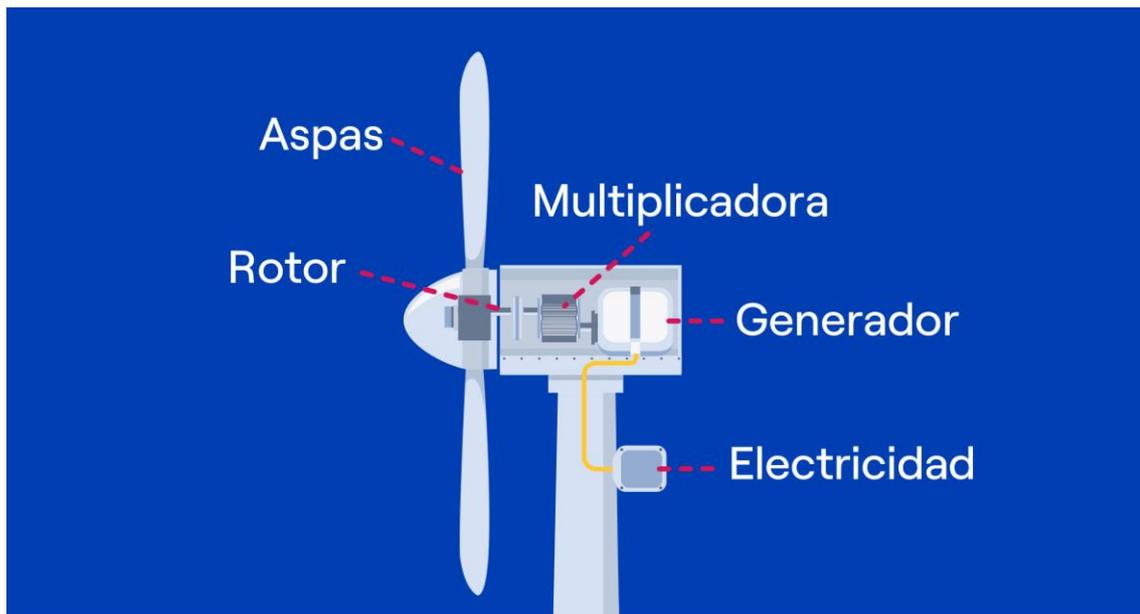


Ilustración 3-7:Partes de un aerogenerador

Como en el caso de la fotovoltaica, el uso mayoritario de estos aerogeneradores es para la creación de instalaciones conectadas a red, como la realizada en este trabajo. Al igual que en el caso de la fotovoltaica, para poder realizar esta conexión a red, se deben cumplir unos requisitos, los códigos de red, [23].

El Reglamento (UE) 2016/631 de la Comisión Europea establece un código de red sobre los requisitos de conexión de generadores a la red. Algunos de los puntos más relevantes relacionados con la conexión a red de instalaciones eólicas incluyen:

- **Requisitos de conexión:** Define los requisitos técnicos y operativos para la conexión de generadores a la red eléctrica, asegurando una operación segura, eficiente y coordinada del sistema.
- **Procedimientos de conexión:** Establece procedimientos claros y transparentes para la conexión de generadores, incluidas las instalaciones eólicas, a la red eléctrica.
- **Requisitos técnicos:** Especifica los criterios y estándares técnicos que deben cumplirse para garantizar la estabilidad y la calidad del suministro eléctrico durante la conexión y la operación de las instalaciones eólicas.
- **Gestión de congestiones:** Contempla medidas para abordar situaciones de congestión en la red y garantizar una gestión eficaz del flujo de energía, especialmente en áreas con alta penetración de generación eólica.
- **Coordinación con otros generadores y operadores de red:** Establece disposiciones para la coordinación entre los generadores y los operadores de red con el fin de garantizar la seguridad y eficiencia del sistema eléctrico.
- **Garantía de calidad de energía:** Incluye disposiciones para garantizar la calidad de la energía generada, evitando impactos negativos en la red y en otros usuarios.
- **Protección y seguridad:** Establece medidas de protección y seguridad para prevenir y abordar situaciones anómalas o de emergencia, asegurando la integridad del sistema eléctrico.

- **Información y comunicación:** Define los requisitos de información y comunicación entre los generadores eólicos y los operadores de red, facilitando la coordinación y el intercambio de datos relevantes.
- **Tarifas y costos de conexión:** Puede abordar aspectos relacionados con las tarifas y costos asociados a la conexión a la red eléctrica, asegurando una asignación justa y transparente de los costos, [24].

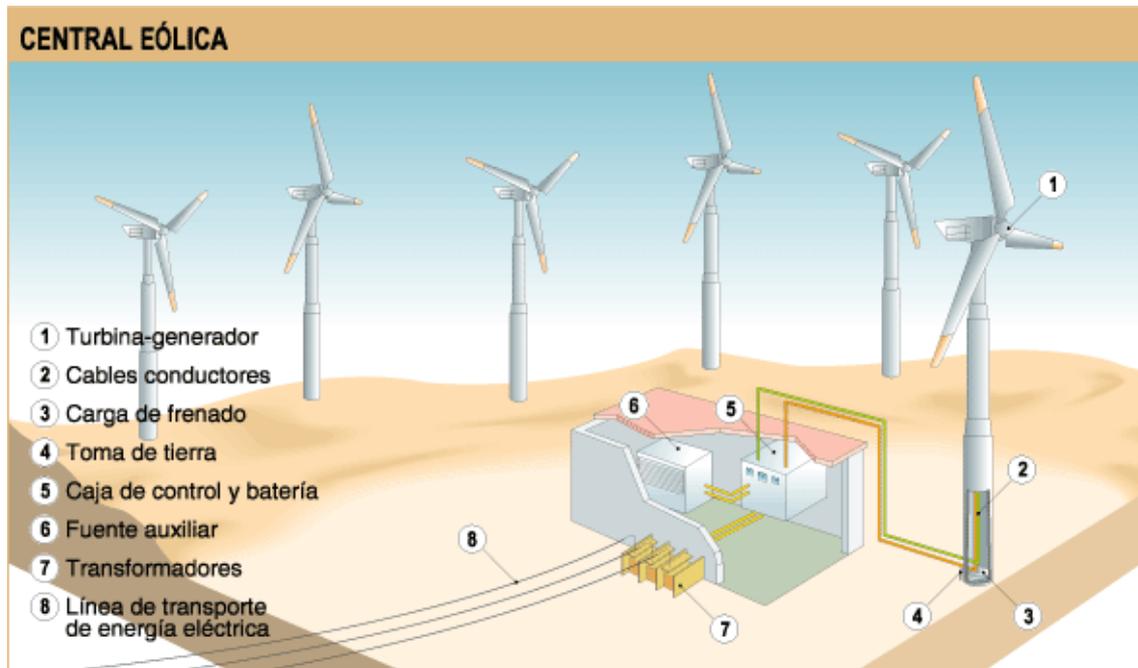


Ilustración 3-8: Instalación eólica conectada a red [25]

4 ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA INSTALACIÓN

En esta sección se realizará un análisis sobre donde resulta más conveniente la instalación de una planta que combine tanto la generación eólica como la fotovoltaica, como es en el caso de este trabajo. El análisis se realizará sobre el territorio Peninsular ya que a lo largo de este trabajo se ha analizado el código de Red del Sistema Eléctrico Español y por tanto será el lugar donde se encuentre la instalación.

4.1 Análisis de ubicación óptima de una planta fotovoltaica

En este apartado analizaremos las condiciones climatológicas que se dan en la Península Ibérica relacionadas con la generación fotovoltaica tales como horas de sol, irradiancia

En primer lugar, vamos a realizar un análisis sobre la radiación solar en España:

Para comenzar, se debe explicar qué es la radiación solar y cómo influye en la generación fotovoltaica.

La radiación solar es la energía que emite el Sol en el espacio interplanetario. La radiación solar que llega a la Tierra se cuantifica mediante la irradiancia solar, que es la energía recibida por unidad de superficie. Su unidad de medida es W/m^2 , [15].

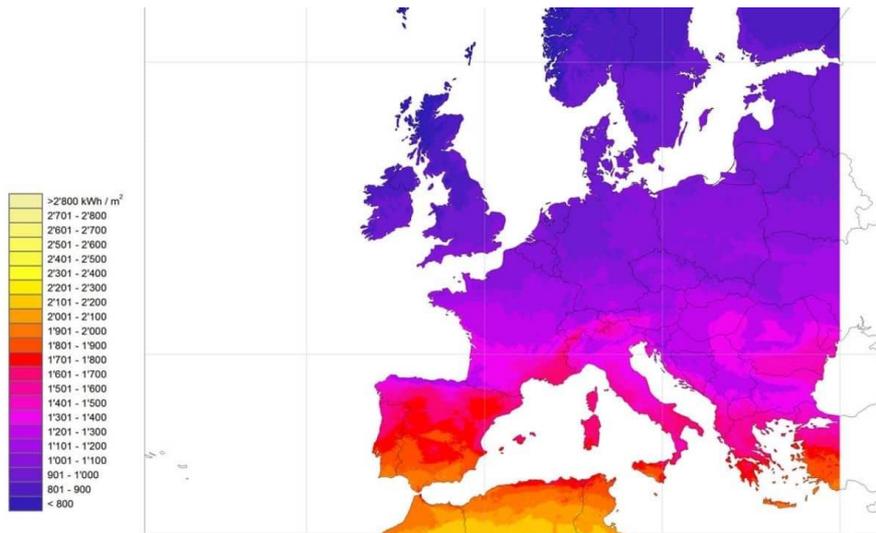


Ilustración 4-1: Distribución radiación en Europa [26]

En la Ilustración 4-1 se puede observar una distribución de cómo se reparte la radiación solar en el territorio europeo. Como muestra la imagen, España se establece como el país europeo con más radiación por metro cuadrado, esto hace que podamos reafirmarnos en la decisión de realizar la instalación en España.

A continuación, detallaremos cómo se distribuye la radiación por provincias dentro del territorio Peninsular para poder hacer un análisis más específico.

Extrayendo los datos de Unión Europea a través de EU Science Hub, se puede dividir el mapa español en 5 zonas, según la radiación promedio que reciben.

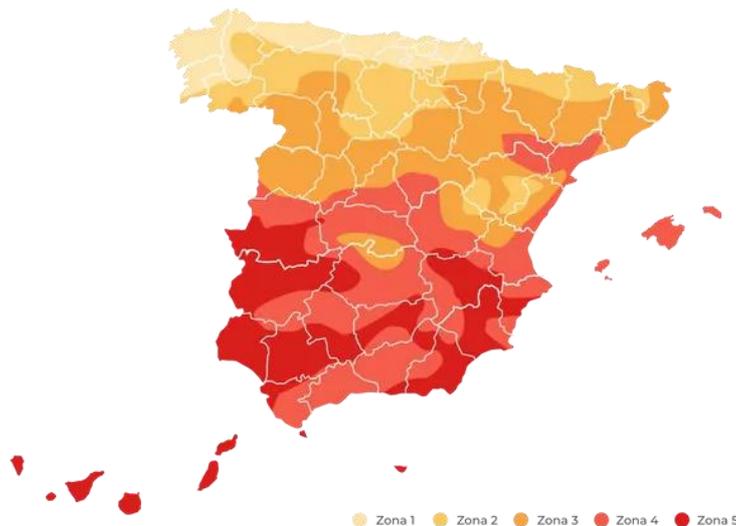


Ilustración 4-2: División mapa de España por radiación

Como se muestra en Ilustración 4-2 el sur de la Península es una zona mayoritariamente perteneciente a la zona 5 por lo que el análisis se centrará en esa zona, concretamente se analizará Andalucía,

Extremadura y Murcia.

A continuación, vamos a analizar las horas de sol que reciben estas tres comunidades autónomas

Andalucía:

PROVINCIA	HORAS DE SOL	HSP
Almería	3.305	6,02
Cádiz	3.316	6
Córdoba	3.316	5,9
Granada	3.328	5,93
Huelva	3.527	6,02
Jaén	3.289	5,82
Málaga	3.248	5,82
Sevilla	3.526	5,98

Tabla 4-1: Horas de sol anuales en Andalucía

Murcia:

PROVINCIA	HORAS DE SOL	HSP
Murcia	3.348	5,7

Tabla 4-2: Horas de sol anuales en Murcia

Extremadura:

PROVINCIA	HORAS DE SOL	HSP
Badajoz	3.224	5,74
Cáceres	3365	5,7

Tabla 4-3: Horas de sol anuales en Extremadura

Siendo HSP las horas solar pico, definida como la densidad superficial de energía solar Una hora de sol pico equivale a 1000Wh/m². [27]

4.2 Análisis de ubicación óptima de una planta eólica

En este caso se va a realizar un análisis parecido al del apartado anterior, pero en este caso se va a analizar el recurso eólico. Como en el caso de la fotovoltaica, nos vamos a centrar en el territorio peninsular español y se va a tener en cuenta valores como la velocidad del viento y la densidad de

potencia del viento. Una gran diferencia del recurso eólico con respecto al recurso solar es que influye en gran medida la altitud ya que el viento cambia en diferentes altitudes, por lo tanto, se realizará un análisis para diferentes altitudes posibles, concretamente se va a usar 30 m, 60 m y 80 m.

En primer lugar, se va a realizar un análisis de la velocidad del viento.

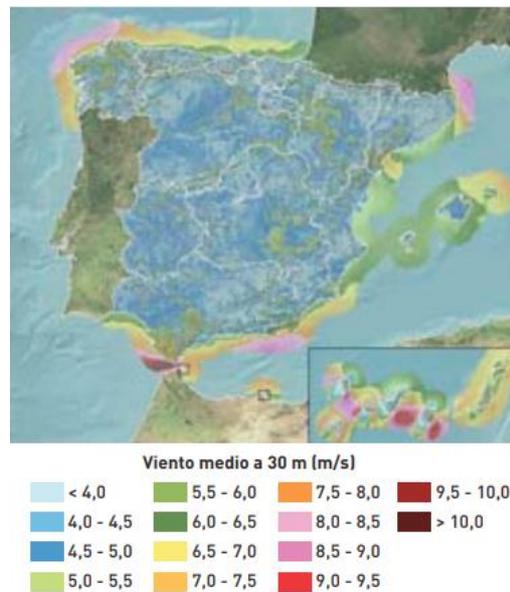


Ilustración 4-3: Viento medio a 30 m de altitud

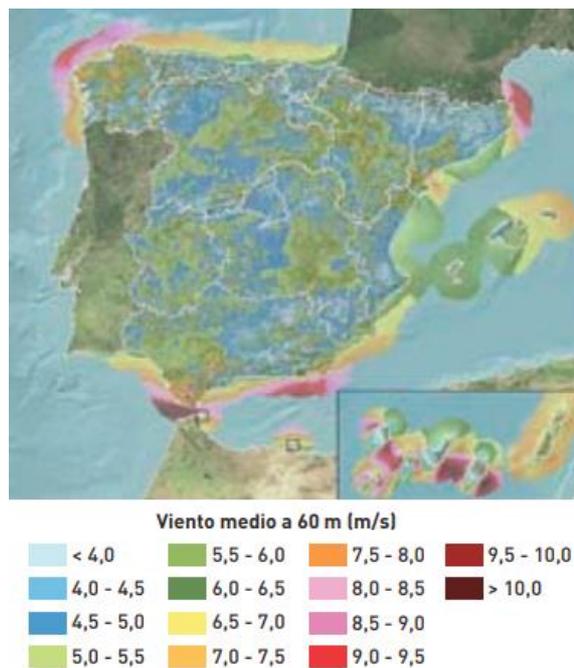


Ilustración 4-4: Viento medio a 60 m de altitud

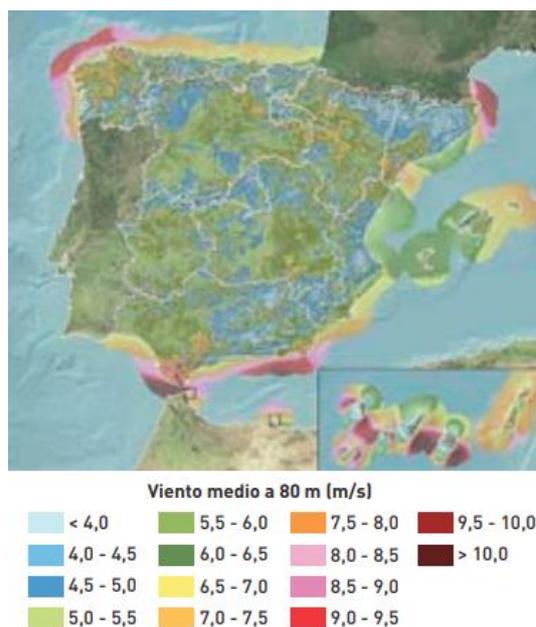


Ilustración 4-5: Viento medio a 80 m de altitud

Como se puede observar en la Ilustración 4-3, Ilustración 4-4 e Ilustración 4-5, si se centra el análisis en las 3 comunidades autónomas elegidas en el apartado anterior, Extremadura se podría decir que es la peor opción ya que las velocidades de viento que atraviesan esta comunidad son relativamente bajas en comparación con Andalucía y Murcia, que como se ve, tienen altas velocidades de viento sobre todo en las zonas más cercanas a la costa.

A continuación, se va a realizar el análisis de la densidad de potencia eólica. Este parámetro es el encargado de medir la cantidad de potencia por metro cuadrado que es capaz de aportar el viento, en este caso, el nivel mínimo recomendado para la rentabilidad de los proyectos eólicos con la tecnología disponible podría situarse en unos 250 W/m^2 , para los emplazamientos en tierra.

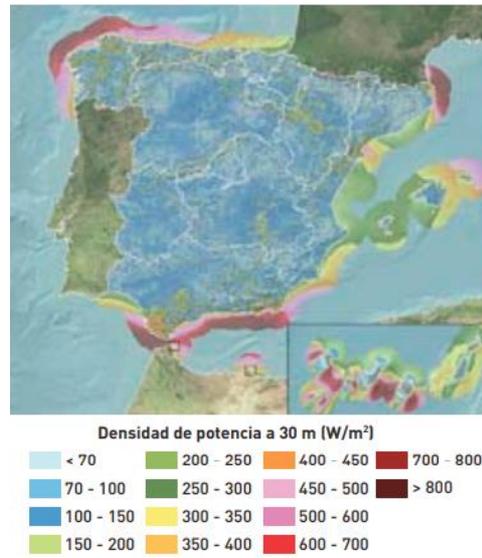


Ilustración 4-6: Densidad de potencia del viento a 30 m de altitud

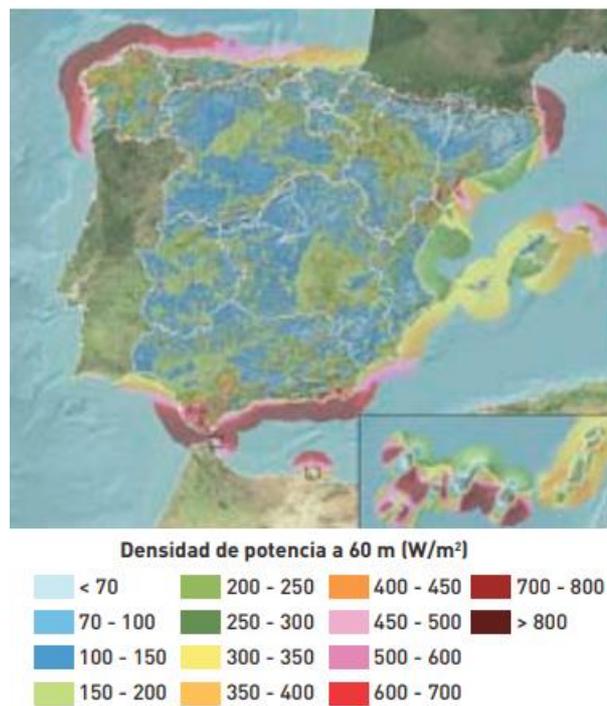


Ilustración 4-7: Densidad de potencia del viento a 60 m de altitud

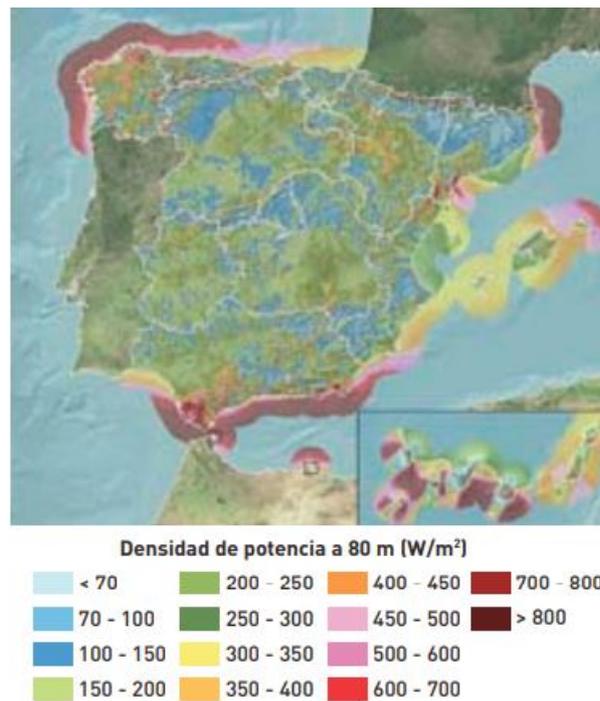


Ilustración 4-8: Densidad de potencia del viento a 80 m de altitud

En este caso, y observando la Ilustración 4-6, Ilustración 4-7 e Ilustración 4-8, se observa que se repiten las mismas zonas como posibles ubicaciones óptimas ya que la densidad de potencia se vuelve a repartir por las zonas costeras de Andalucía y Murcia. [17]

4.3 Conclusión de ubicación óptima

En los anteriores apartados se ha realizado un análisis en el que se ha podido ver las posibles ubicaciones óptimas de generación eólica y fotovoltaica, llegando a la conclusión de que las ubicaciones óptimas para una instalación híbrida deben encontrarse en Andalucía y Murcia.

Si se analizan los datos detenidamente, se puede observar que tanto Almería como Cádiz tienen mayores horas de luz solar que Murcia y entre ambas, y el recurso eólico es bastante similar, por lo tanto, la ubicación seleccionada será Cádiz, concretamente la instalación se llevará a cabo en Arcos de la Frontera, ya que es una zona con mucho territorio disponible para una instalación de este calibre y de fácil acceso para la realización de la misma.



Ilustración 4-9: Ubicación de la instalación



Ilustración 4-10: Ubicación de la instalación



Ilustración 4-11: Ubicación de la instalación

En Ilustración 4-9, Ilustración 4-10 y la Ilustración 4-11 se observa la instalación de la ubicación de la instalación de manera detallada.

5 ANÁLISIS DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

En esta sección se va a mostrar el análisis y el diseño de la instalación fotovoltaica realizada usando dos *softwares* especializados en la energía solar fotovoltaica como son PVcase y PVsyst.

5.1 Diseño de la instalación en PVCas

Durante esta parte del diseño es en la que se establece como se van a organizar la instalación en el espacio. La instalación está diseñada con módulos de 695 Wp bifaciales para aprovechar al máximo el rendimiento de la instalación. Están colocados en mesas tipo seguidor Este-Oeste monofilas y hay dos tipos de mesas, 1V30 y 1V60.



Ilustración 5-1: Distribución instalación fotovoltaica

La instalación está formada por 23 *trackers* 1v30 y 104 *trackers* 1v60, lo que da un total de 6930 módulos de 695 Wp, quedando así una potencia final de 4.816,350 kWp.

Como se muestra en la Ilustración 5-1 se ha diseñado también las zanjas y el cableado subterráneo de la instalación en el que se han usado cable solar de 6 mm y 10 mm de sección teniendo en cuenta el criterio de caída de tensión máxima de 1,5%, los módulos están agrupados en *string* de 30 módulos por una mayor eficiencia del *tracker* y del espacio disponible y los inversores tienen una potencia de 330 kWp, por lo que para la instalación se han necesitado 14 inversores. Estos inversores se encuentran bajo los *trackers* y van conectados al CT que se observa en la parte inferior de la Ilustración 5-1 mediante ternas de cables de aluminio de 300 mm². Este CT está formado por tres transformadores de 1500 kVA en seco.

5.2 Informe extraído de PVSyst

En el *software* PVSyst se ha realizado el diseño de la instalación para poder obtener los valores detallados de generación y producción anual.

Como valores destacables de este estudio, se ha obtenido una generación anual de 10135749 kWh/año, un *performance ratio*, valor el cual mide el rendimiento aportado por la instalación, con un valor de 87,61 % y una producción específica de 2104 kWh/kWp/año.

5.3 Cálculo de cableado

En esta sección se harán los cálculos demostrativos de las secciones necesarias para el cableado de la instalación según los tres criterios exigidos por la norma:

- Cálculo según caída de tensión
- Cálculo según criterio de intensidad máxima admisible
- Cálculo según criterio térmico

5.3.1 Cálculo de cableado de *string*

Para el cableado de *string* usaremos la configuración denominada “salto de rana”, que permite que ambos polos del *string* acaben en el mismo extremo, para así facilitar el menor y más directo de los recorridos hasta el inversor. Los módulos se conectarán entre ellos por la parte inferior de estos, fijándolos a la estructura mediante bridas, una vez esté conectado el *string* estos cables irán enterrados bajo tubo a una distancia de 0,7 m de profundidad hasta llegar al inversor correspondiente. Para realizar los cálculos necesarios para estos cables vamos a suponer una temperatura de 20 °C, una resistividad térmica del terreno de 2,5 K·m²/W.

5.3.1.1 Criterio de caída de tensión

Para aplicar este criterio se van a realizar diferentes cálculos teniendo en cuenta las longitudes de los cables, para así poder saber que secciones son las necesarias en nuestro cableado.

El criterio que vamos a aplicar es el exigido por la Ley, el cuál limita la caída de tensión al 1,5%, y usaremos la siguiente expresión:

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta U}$$

En la que:

- L: longitud del cable, en metros.
- I: Valor de la intensidad de corriente del *string*, en amperios.
- Y: conductividad del conductor a 25 °C. m/(Ω·mm²)
- ΔU: caída de tensión, en voltios.

Aplicando este criterio y realizando los cálculos correspondientes:

Para cables de longitud inferior a 70 m:

$$S = \frac{2 \cdot 70 \cdot 17,25}{34 \cdot 0,015 \cdot 40,3 \cdot 30} = 3,916 \text{ mm}^2$$

Por lo que la sección elegida es de 4 mm²

Para cables de longitud inferior a 110 m, la mayor longitud existente en la instalación, se tienen los siguientes resultados:

$$S = \frac{2 \cdot 100 \cdot 17,25}{34 \cdot 0,015 \cdot 40,3 \cdot 30} = 5,5952 \text{ mm}^2$$

Por lo que para los cables de esta longitud la sección será de 6 mm²

5.3.1.2 Criterio de corriente máxima admisible

El segundo de los criterios de cálculo que va a ser utilizado es el de corriente máxima admisible, en el que se calculará la corriente máxima admisible que debe soportar el cableado en el punto más desfavorable, que será en el punto final del *string*.

Teniendo en cuenta el panel elegido, sabemos los datos necesarios para poder calcular este dato, ya que la potencia pico del módulo es de 695 Wp y la tensión máxima en continua es de 40,3 V, por lo tanto, se puede calcular la corriente máxima admisible como:

$$I = \frac{P}{U_{dc}} = \frac{695}{40,3} = 17,245 \text{ A}$$

Teniendo en cuenta el valor obtenido y la siguiente tabla, se deduce que la sección adecuada para el cableado de *string* vuelve a ser 6mm².

Método de instalación	Número de conductores cargados y tipo de aislamiento											
	PVC3	PVC2	PVC3	PVC2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2	XLPE3	XLPE2
A1												
A2	PVC3	PVC2			XLPE3	XLPE2						
B1					PVC3	PVC2		XLPE3		XLPE2		
B2				PVC3	PVC2		XLPE3	XLPE2				
C					PVC3			PVC2	XLPE3		XLPE2	
E						PVC3			PVC2	XLPE3		XLPE2
F							PVC3		PVC2	XLPE3	XLPE2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
S (mm ²)												
Cobre												
1.5	11	11.5	13	13.5	15	16	16.5	19	20	21	24	-
2.5	15	16	17.5	18.5	21	22	23	26	26.5	29	33	-
4	20	21	23	24	27	30	31	34	36	38	45	-
6	25	27	30	32	36	37	40	44	46	49	57	-
10	34	37	40	44	50	52	54	60	65	68	76	-
16	45	49	54	59	66	70	73	81	87	91	105	-
25	59	64	70	77	84	88	95	103	110	116	123	140
35	-	77	86	96	104	110	119	127	137	144	154	174
50	-	94	103	117	125	133	145	155	167	175	188	210
70	-	-	-	149	160	171	185	199	214	224	244	269
95	-	-	-	180	194	207	224	241	259	271	296	327
120	-	-	-	208	225	240	260	280	301	314	348	380
150	-	-	-	236	260	278	299	322	343	363	404	438
185	-	-	-	268	297	317	341	368	391	415	464	500
240	-	-	-	315	350	374	401	435	468	490	552	590
Aluminio												
2.5	11.5	12	13.5	14	16	17	18	20	20	22	25	-
4	15	16	18.5	19	22	24	24	26.5	27.5	29	35	-
6	20	21	24	25	28	30	31	33	36	38	45	-
10	27	28	32	34	38	42	42	46	50	53	61	-
16	36	38	42	46	51	56	57	63	66	70	83	-
25	46	50	54	61	64	71	72	78	84	88	94	105
35	-	61	67	75	78	88	89	97	104	109	117	130
50	-	73	80	90	96	106	108	118	127	133	145	160
70	-	-	-	116	122	136	139	151	162	170	187	206
95	-	-	-	140	148	167	169	183	197	207	230	251
120	-	-	-	162	171	193	196.5	213	228	239	269	293
150	-	-	-	187	197	223	227	246	264	277	312	338
185	-	-	-	212	225	236	259	281	301	316	359	388
240	-	-	-	248	265	300	306	332	355	372	429	461

Ilustración 5-2: Sección según material y valor de corriente [29]

5.3.1.3 Criterio térmico

Este criterio consiste en que el aislamiento del conductor, en caso de cortocircuito, aguante las elevadas temperaturas que se alcanzan debido a la corriente que lo atraviesa.

Para ello usaremos el valor ya dado de la corriente de cortocircuito del módulo seleccionado que es 18,28 A, valor el cuál será ponderado por los diferentes factores de corrección necesarios.

Teniendo en cuenta, que el cable va directamente enterrado y que se ha tomado una temperatura del terreno de 25 °C, una resistividad térmica de 2,5 K·m²/W y una profundidad de enterramiento de 0,7 m, solo se deberá tener en cuenta el valor del factor de corrección referente al factor de agrupamiento, que en este caso y siguiendo el REBT se agruparán un máximo de 10 circuitos en un espacio no inferior a un metro, distancia la cuál será el ancho de la zanja.

Nº de circuitos agrupados	Dist. entre grupos (cm)	0	25	50	100
	20	0,34	0,63	0,68	0,82
19	0,35	0,64	0,69	0,82	
18	0,37	0,65	0,7	0,83	
17	0,38	0,65	0,7	0,83	
16	0,39	0,66	0,71	0,83	
15	0,41	0,67	0,72	0,84	
14	0,42	0,68	0,72	0,84	
13	0,44	0,68	0,73	0,85	
12	0,45	0,69	0,74	0,85	
11	0,47	0,7	0,75	0,86	
10	0,49	0,72	0,76	0,86	
9	0,52	0,73	0,77	0,87	
8	0,54	0,74	0,78	0,88	
7	0,57	0,76	0,8	0,88	
6	0,6	0,8	0,8	0,9	
5	0,65	0,8	0,85	0,9	
4	0,7	0,8	0,85	0,9	
3	0,75	0,85	0,9	0,95	
2	0,85	0,9	0,95	0,95	

Ilustración 5-3: Factor de agrupación [30]

A la vista de la Ilustración 5-3 se observa que el factor de agrupamiento correcto es 0,86, por lo que se debe recalcular la corriente:

$$I_r = \frac{18,28}{0,86} = 20,96 \text{ A}$$

Una vez obtenido este valor, se puede observar en la Ilustración 5-2 se observa que la sección adecuada vuelve a ser 6mm^2 .

5.3.2 Cálculo cableado AC de baja tensión

Una vez calculado el cableado de *string*, se debe calcular las secciones del cableado de corriente alterna, este, es el cableado que une los inversores con el cuadro general de baja tensión del CT, para el cálculo de este cableado se seguirán los mismos criterios aplicados en la sección anterior, además se supondrá un cable tripolar directamente enterrado.

5.3.2.1 Criterio de caída de tensión

Para aplicar este criterio se van a realizar diferentes cálculos teniendo en cuenta las longitudes de los cables, para así poder saber qué secciones son las necesarias en el cableado.

El criterio que vamos a aplicar es el exigido por el reglamento el cuál establece que no debe existir una caída de tensión mayor al 1,5 %. Usaremos la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta U}$$

Ecuación 1

En la que:

- L: longitud del cable. (m)
- I: Valor de la intensidad de corriente del *string*. (A)
- Y: conductividad del conductor a 25°C. m/(Ω·mm²)
- ΔU: caída de tensión (V)

Aplicando este criterio y realizando los cálculos correspondientes+:

Para cables de longitud inferior a 75 metros:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot 75 \cdot 216,6}{34 \cdot 0,015 \cdot 40,3 \cdot 30} = 67 \text{mm}^2$$

Por lo que la sección elegida es de 70 mm²

Para cables de longitud inferior a 110 metros, la mayor longitud existente en la instalación, se tienen los siguientes resultados:

$$S = \frac{2 \cdot 110 \cdot 216,6}{34 \cdot 0,015 \cdot 40,3 \cdot 30} = 98,25 \text{mm}^2$$

Por lo que para los cables de esta longitud la sección será de 120 mm²

5.3.2.2 Criterio de corriente máxima admisible

El segundo de los criterios de cálculo que va a ser utilizado es el criterio de corriente máxima admisible, en el que se calculará la corriente máxima admisible que debe soportar el cableado en el punto más desfavorable, que será en el punto final del *string*.

Teniendo en cuenta el panel elegido, sabemos los datos necesarios para poder calcular este dato, ya que la potencia pico del módulo es de 695 Wp y la tensión máxima en continua es de 40,3 V, por lo tanto, se puede calcular la corriente máxima admisible como:

$$I = \frac{P}{U_{dc}} = \frac{330000}{\text{sqrt}(3) * 800} = 238,15 \text{ A}$$

Teniendo en cuenta el valor obtenido y la siguiente tabla, se deduce que la sección adecuada es 185 mm².

SECCIÓN mm ²	3 XLPE (3 cables unipolares o 1 tripolar)		2 XLPE (2 cables unipolares o 1 bipolar)	
	Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
1,5	23	--	27	--
2,5	30	23	36	27
4	39	30	46	36
6	48	37	58	44
10	64	49	77	58
16	82	62	100	77
25	105	82	130	98
35	130	98	155	120
50	155	115	183	139
70	190	145	225	170
95	225	175	265	205
120	260	200	305	230
150	300	230	340	265
185	335	260	385	295
240	400	305	440	340
300	455	350	500	385
400	530	405	570	445
500	610	465	660	510
630	710	530	735	575

Ilustración 5-4: Secciones de cable según intensidad [31]

5.3.2.3 Criterio térmico

Este criterio consiste en que el aislamiento del conductor, en caso de cortocircuito, aguante las elevadas temperaturas que se alcanzan debido a la corriente que lo atraviesa.

Para ello usaremos el valor ya dado de la corriente de cortocircuito del módulo seleccionado que es 238,2 A, valor el cuál será ponderado por los diferentes factores de corrección necesarios.

Teniendo en cuenta, que el cable va directamente enterrado y que se ha tomado una temperatura del terreno de 25°C, una resistividad térmica de 2,5 K·m²/W y una profundidad de enterramiento de 0,7m, solo se deberá tener en cuenta el valor del factor de corrección referente al factor de agrupamiento, que en este caso y siguiendo el REBT se agruparán un máximo de 4 circuitos en un espacio no inferior a un metro, distancia la cuál será el ancho de la zanja.

Nº de circuitos agrupados	Dist. entre grupos (cm)	0	25	50	100
	20	0,34	0,63	0,68	0,82
19	0,35	0,64	0,69	0,82	
18	0,37	0,65	0,7	0,83	
17	0,38	0,65	0,7	0,83	
16	0,39	0,66	0,71	0,83	
15	0,41	0,67	0,72	0,84	
14	0,42	0,68	0,72	0,84	
13	0,44	0,68	0,73	0,85	
12	0,45	0,69	0,74	0,85	
11	0,47	0,7	0,75	0,86	
10	0,49	0,72	0,76	0,86	
9	0,52	0,73	0,77	0,87	
8	0,54	0,74	0,78	0,88	
7	0,57	0,76	0,8	0,88	
6	0,6	0,8	0,8	0,9	
5	0,65	0,8	0,85	0,9	
4	0,7	0,8	0,85	0,9	
3	0,75	0,85	0,9	0,95	
2	0,85	0,9	0,95	0,95	

Ilustración 5-5: Factores de corrección por agrupamiento

A la vista de la Ilustración 5-5 se observa que el factor de agrupamiento correcto es 0,9, por lo que se debe recalcular la corriente:

$$I_r = \frac{238,2}{0,9} = 264,6A [10]$$

Una vez obtenido este valor, se puede observar que la sección adecuada es 240 mm^2 .

5.3.3 Cálculo de puesta a tierra

Para poder cumplir el reglamento, debe existir una red de tierra para poder derivar sobrecargas eléctricas en caso de algún fallo. En primer lugar, los módulos deben ir conectados a la red de tierras, a través de una perforación en su marco que se conecta mediante un hilo metálico a la estructura que lo soporta, estructura que por obligación también va conectada a la red de tierra mediante picas de conexión directamente enterradas en la tierra. Por otro lado, los inversores también deben ir conectados a esta red de tierras, en el caso de esta instalación al encontrarse alojados bajo los *trackers*, también irán conectados a la red de tierras mediante picas de hincado. Además, en este tipo de instalaciones se debe instalar un sistema pararrayos para que en caso de tormenta eléctrica pueda evitar que un rayo dañe algún elemento de la instalación, y el pararrayos también debe estar conectado a la red de tierra para derivar esta descarga. Toda esta red de tierra irá conectada mediante cable de cobre desnudo de 50 mm^2 directamente enterrado formando así una conexión entre todos los elementos conectados a tierra.

El cálculo y distribución de las protecciones de puesta a tierra de los elementos queda fuera del alcance de este trabajo.

6 ANÁLISIS INSTALACIÓN EÓLICA

En este capítulo se va a realizar el análisis de la instalación eólica, para este análisis se han usado dos *softwares* especializados en la energía eólica como son Furow y Autocad.

6.1 Metodología

Para el análisis de la instalación eólica hemos usado en primer lugar el *software* especializado en energía eólica Furow, con el cual en primer lugar se ha modelado el perfil climatológico de la zona elegida anteriormente. Para ello, se ha descargado un archivo meteorológico con diferentes perfiles de viento según diferentes altitudes posibles en el cuál hay registros que abarcan desde el año 2010 hasta el año 2020 buscando así obtener los datos más precisos posibles.

De Furow se han podido obtener los siguientes resultados:

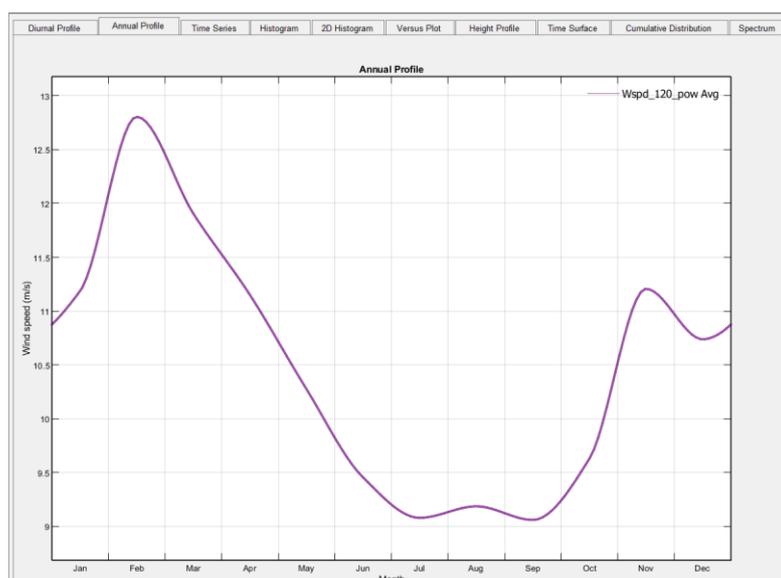


Ilustración 6-1: Velocidad del viento anual

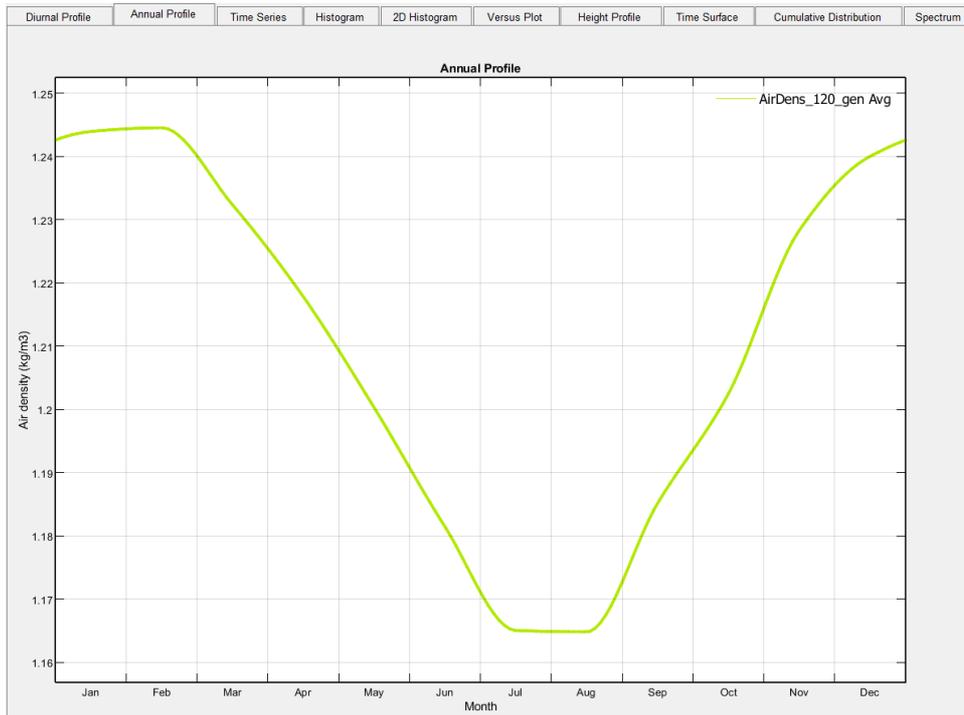


Ilustración 6-2: Gráfica de densidad de aire anual

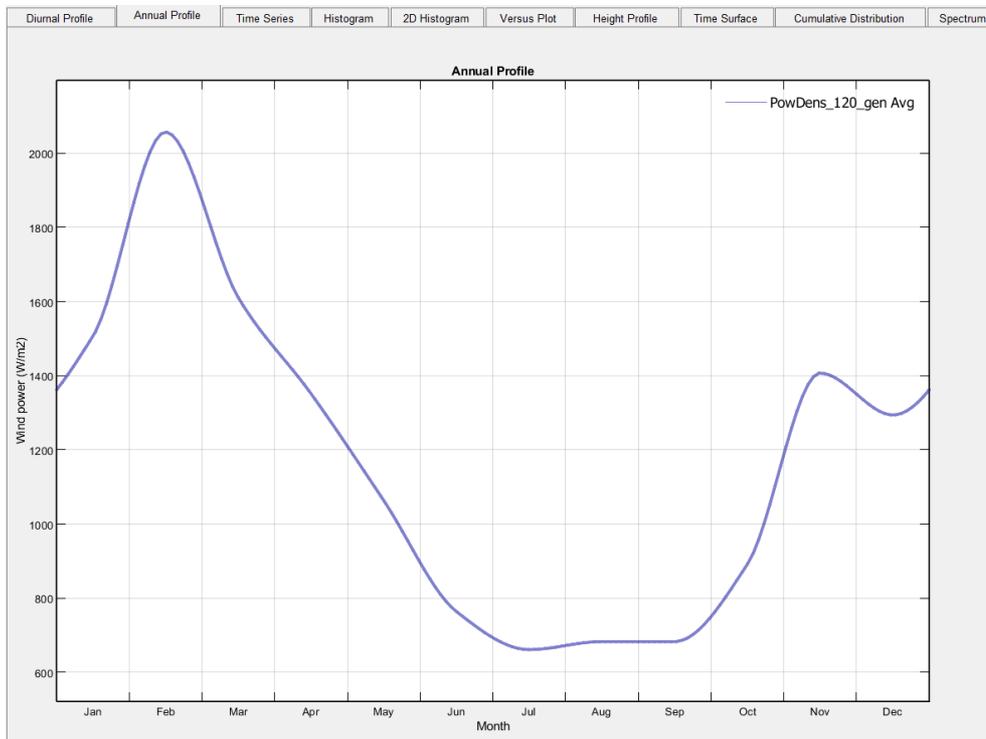


Ilustración 6-3: Potencia del aire por unidad de área

Como se puede comprobar en las ilustraciones anteriores, el perfil de viento anual en la zona elegida es muy favorable para la instalación, ya que llega a valores de potencia y densidad del aire altas,

especialmente en los meses menos veraniegos del año, alcanzando su pico de potencia y densidad en febrero.

Una vez observados estos valores, se debe elegir una turbina eólica que optimice al máximo el perfil de viento obtenido y para ello se ha buscado una turbina de 1,5 MWp y que además cumpla con los valores de velocidades óptimas, es por ello que el modelo elegido para realizar los estudios es **Acciona AW-70/1500**.



Ilustración 6-4: Modelo de turbina seleccionado [32]

Como datos principales de este modelo de turbina, se van a usar 3 en este proyecto, para el emplazamiento debemos saber que su diámetro es de 70 metros, la altura del buje es de 80 m y su velocidad nominal de funcionamiento es de 11,6 m/s.

Teniendo en cuenta todos estos datos, se ha realizado también a través del *software* Furow un análisis del comportamiento de la turbina elegida con el perfil climatológico dado.

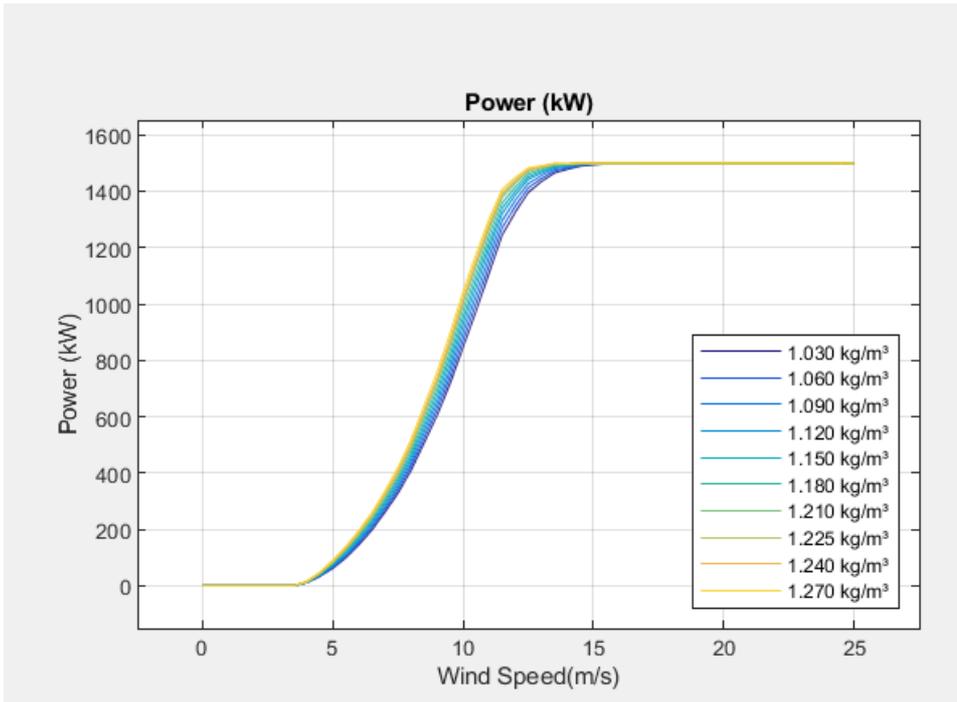


Ilustración 6-5: Curva de potencia de la turbina

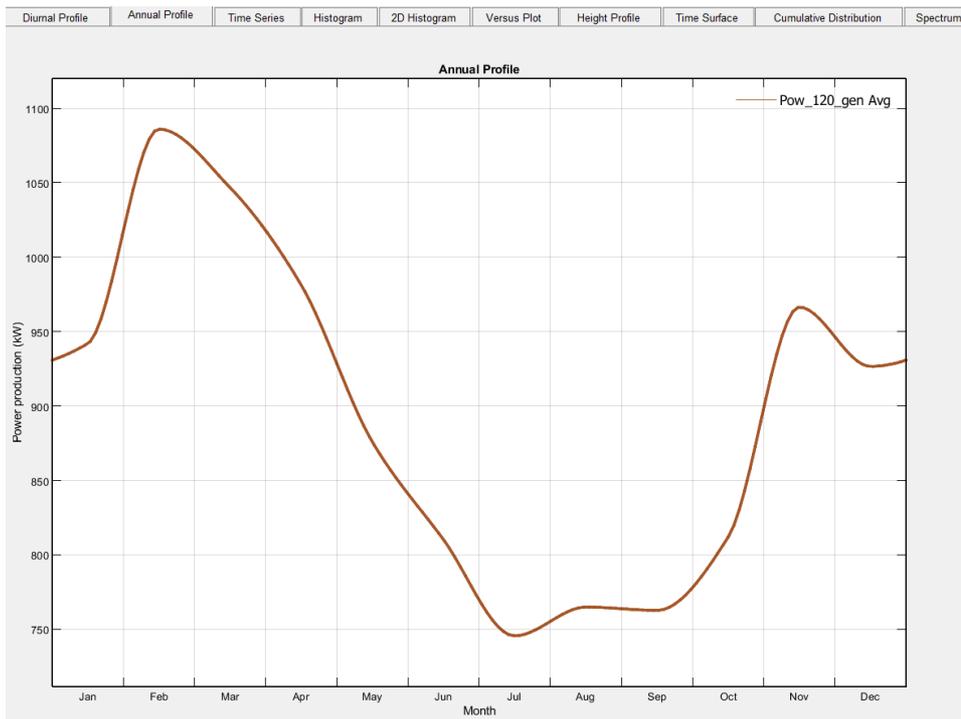


Ilustración 6-6: Producción de potencia anual

Como se puede observar, atendiendo al perfil meteorológico que nos brinda el *software*, la mayor producción de la turbina se produce en los meses invernales, y la menor producción en los meses veraniegos, suceso que compensa la generación con la instalación fotovoltaica a la que le sucede todo lo contrario.

Para el emplazamiento de las turbinas debemos tener varios factores en cuenta para que funcionen de la manera más eficiente posible y no se pierda potencia, para ello se va a usar una colocación al tresbolillo y con una separación lateral de 3 a 5 diámetros de distancia y una separación longitudinal que vaya de 5 a 9 diámetros de distancia. En este caso al tener un aerogenerador con 70 metros de diámetro la distancia lateral elegida es 250 metros y la distancia longitudinal es 450 metros, además, como se ha especificado anteriormente se colocarán al tresbolillo evitando así interferencias de unas con otras.

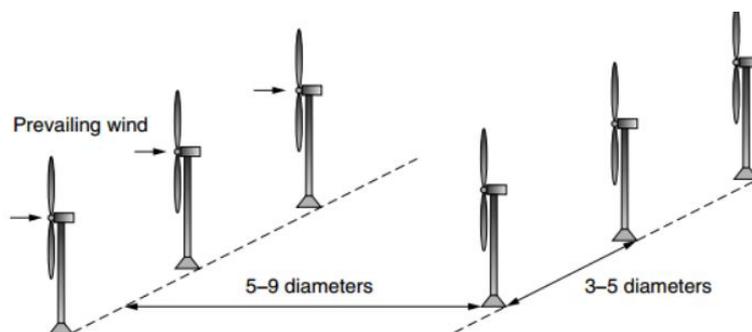


Ilustración 6-7:Distancias necesarias entre aerogeneradores

Teniendo en cuenta las especificaciones anteriores, se puede definir finalmente el layout definitivo de la instalación:

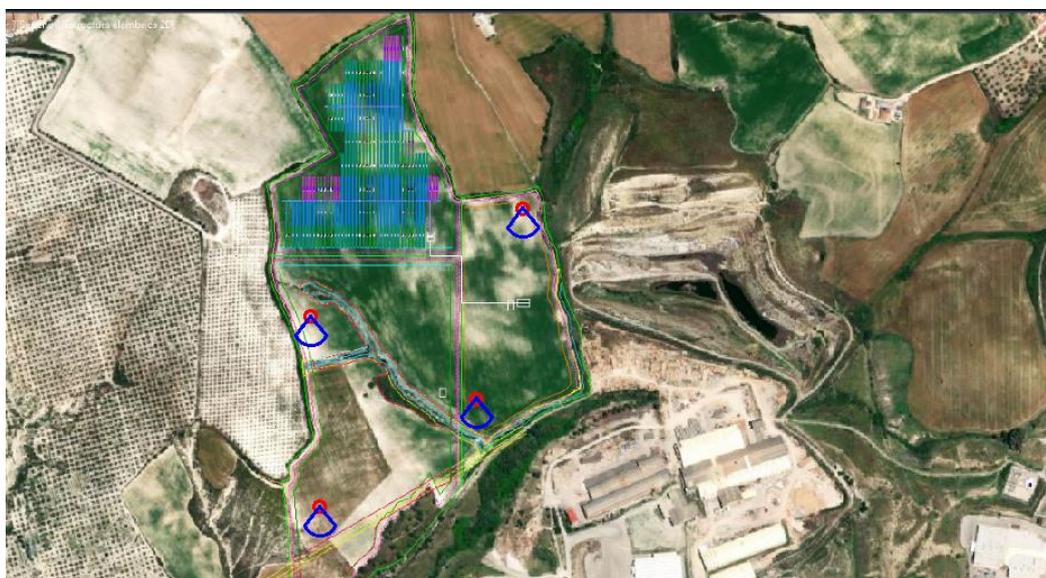


Ilustración 6-8:Layout instalación

6.2 Cálculo del cableado

En esta sección se calcularán las secciones del cableado de media tensión que conectará los aerogeneradores con el Centro de Seccionamiento de la instalación, ubicado en mitad de la parcela de la derecha, como se puede observar en el layout. Para este cableado volveremos a usar los 3 criterios anteriormente usados. El cableado irá directamente enterrado y será de aluminio con aislamiento HEPR.

6.2.1 Criterio de caída de tensión

Para aplicar este criterio se va a realizar diferentes cálculos teniendo en cuenta las longitudes de los cables, para así poder saber que secciones son las necesarias en el cableado.

El criterio que vamos a aplicar es el exigido por el reglamento el cual consiste en que no exista una caída de tensión mayor del 1,5%, y usaremos la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta U} \quad [11]$$

Ecuación 2: Cálculo de sección de cable de media tensión

En la que:

- L=longitud del cable. (m)
- I= Valor de la intensidad de corriente del *string*. (A)
- γ : conductividad del conductor a 25°C. $m/(\Omega \cdot mm^2)$
- ΔU : caída de tensión (V)

Aplicando este criterio y realizando los cálculos correspondientes:

En esta instalación el caso más desfavorable es el aerogenerador más alejado de Centro de Seccionamiento, que se encuentra a 600 metros de este, distancia la cual para estos niveles de tensión es prácticamente insignificante y no hay caída de tensión significativa por lo que no será un valor determinante.

6.3.2.2 Criterio de corriente máxima admisible

El Segundo de los criterios de cálculo que va a ser utilizado es el criterio de corriente máxima admisible, en el que se calculará la corriente máxima admisible que debe soportar el cableado al salir del aerogenerador.

Teniendo en cuenta el panel elegido, sabemos los datos necesarios para poder calcular este dato, ya que la potencia pico del aerogenerador es de 1,5 MWp y la tensión de funcionamiento 12kV, por lo tanto, se puede calcular la corriente máxima admisible como:

$$I = \frac{P}{U_{dc}} = \frac{1500000}{\sqrt{3} \cdot 12000} = 72,16 \text{ A} \quad [12]$$

Teniendo en cuenta el valor obtenido y la siguiente tabla, se deduce que la sección adecuada es 185 mm^2 .

Sección nominal mm ²	Tensión nominal					
	105 °C 1,8/3 kV a 18/30 kV					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Conductores de Cu					
10	-	-	-	-	-	-
16	120	110	105	98	102	94
25	160	145	135	125	130	120
35	195	180	160	150	155	145
50	230	215	190	180	185	170
70	295	265	235	220	225	210
95	355	320	280	260	265	250
120	410	365	320	295	305	285
150	465	415	360	330	340	315
185	535	475	405	375	385	355
240	630	555	470	440	445	420
300	725	635	530	500	-	-
400	840	-	600	565	-	-
500	975	-	680	650	-	-
630	1125	-	765	730	-	-
	Conductores de Al					
16	96	85	82	76	78	72
25	125	110	105	95	100	95
35	150	135	125	115	120	110
50	180	160	145	135	145	130
70	225	200	180	170	170	160
95	275	240	215	200	205	190
120	320	280	245	230	235	215
150	360	315	275	255	265	240
185	415	360	315	290	295	275
240	495	425	365	345	345	325
300	565	485	410	390	390	365
400	660	-	470	450	-	-
500	775	-	540	515	-	-
630	905	-	615	590	-	-

Ilustración 6-9: Secciones cable de media tensión [33]

Como se puede observar en este caso, la sección adecuada será de 16 mm²

6.3.2.3 Criterio térmico

Este criterio consiste en que el aislamiento del conductor, en caso de cortocircuito, aguante las elevadas temperaturas que se alcanzan debido a la corriente que lo atraviesa.

Para ello usaremos el valor ya dado de la corriente de cortocircuito del aerogenerador seleccionado que es 85,3 A, valor el cuál será ponderado por los diferentes factores de corrección necesarios.

Teniendo en cuenta, que el cable va directamente enterrado y que se ha tomado una temperatura del terreno de 25 °C, una resistividad térmica de 2,5 K·m²/W y una profundidad de enterramiento de 0,7 m y que cada terna de cables es independiente, no habrá ningún factor de corrección que aplicar por lo que la sección seleccionada será 25 mm² para la corriente dicha anteriormente.

7 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA INSTALACIÓN

En esta sección se va a mostrar el análisis económico de la instalación diseñada. Se hará un presupuesto básico con el coste y mediciones de equipos principales y mediciones de la instalación y se realizará un análisis con los precios actualizados de venta de energía a red con el objetivo de poder estimar la recuperación de la inversión a realizar.

7.1 Presupuesto y mediciones de equipos principales de la instalación

COSTES	UD	CANT	P.U.	SUBTOTAL
Módulos fotovoltaicos 695 Wp	UD	6930	125,70 €	871.101,00 €
Inversores Huawei 330kVA	UD	13	140.000,00 €	1.820.000,00 €
Tracker 1V30+1V60	UD	6930	85,20 €	590.436,00 €
Medida, Scada y sensores	UD	1	500.000,00 €	500.000,00 €
Cable solar 4mm2	Metros	10400	1,90 €	19.760,00 €
Cable solar 6mm2	Metros	4500	3,20 €	14.400,00 €
Cable CABT aluminio 240mm2	Metros	3053	15,20 €	46.405,60 €
Cables de puesta a tierra Cu	Metros	14500	12,00 €	174.000,00 €
Accesorios y conectores	UD	1	48.240,00 €	48.240,00 €
Turbina eólica 1,5 MWp	UD	4	550.000,00 €	2.200.000,00 €
Cableado MT 15/20kV	Metros	4200	35,20 €	147.840,00 €
Partida alzada mano de obra	UD	1	720.672,00 €	720.672,00 €
Partida alzada de obra civil	UD	1	540.504,00 €	540.504,00 €
Partida alzada de ingeniería	UD	1	600.506,00 €	600.506,00 €
Partida alzada de puesta en marcha	UD	1	420.354,20 €	420.354,20 €
			Total=	8.714.218,80 €

Tabla 7-1: Presupuesto instalación

En el presupuesto realizado solo se ha tenido en cuenta el coste de los equipos y mediciones principales de la instalación, no se tienen en cuentas partidas necesarias en este tipo de instalaciones como el coste de la ingeniería, del permitting o la obra civil necesaria para la realización de la instalación debido a que son partidas que quedan fuera del alcance de este trabajo.

A continuación, para comprobar la rentabilidad de la inversión calcularemos los 3 elementos principales a tener en cuenta al realizar una inversión, el TIR, el VAN y el payback, para ello se tendrá en cuenta como inversión inicial el valor final del presupuesto anterior 8.714.218,8€ y se contará con un precio de venta a red estimado de kWh de 0,04€ lo que supondría unas ganancias de 587.076,91€

al año.

$$\text{TIR: } VAN = -8.714.218,8 + \sum_{n=1}^{30} \frac{587.076,91}{(1+\text{TIR})^n} = 0 \quad [13]$$

Desarrollando el cálculo se obtiene que el TIR tiene un valor 5,32%, por lo que al ser TIR mayor que 0 la inversión es aceptable.

Para calcular el payback de la instalación volveremos a tener en cuenta el valor de ganancia neto de la instalación, 587.076,91€ , valor con el cuál se recuperaría la inversión realizada el 16º año, tiempo bastante adecuado teniendo en cuenta que las garantías de este tipo de instalaciones suelen rondar los 30 años.

Año	Ahorro acumulado (€)	Ahorro - Inversión (€)
1	587.076,91	-8.127.232,44
2	1.169.750,74	-7.544.558,61
3	1.748.021,49	-6.966.287,86
4	2.321.889,17	-6.392.420,18
5	2.891.353,77	-5.822.955,58
6	3.456.415,29	-5.257.894,05
7	4.017.073,74	-4.697.235,61
8	4.573.329,11	-4.140.980,24
9	5.125.181,40	-3.589.127,95
10	5.672.630,62	-3.041.678,73
11	6.215.676,76	-2.498.632,59
12	6.754.319,82	-1.959.989,53
13	7.288.559,81	-1.425.749,54
14	7.818.396,71	-895.912,63
15	8.343.830,55	-370.478,80
16	8.864.861,30	150.551,95

Tabla 7-2: Tabla de Payback desglosado

Observando los valores obtenidos, vemos que el payback es de 16 años, valor más que aceptable teniendo en cuenta que las inversiones en este tipo de instalaciones están planteadas en torno a 30 años vista, que suele ser la garantía que se suele contratar.

8 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la evolución de la energía solar fotovoltaica a lo largo de la historia, tecnología en la cual ha existido un gran avance en los últimos años y es por ello que su uso cada vez está más normalizado, como se ha podido comprobar su instalación ha aumentado en la mayoría de las potencias mundiales y se prevé que este número siga aumentando gracias también al aumento de eficiencia y calidad en los módulos.

Por otro lado, también se ha analizado el uso de la generación eólica a lo largo de la historia, generación que ha sufrido también un avance muy importante en los últimos años debido a las mejoras de eficiencia existentes y a la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía renovables, su versatilidad y su escasa ocupación de terreno hacen de esta forma de generación cada vez más importante en el mercado.

Analizando la situación climatológica de España, se puede observar que España posee un recurso energético muy importante para la generación de energía renovable, en este trabajo se ha analizado por separado el recurso eólico y el recurso fotovoltaico para así poder elegir la mejor ubicación de la instalación, como se pudo comprobar, la zona costera de Andalucía es una de las zonas no solo de España, sino de Europa que mejor combina ambos recursos debido a su alta irradiancia y a su alta densidad de viento, es por ello, que la ubicación elegida fue Arcos de la Frontera, pueblo de la provincia de Cádiz. Además, en este caso, al ser una planta híbrida el factor climatológico tiene una importancia mayor aún que en una instalación en la que solo exista un solo tipo de generación ya que los proyectos híbridos deben estar diseñados para actuar como un solo suministro de MW/h limpios, por tanto, debe asegurarse que los factores de capacidad promedio sean más altos que las plantas que tengan una sola tecnología. Para lograr estos objetivos es muy importante que los emplazamientos cuenten con buenos recursos energéticos, suficiente tierra y capacidad de transmisión disponible.

Una vez elegida la ubicación, se llega a uno de los puntos fundamentales de la instalación, el diseño. Para ello se han usado diferentes *softwares* de diseño, como son PVcase y PVsyst para la fotovoltaica y Furow y Autocad para la eólica. Sin la ayuda de este tipo de *softwares* especializados se haría imposible la tarea del diseño de ambas plantas con semejante detalle, ya que estos *softwares* no solo nos ayudan a hacernos una idea gráfica del diseño de nuestra planta sino que aportan cálculos de generación, pérdidas y mediciones que son estrictamente necesarios para conocer el funcionamiento de la instalación.

Desde el punto de vista económico, se puede comprobar, que es una inversión alta, pero que es bastante rentable, esto se debe en gran parte a la hibridación de la instalación, característica que hace que tenga una producción casi constante, debido a que cuando menor producción solar se produce, la eólica suele tener mayor producción y viceversa, es por eso que, de cara a la venta de energía a la red, es un tipo de instalación muy rentable.

Como conclusión final de este trabajo, se puede extraer, que, aunque llevan estando presente en nuestras vidas desde el inicio de nuestra historia, cada vez más, juegan un papel fundamental en la generación energética global y este papel cada vez será más crucial en el futuro.

REFERENCIAS

[1]

https://descargas.intef.es/cedec/proyectoedia/fisica_quimica/contenidos/investigando_energia/un_paseo_por_la_historia_de_la_energa.html

[2] González, R. (2020). *Matriz energética mundial y el cambio climático: estado actual*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/15654>.

[3]

<https://th.bing.com/th/id/R.ef07ac3f3f6e6989e29b1d100a43e1e8?rik=NfSX4vs7YC1ptQ&pid=ImgRaw&r=0>

[4] Statista [online]: <https://es.statista.com/estadisticas/993747/porcentaje-de-la-produccion-de-energia-electrica-por-fuentes-energeticas-en-espana/>

[5] Static smarti grid info [imagen2]: <https://static.smartgridsinfo.es/media/2020/03/sistema-electrico-espana-red-electrica-potencia-cobertura.png>

[6] Flobers [online] <https://www.flobers.com/blog/las-energias-renovables-generaran-el-81-de-electricidad-en2030#:~:text=El%20Plan%20Nacional%20de%20Energ%C3%ADa,puntos%20porcentuales%20la%20cifra%20actual>

[7] El periódico de la energía [online] [imagen]: <https://elperiodicodelaenergia.com/wp-content/uploads/2021/12/20211203-AleaSoft-PNIEC-objetivos-capacidad-renovable-Espana-1.png>

[8] Censolar [online]: <https://www.censolar.org/legislacion-fotovoltaica-2021/#>

[9] PVcase [Diseño Solar con el Software PVcase Ground Mount](#)

[10] PVsyst [PVsyst – Photovoltaic software](#)

[11] Autocad [Autodesk AutoCAD 2025 | Obtener precios y comprar el software de AutoCAD oficial](#)

[12] Greening-e [online]: <https://greening-e.com/como-ha-evolucionado-la-energia-solar-a-lo-largo-de-la-historia/>

[13] [Solar fotovoltaica: países con mayor potencia instalada en 2022 | Statista](#)

[14] Alusinsolar [online]: <https://alusinsolar.com/los-5-mayores-paises-productores-de-energia-solar-del-mundo/>

[15] Imagen módulos fotovoltaicos en la actualidad: <https://atersa.shop/app/uploads/2019/09/atersa.jpg>

[16] Evwind:

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.ewwind.com%2F2020%2F10%2F31%2Fcomo-se-construye-una-central-fotovoltaica%2F&psig=AOvVaw3XEfen6i-cte-pmN97d_nu&ust=1700643727405000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTCNjI59rd1IIDFQAAAAAdAAAAABAE

- [17] Evolución histórica eólica: <https://estudiarenergiasrenovablesonline.es/historia-de-la-energia-eolica/>
- [18] Tipos de Turbina: <https://www.vectorenovables.com/es/recursos/blog/tipos-de-aerogeneradores-cual-genera-mas-energia>
- [19] Situación actual: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-el-mundo/>
- [20] Ranking de potencia terrestre instalada:
https://www.vectorenovables.com/images/easyblog_articles/357/b2ap3_large_ranking-paises-potencia-onshore-eolica.jpg
- [21] Actualidad España: <https://aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-en-espana/>
- [22] Generación España: <https://es.statista.com/estadisticas/1004216/generacion-eolica-en-espana/>
- [23] Funcionamiento eólico: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-eolica#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20utiliza%20la,para%20crear%20el%20voltaje%20el%C3%A9ctrico.>
- [24] Códigos de red: <https://www.norvento.com/blog/codigo-red-europeo2/>
- [25] Instalación eólica:
<https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fenergieaolicaparatosdolospublicos.blogspot.com%2F2015%2F05%2Finstalaciones-eolicas.html&psig=AOvVaw2ZhEhFW5uw-HYCx4uBevZV&ust=1703700041362000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTCIif-ajXrYMDFQAAAAAdAAAAABAD>
- [26] Ranking:
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fpanelessolaresbarcelona.com%2Fenergia-solar-renovable%2Fmapa-de-la-radiacion-solar-en-europa%2F&psig=AOvVaw0-5YS_oQWkOX1DUafJwS6v&ust=1703865692503000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBEQjRxqFwoTCNjIxLXf34MDFQAAAAAdAAAAABAD
- [27] Ranking de radiación por provincias: <https://energia.roams.es/energia-renovable/energia-solar/radiacion-solar-espana/>
- [28] Atlas eólico:
https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e4_atlas_eolico_A_9b90ff10.pdf
- [29] Tabla de secciones de cableado: <https://mejorenfurgocamper.com/wp-content/uploads/2021/09/UNE-HD-60364-5-52-seccion-cables.jpg>
- [30] Factor de agrupación [Mejor Tabla Seccion De Cableen el mundo ¡Desbloquea más conocimientos! \(cdarkere.github.io\)](https://mejorenfurgocamper.com/wp-content/uploads/2021/09/UNE-HD-60364-5-52-seccion-cables.jpg)
- [31] Tabla de corriente máxima admisible:
<https://th.bing.com/th/id/R.d260faa2c5e6dac2a19b708d1658a5f4?rik=EdphiO%2bz6QY3zg&pid=ImgRaw&r=0>
- [32] Modelo de turbina seleccionada:
<https://th.bing.com/th/id/OIP.a-B2aXpQEmZmcAA4E0b9TgEyDM?rs=1&pid=ImgDetMain>
- [33] Reglamento Instalaciones eléctricas de Media Tensión

ANEXOS

PVsyst - Informe de simulación

Sistema conectado a la red

Proyecto: EST23-00164- CLIMATE IMPACT- CIGARRA 2

Variante: New simulation variant

Sistema de rastreo, con retroceso

Potencia del sistema: 4816 kWp

Arcos de la Frontera - España

Author

ELMYA S.A. (Spain)



PVsyst V7.3.4

VCO, Fecha de simulación:
03/01/24 09:08
con v7.3.4

ELMYA S.A. (Spain)

Resumen del proyecto

Sitio geográfico Arcos de la Frontera España	Situación Latitud 36.75 °N Longitud -5.82 °W Altitud 177 m Zona horaria UTC+1	Configuración del proyecto Albedo 0.20
Datos meteo Arcos de la Frontera Meteonorm 8.1 (1996-2015), Sat=100% - Synthetic		

Resumen del sistema

Sistema conectado a la red Orientación campo FV Orientación Plano de rastreo, eje horizontal N-S Azimut del eje 0 °	Sistema de rastreo, con retroceso Algoritmo de rastreo Cálculo astronómico Retroceso activado	Sombreados cercanos Sombreados lineales Sombreado difuso Automático
Información del sistema Generador FV Núm. de módulos 6930 unidades Pnom total 4816 kWp	Inversores Núm. de unidades 13 unidades Pnom total 3900 kWca Proporción Pnom 1.235	
Necesidades del usuario Carga ilimitada (red)		

Resumen de resultados

Energía producida 10135749 kWh/año	Producción específica 2104 kWh/kWp/año	Proporción rend. PR 87.61 %
------------------------------------	--	-----------------------------

Tabla de contenido

Resumen de proyectos y resultados	2
Parámetros generales, Características del generador FV, Pérdidas del sistema.	3
Definición del sombreado cercano - Diagrama de iso-sombreados	5
Resultados principales	6
Diagrama de pérdida	7
Gráficos predefinidos	8
Diagrama unifilar	9



PVsyst V7.3.4

VCO, Fecha de simulación:
03/01/24 09:08
con v7.3.4

Parámetros generales

Sistema conectado a la red		Sistema de rastreo, con retroceso			
Orientación campo FV		Algoritmo de rastreo		Conjunto de retroceso	
Orientación		Cálculo astronómico		Núm. de rastreadores 127 unidades	
Plano de rastreo, eje horizontal N-S		Retroceso activado		Tamaños	
Azimut del eje 0 °				Espaciado de rastreador 6.00 m	
				Ancho de colector 2.38 m	
				Proporc. cob. suelo (GCR) 39.7 %	
				Phi mín/máx. -/+ 55.0 °	
				Estrategia de retroceso	
				Límites de phi para BT -/+ 66.4 °	
				Paso de retroceso 6.00 m	
				Ancho de retroceso 2.38 m	
Modelos usados		Sombreados cercanos		Necesidades del usuario	
Transposición Perez		Sombreados lineales		Carga ilimitada (red)	
Difuso Perez, Meteonorm		Sombreado difuso Automático			
Circunsolar separado					
Horizonte					
Horizonte libre					

Características del generador FV

Módulo FV		Inversor	
Fabricante	Trina Solar	Fabricante	Huawei Technologies
Modelo	TSM-695NEG21C.20	Modelo	SUN2000-330KTL-H1-Preliminary V0.2
(Definición de parámetros personalizados)		(Definición de parámetros personalizados)	
Unidad Nom. Potencia	695 Wp	Unidad Nom. Potencia	300 kWca
Número de módulos FV	6930 unidades	Número de inversores	13 unidades
Nominal (STC)	4816 kWp	Potencia total	3900 kWca
Módulos	231 Cadenas x 30 En series	Voltaje de funcionamiento	500-1500 V
En cond. de funcionam. (50°C)		Potencia máx. (=>30°C)	330 kWca
Pmpp	4457 kWp	Proporción Pnom (CC:CA)	1.23
U mpp	1104 V	Reparto de potencia en este inversor	
I mpp	4039 A		
Potencia FV total		Potencia total del inversor	
Nominal (STC)	4816 kWp	Potencia total	3900 kWca
Total	6930 módulos	Potencia máx.	4290 kWca
Área del módulo	21527 m²	Número de inversores	13 unidades
Área celular	20170 m²	Proporción Pnom	1.23

Pérdidas del conjunto

Factor de pérdida térmica		Pérdidas de cableado CC		Pérdida de calidad módulo	
Temperatura módulo según irradiancia		Res. conjunto global 4.4 mΩ		Frac. de pérdida -0.8 %	
Uc (const)	20.0 W/m²K	Frac. de pérdida 1.5 % en STC			
Uv (viento)	0.0 W/m²K/m/s				
Pérdidas de desajuste de módulo		Pérdidas de desajuste de cadenas			
Frac. de pérdida 2.0 % en MPP		Frac. de pérdida 0.2 %			



PVsyst V7.3.4

VC0, Fecha de simulación:
03/01/24 09:08
con v7.3.4

Pérdidas del conjunto

Factor de pérdida IAM

Efecto de incidencia (IAM): Perfil definido por el usuario

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	1.000	0.999	0.994	0.969	0.928	0.829	0.585	0.000



PVsyst V7.3.4

VC0, Fecha de simulación:
03/01/24 09:08
con v7.3.4

Parámetro de sombreados cercanos

Perspectiva del campo FV y la escena de sombreado circundante

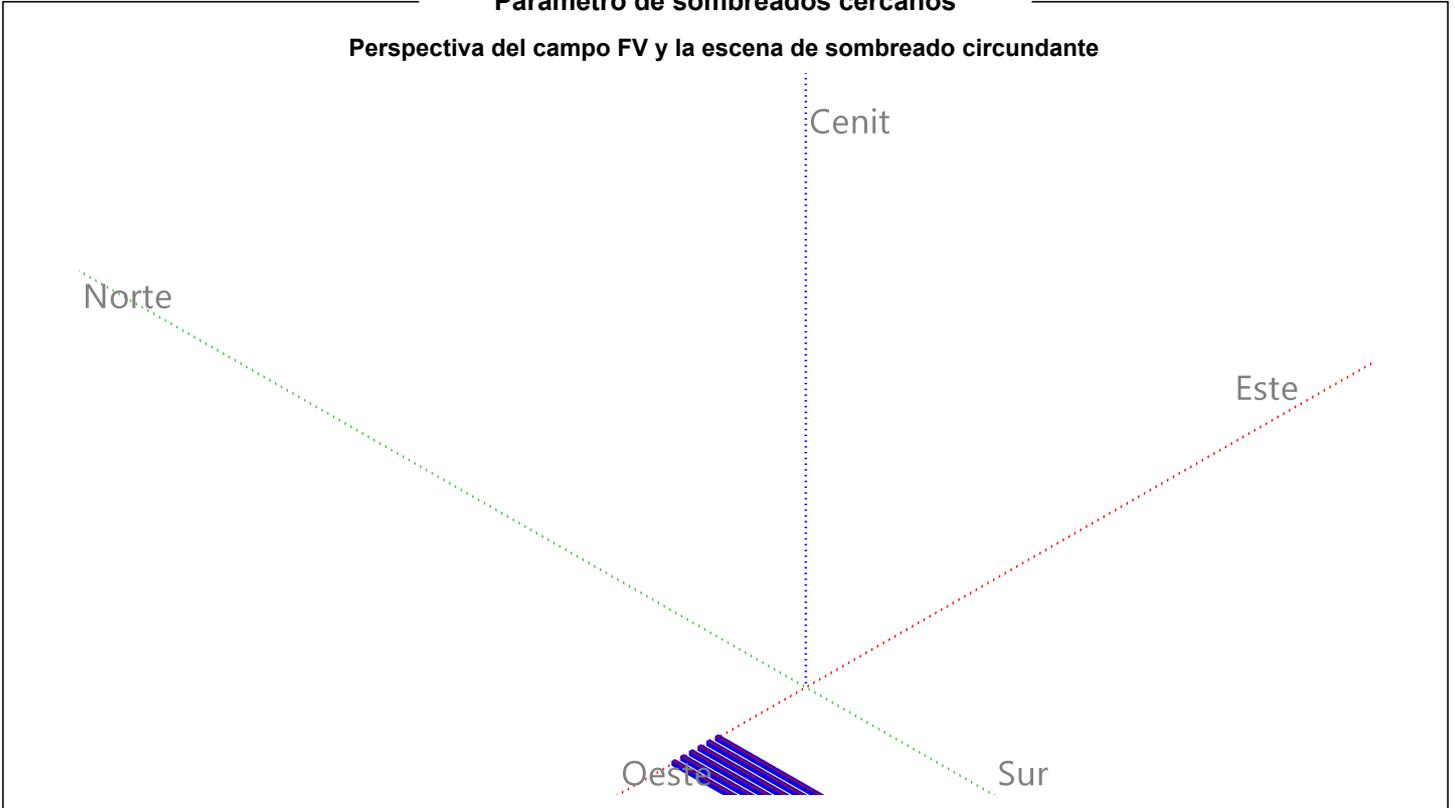
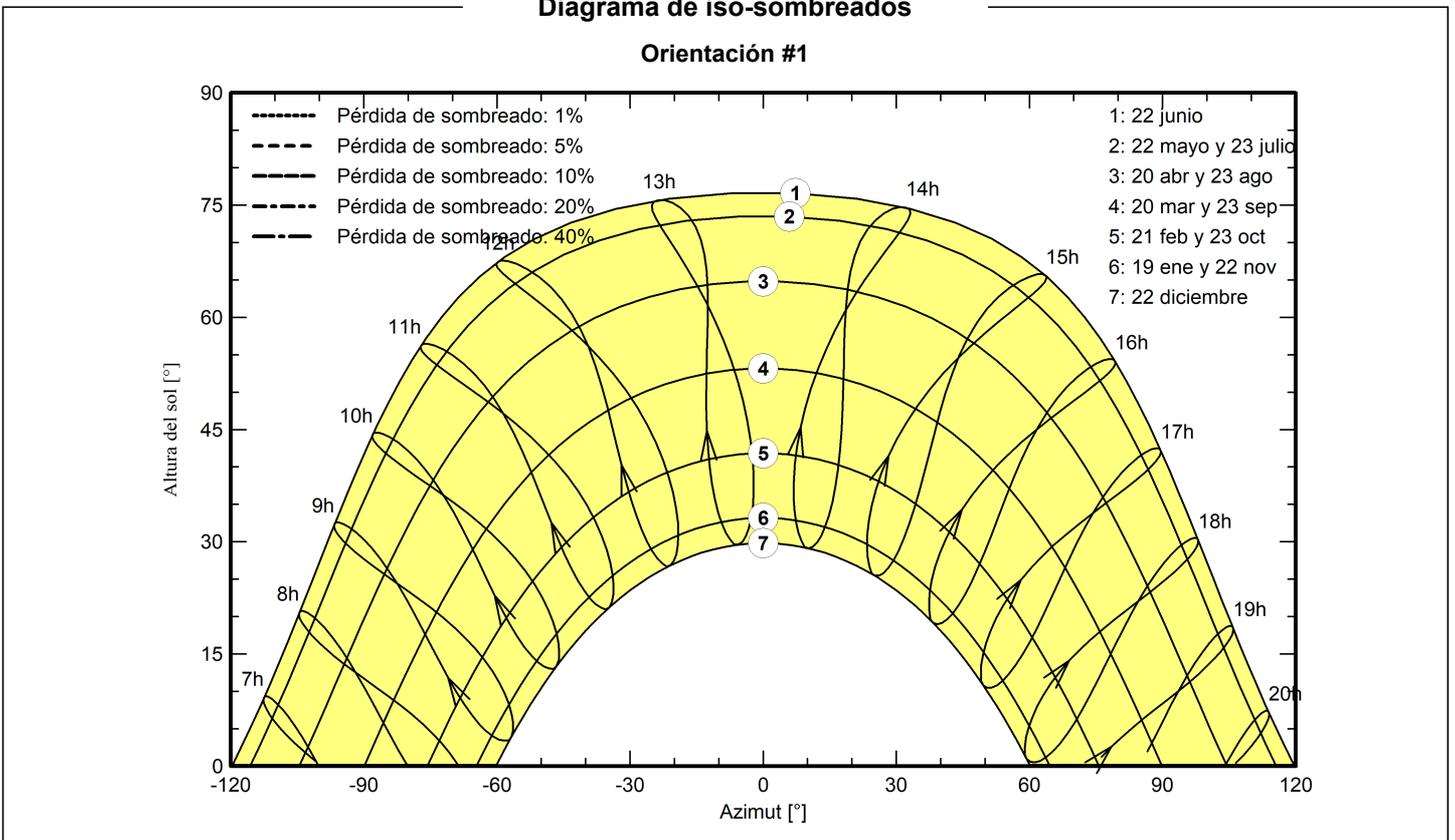


Diagrama de iso-sombreados

Orientación #1





PVsyst V7.3.4

VCO, Fecha de simulación:
03/01/24 09:08
con v7.3.4

ELMYA S.A. (Spain)

Resultados principales

Producción del sistema

Energía producida 10135749 kWh/año

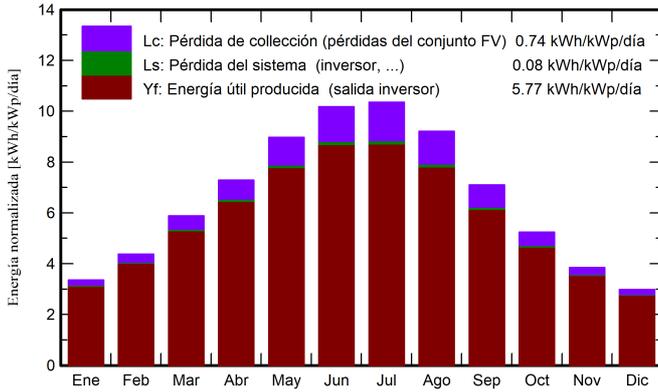
Producción específica

2104 kWh/kWp/año

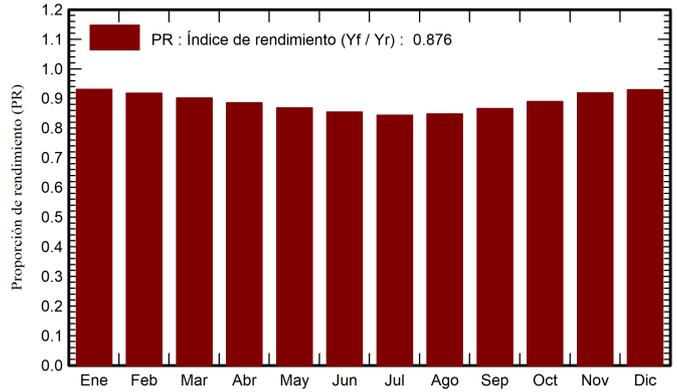
Proporción rend. PR

87.61 %

Producciones normalizadas (por kWp instalado)



Proporción de rendimiento (PR)



Balances y resultados principales

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	proporción
Enero	77.4	30.02	9.97	104.2	101.4	472744	467377	0.931
Febrero	94.0	38.57	11.02	122.7	119.6	548744	542194	0.918
Marzo	139.1	57.95	13.83	182.5	178.1	802263	792300	0.901
Abril	169.1	66.92	15.94	218.7	213.9	945676	933286	0.886
Mayo	212.7	76.13	19.78	278.1	272.5	1179345	1163301	0.868
Junio	231.8	68.38	23.36	305.5	300.2	1274327	1256255	0.854
Julio	241.1	63.34	25.93	320.9	315.5	1321813	1302707	0.843
Agosto	214.2	63.57	26.51	285.8	280.6	1184306	1167529	0.848
Septiembre	159.1	52.77	23.15	213.1	208.7	901102	888864	0.866
Octubre	121.9	44.46	19.67	162.7	159.0	705950	697014	0.889
Noviembre	85.6	32.34	13.75	115.6	112.7	517866	511807	0.919
Diciembre	69.9	30.41	11.02	92.3	89.5	417818	413115	0.929
Año	1815.8	624.87	17.87	2402.2	2351.6	10271955	10135749	0.876

Leyendas

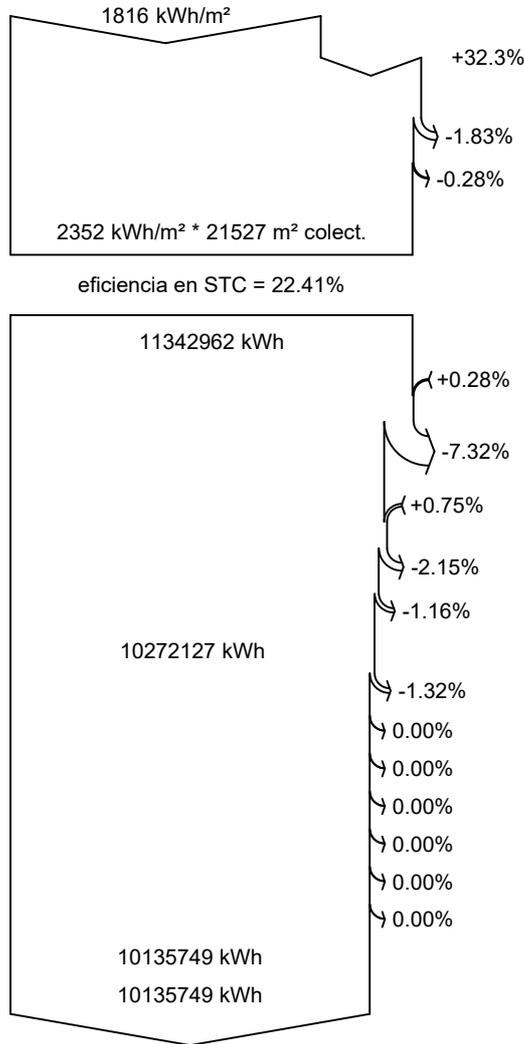
- GlobHor Irradiación horizontal global
- DiffHor Irradiación difusa horizontal
- T_Amb Temperatura ambiente
- GlobInc Global incidente plano receptor
- GlobEff Global efectivo, corr. para IAM y sombreados
- EArray Energía efectiva a la salida del conjunto
- E_Grid Energía inyectada en la red
- PR Proporción de rendimiento



PVsyst V7.3.4

VC0, Fecha de simulación:
03/01/24 09:08
con v7.3.4

Diagrama de pérdida



Irradiación horizontal global

Global incidente plano receptor

Sombreados cercanos: pérdida de irradiancia

Factor IAM en global

Irradiancia efectiva en colectores

Conversión FV

Conjunto de energía nominal (con efic. STC)

Pérdida FV debido al nivel de irradiancia

Pérdida FV debido a la temperatura.

Pérdida calidad de módulo

Pérdidas de desajuste, módulos y cadenas

Pérdida óhmica del cableado

Energía virtual del conjunto en MPP

Pérdida del inversor durante la operación (eficiencia)

Pérdida del inversor sobre potencia inv. nominal

Pérdida del inversor debido a la corriente de entrada máxima

Pérdida de inversor sobre voltaje inv. nominal

Pérdida del inversor debido al umbral de potencia

Pérdida del inversor debido al umbral de voltaje

Consumo nocturno

Energía disponible en la salida del inversor

Energía inyectada en la red

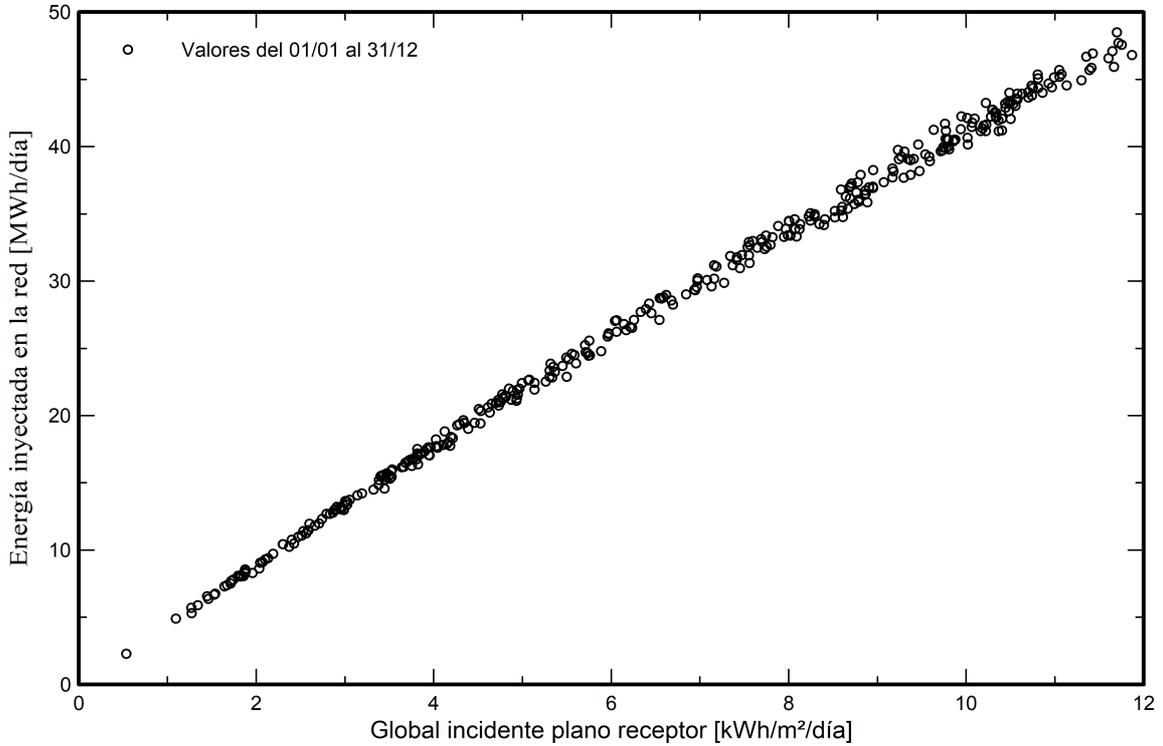


PVsyst V7.3.4

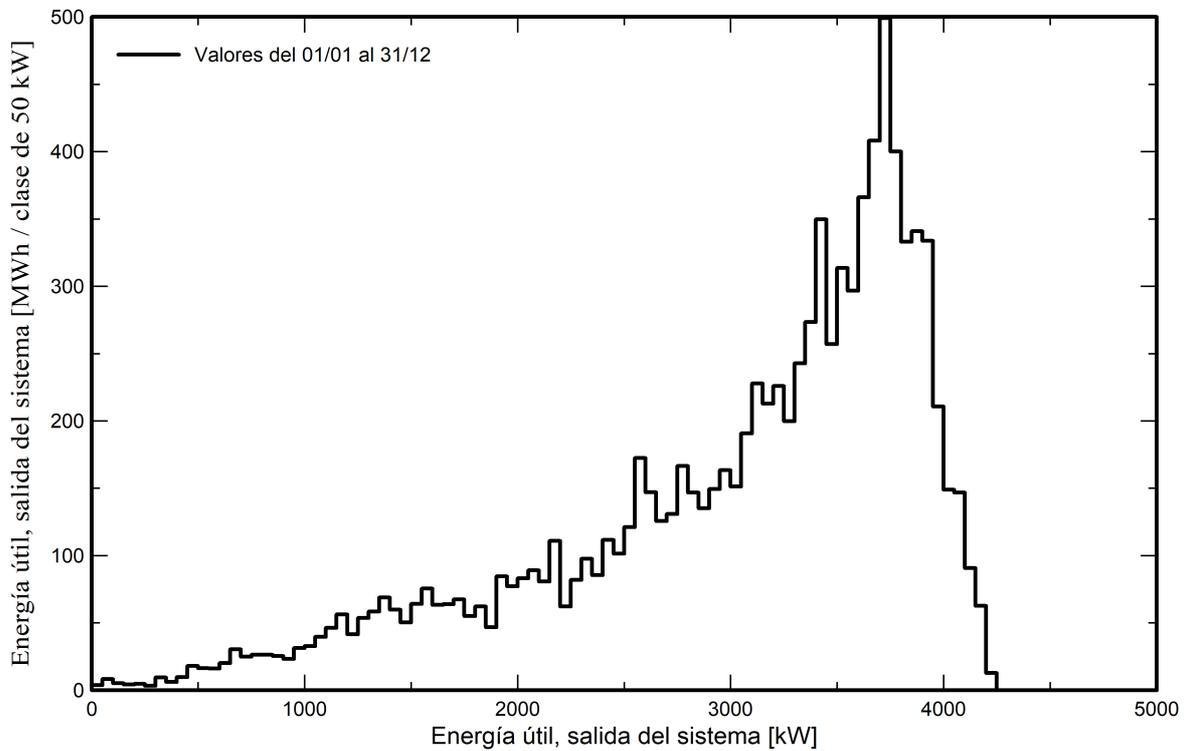
VC0, Fecha de simulación:
03/01/24 09:08
con v7.3.4

Gráficos predefinidos

Diagrama entrada/salida diaria



System Output Power Distribution

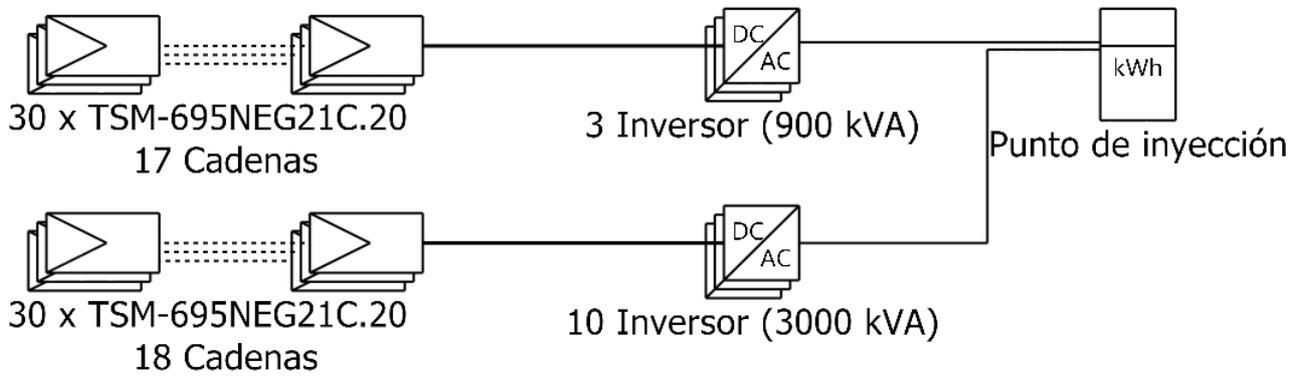




PVsyst V7.3.4

VC0, Fecha de simulación:
03/01/24 09:08
con v7.3.4

Diagrama unifilar



Módulo FV	TSM-695NEG21C.20
Inversor	SUN2000-330KTL-H1-Preliminary V0.2
Cadena	30 x TSM-695NEG21C.20

EST23-00164- CLIMATE IMPACT
- CIGARRA 2

ELMYA S.A. (Spain
)

VC0 : New simulation variant

03/01/24

Vertex N

BIFACIAL DUAL GLASS MODULE

PRODUCT: TSM-NEG21C.20

PRODUCT RANGE: 670-695W

695W

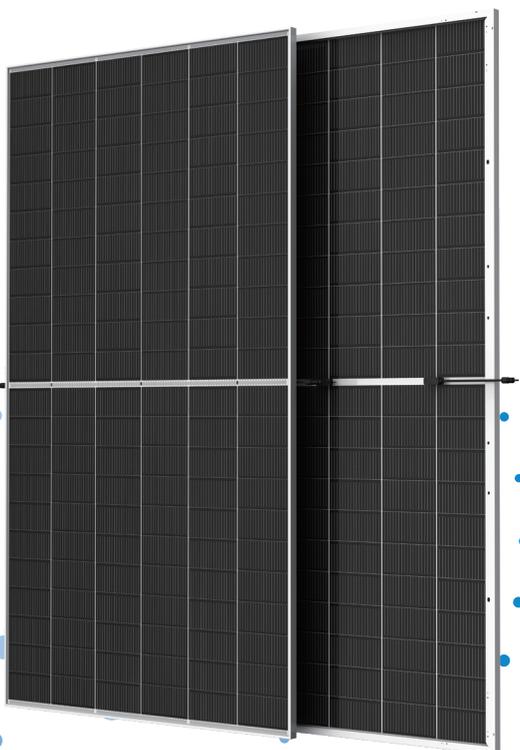
MAXIMUM POWER OUTPUT

0~+5W

POSITIVE POWER TOLERANCE

22.4%

MAXIMUM EFFICIENCY



High customer value

- Lower LCOE (levelized cost of energy), reduced BOS (balance of system) cost, shorter payback time
- Guaranteed first year and annual degradation
- High module power; high string power and low voltage design



High power up to 695W

- Up to 22.4% module efficiency with high density interconnect technology
- Multi-busbar technology for better light trapping effect, lower series resistance and improved current collection



High reliability

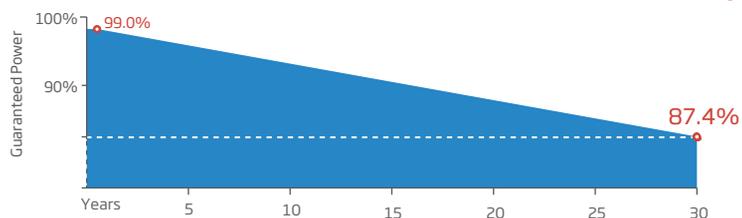
- Minimized micro-cracks with innovative non-destructive cutting technology
- Ensured PID resistance through cell process and module material control
- Resistant to harsh environments such as salt, ammonia, sand, high temperature and high humidity areas
- Mechanical performance up to 5400 Pa positive load and 2400 Pa negative load



High energy yield

- Excellent product bifaciality and low irradiation performance, validated by 3rd party
- Extremely low 1% first year degradation and 0.4% annual power attenuation
- The unique design provides optimized energy production under inter-row shading conditions
- Lower temperature coefficient (-0.30%) and operating temperature
- Up to 30% additional power gain from back side depending on albedo

Trina Solar's Vertex Bifacial Dual Glass Performance Warranty



Comprehensive Products and System Certificates



IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716

ISO 9001: Quality Management System

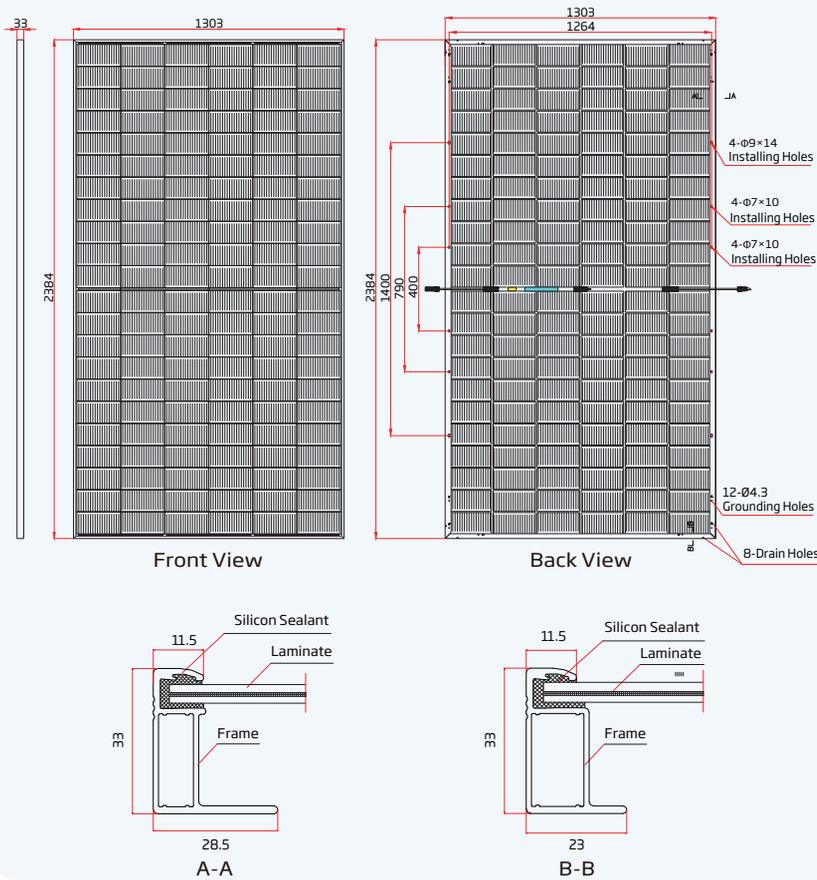
ISO 14001: Environmental Management System

ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification

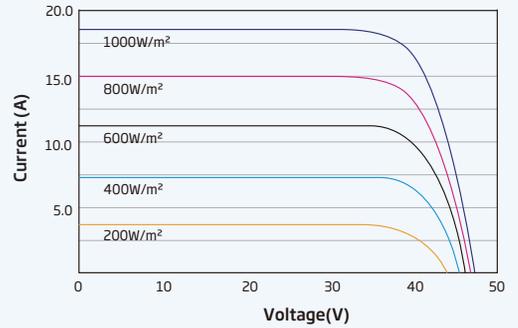
ISO45001: Occupational Health and Safety Management System



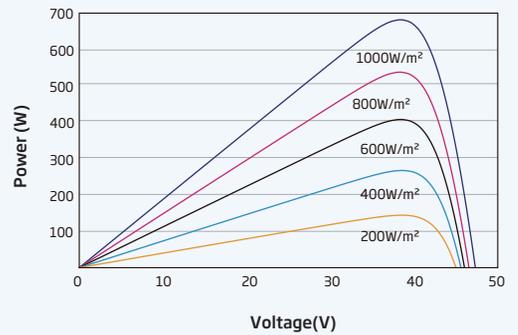
DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



I-V CURVES OF PV MODULE(680W)



P-V CURVES OF PV MODULE(680 W)



ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts-P _{MAX} (Wp)*	670	675	680	685	690	695
Power Tolerance-P _{MAX} (W)	0 ~ +5					
Maximum Power Voltage-V _{MPP} (V)	39.2	39.4	39.6	39.8	40.1	40.3
Maximum Power Current-I _{MPP} (A)	17.09	17.12	17.16	17.19	17.23	17.25
Open Circuit Voltage-V _{OC} (V)	47.0	47.2	47.4	47.7	47.9	48.3
Short Circuit Current-I _{SC} (A)	18.10	18.14	18.18	18.21	18.25	18.28
Module Efficiency η _m (%)	21.6	21.7	21.9	22.1	22.2	22.4

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. *Measuring tolerance: ±3%.

Electrical characteristics with different power bin (reference to 10% Irradiance ratio)

Total Equivalent power -P _{MAX} (Wp)	724	729	734	740	745	751
Maximum Power Voltage-V _{MPP} (V)	39.2	39.4	39.6	39.8	40.1	40.3
Maximum Power Current-I _{MPP} (A)	18.46	18.49	18.53	18.57	18.61	18.63
Open Circuit Voltage-V _{OC} (V)	47.0	47.2	47.4	47.7	47.9	48.3
Short Circuit Current-I _{SC} (A)	19.55	19.59	19.63	19.67	19.71	19.74
Irradiance ratio (rear/front)	10%					

Product Bifaciality: 80±5%.

ELECTRICAL DATA (NOCT)

Maximum Power-P _{MAX} (Wp)	510	514	517	521	526	530
Maximum Power Voltage-V _{MPP} (V)	36.8	37.0	37.2	37.3	37.7	37.8
Maximum Power Current-I _{MPP} (A)	13.86	13.89	13.91	13.94	13.96	14.02
Open Circuit Voltage-V _{OC} (V)	44.5	44.7	44.9	45.2	45.4	45.8
Short Circuit Current-I _{SC} (A)	14.59	14.62	14.65	14.67	14.71	14.73

NOCT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline
No. of cells	132 cells
Module Dimensions	2384×1303×33 mm (93.86×51.30×1.30 inches)
Weight	38.3 kg (84.4 lb)
Front Glass	2.0 mm (0.08 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	POE/EVA
Back Glass	2.0 mm (0.08 inches), Heat Strengthened Glass (White Grid Glass)
Frame	33mm(1.30 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm ² (0.006 inches ²), Portrait: 350/280 mm(13.78/11.02 inches) Length can be customized
Connector	MC4 EVO2 / TS4 Plus / TS4*

*Please refer to regional datasheet for specified connector.

TEMPERATURE RATINGS

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	43°C (±2°C)
Temperature Coefficient of P _{MAX}	-0.30%/°C
Temperature Coefficient of V _{OC}	-0.24%/°C
Temperature Coefficient of I _{SC}	0.04%/°C

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
Max Series Fuse Rating	35A

WARRANTY

- 12 year Product Workmanship Warranty
- 30 year Power Warranty
- 1% first year degradation
- 0.4% Annual Power Attenuation

(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

- Modules per box: 33 pieces
- Modules per 40' container: 594 pieces

SUN2000-330KTL-H2

Smart PV Controller

For MEA, Eurasian



Max. Efficiency
≥99.0%



Smart Connector-level
Detection (SCLD)



Smart Self-cleaning
Fan (SSCF)



IP66
Protection



MBUS
Supported



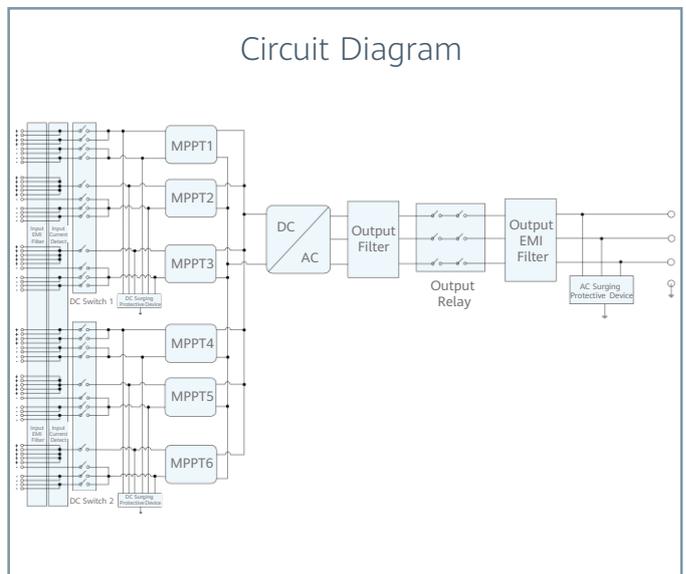
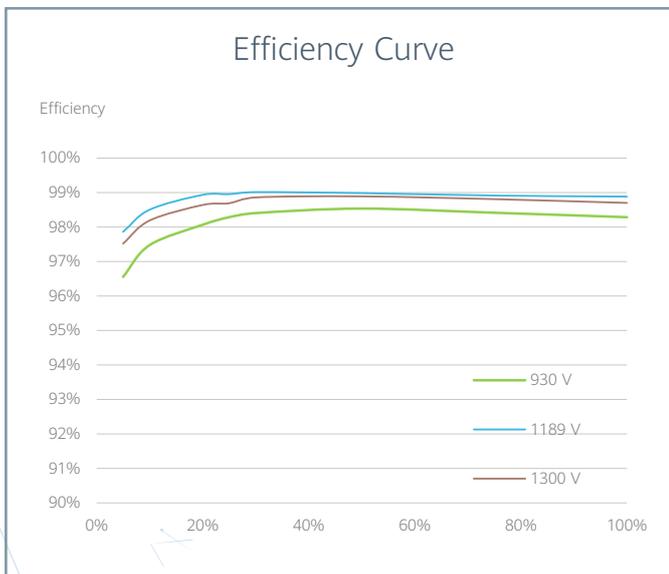
Smart String-level
Disconnection (SSLD)



Smart IV Curve Diagnosis
Supported



Surge Arresters for
DC & AC



SUN2000-330KTL-H2

Technical Specifications

Efficiency		
Max. Efficiency		≥ 99.0%
European Efficiency		≥ 98.8%
Input		
Max. Input Voltage		1,500 V
Number of MPP Trackers		6
Max. Current per MPPT		65 A
Max. Short Circuit Current per MPPT		115 A
Max. PV Inputs per MPPT		4/5/5/4/5/5
Start Voltage		550 V
MPPT Operating Voltage Range		500 V ~ 1,500 V
Nominal Input Voltage		1,080 V
Output		
Nominal AC Active Power		275,000 W ¹
Max. AC Apparent Power		330,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)		330,000 W
Nominal Output Voltage		800 V, 3W + PE
Rated AC Grid Frequency		50 Hz / 60 Hz
Nominal Output Current		198.5 A
Max. Output Current		240.3 A
Adjustable Power Factor Range		0.8 LG ... 0.8 LD
Total Harmonic Distortion		THD _i < 1% (Rated)
Protection		
Smart String-level Disconnection (SSLD)		Yes
Smart Connector-level Detection (SCLD)		Yes
AC Overcurrent Protection		Yes
DC Reverse-polarity Protection		Yes
PV-array String Fault Detection		Yes
DC Surge Arrester		Type II
AC Surge Arrester		Type II
DC Insulation Resistance Detection		Yes
Residual Current Detection Unit		Yes
Communication		
Display		LED Indicators, WLAN + APP
USB		Yes
MBUS		Yes
RS485		Yes
General		
Dimensions (W x H x D)		1,048 x 732 x 395 mm
Weight (with mounting plate)		≤ 112 kg
Operating Temperature Range		-25°C ~ 60°C
Cooling Method		Smart Air Cooling
Max. Operating Altitude without Derating		4,000 m
Relative Humidity		0 ~ 100% (Non-condensing)
DC Connector		HH4SMM4TMSPA / HH4SFM4TMSPA
AC Connector		Support OT / DT Terminal (Max. 400 mm ²)
Protection Degree		IP 66
Anti-corrosion Protection		C5-Medium
Topology		Transformerless
Standards Compliance		
IEC 62109-1/-2, IEC 62920, IEC 60947-2, EN 50549-2, IEC 61683, etc.		

1: Environmental temperature is 50°C