



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA PARA AUTOCONSUMO EN UNA NAVE INDUSTRIAL EN SESEÑA (TOLEDO)

Autor: Virgilio Casero Lozano

Director: Carlos Fuertes Kronberg

Madrid

Agosto de 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño de instalación fotovoltaica para autoconsumo en una nave industrial en Seseña
(Toledo) en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2020/21 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Virgilio Casero Lozano

Fecha: 23 / 08 / 2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Carlos Fuertes Kronberg

Fecha: 23 / 08 / 2021



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA PARA AUTOCONSUMO EN UNA NAVE INDUSTRIAL EN SESEÑA (TOLEDO)

Autor: Virgilio Casero Lozano

Director: Carlos Fuertes Kronberg

Madrid

Agosto de 2021

Agradecimientos

A Mamá y a Papá, por su apoyo incondicional y por todo el esfuerzo que han hecho siempre para darme lo mejor.

A mis hermanas Marian y Yaiza, por sus palabras de ánimo y consejos.

A toda mi familia y amigos, gracias a quienes he logrado llegar a este punto y hacia quienes sólo puedo expresar mi más sincero agradecimiento por apoyarme durante esta etapa académica tan dura, pero a la vez tan bonita y gratificante.

Y a todos los profesores que han formado parte de este camino. En especial, a mi director de proyecto Carlos Fuertes, por su energía, sus ganas de trabajar, su sencillez y cercanía durante estos años y proyectos que nos han unido.

DISEÑO DE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA PARA AUTOCONSUMO EN UNA NAVE INDUSTRIAL EN SESEÑA (TOLEDO).

Autor: Casero Lozano, Virgilio.

Director: Fuertes Kronberg, Carlos.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

El autoconsumo fotovoltaico es una de las herramientas más útiles para frenar el cambio climático y ahorrar costes. En este proyecto se hará un estudio de la industria a alimentar y se escogerá el sistema de autoconsumo adecuado. A continuación, se dimensionarán todos los elementos necesarios para su funcionamiento y, por último, se analizará la viabilidad del proyecto.

Palabras clave: Autoconsumo, Fotovoltaico, Renovable, Energía, Solar.

1. Introducción

Los gases de efecto invernadero son básicamente: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono (O_3), vapor de agua (H_2O) y clorofluorocarbonos (CFC). Estos gases siempre que se encuentren en una proporción adecuada ayudan a la atmósfera de la Tierra a retener el calor del Sol. Esto es el llamado **efecto invernadero**, sin el cual no se podría habitar en la Tierra. Sin embargo, se está produciendo un aumento de la temperatura en la Tierra de forma muy acelerada debido a las emisiones en exceso de estos gases, provocando el **cambio climático** [1] [2].

El problema del **calentamiento global** se debe a que el dióxido de carbono se está produciendo en grandes cantidades, desequilibrando la proporción adecuada de gases de efecto invernadero. Este **exceso de CO_2** está provocado principalmente por la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad, el transporte, la calefacción, la industria y la edificación, pero también está provocado por la ganadería, la agricultura, y más acciones llevadas a cabo por el ser humano [1] [2].

El foro económico mundial (**World Economic Forum**) lleva desde 2008 editando un informe sobre los **riesgos** que amenazan la humanidad. En el informe publicado en el año 2020, los 5 primeros riesgos en términos de probabilidad son el clima extremo, el fracaso de la acción climática, los desastres naturales, pérdida de biodiversidad y los desastres provocados por el hombre. Todos ellos pertenecen a la categoría de desastres medioambientales, lo que confirma la necesidad de frenar el cambio climático urgentemente [3].

Si no se consigue frenar el cambio climático la Tierra sufrirá **consecuencias** desastrosas que ponen en peligro la supervivencia de la flora y la fauna, e incluso al ser humano. Entre los impactos del cambio climático destaca el derretimiento de la masa de hielo en los polos, lo que produce inundaciones. También problemas relacionados con la escasez de agua en determinadas zonas y, por tanto, crisis de cosechas que acaban consecuentemente en una escasez de alimentos. Por otra parte, lluvias torrenciales que provocan desbordamientos de ríos y lagos. Estas dos últimas, provocando una migración

masiva y muerte de especies animales y vegetales debidos a los cambios en los ecosistemas [1] [2].

En 2015, la ONU aprobó la **Agenda 2030** sobre el Desarrollo Sostenible, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino con el que mejorar la vida de todos, sin dejar a nadie atrás. La Agenda cuenta con **17 Objetivos de Desarrollo Sostenible**, de los cuales este proyecto de una instalación fotovoltaica de autoconsumo abarcará 4 de ellos: [4]

En primer lugar, el **objetivo número 7** basado en **energía asequible, local y no contaminante**. El acceso a la electricidad en los países más pobres ha comenzado a acelerarse, la eficiencia energética continúa mejorando y la energía renovable está logrando expandirse rápidamente [5] [6].

En segundo lugar, contribuye al **objetivo número 11**, de manera que se **fomentan las ciudades y comunidades sostenibles**, en medida que tanto las nuevas como las ya existentes infraestructuras estén adaptadas a el incremento de la población acompañada de una consecuente demanda energética. Con el autoconsumo se ahorrarán pérdidas que actualmente se producen a lo largo del transporte de la energía e incluso se ahorrará en infraestructuras para el transporte de la energía [7].

En tercer lugar, se contribuye al **objetivo número 12: producción y consumo responsables**. El consumo y la producción sostenibles consisten en hacer más y mejor con menos, se trata de desvincular el crecimiento económico de la degradación medioambiental, aumentar la eficiencia de recursos. Con este proyecto se pretende producir energía de una manera responsable, fomentando la producción y consumo a nivel local, evitando entre otras causas la degradación medioambiental mediante obtención de energía de otras formas menos sostenibles [8].

Por último, el **objetivo número 13**, centrado en la **acción por el clima**. Mediante la instalación de paneles fotovoltaicos y el autoconsumo, se pretende proponer una alternativa de producción de energía que reduzca los niveles de producción de gases de efectos invernadero, más concretamente de dióxido de carbono mediante una fuente renovable de energía [9].

2. Estado de la técnica

La implantación global de las **energías renovables** es clave para el desarrollo sostenible de los países, puesto que permite generar electricidad y potenciar las economías sin perjudicar al medio ambiente. Además, las energías renovables son crecientemente competitivas, sus costes evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costes de los combustibles fósiles es la opuesta. Esta disminución en el precio de la energía renovable es un punto a favor de la transición energética que se va a llevar a cabo en los próximos años [10] [11].

En las siguientes ilustraciones se observa que cada vez son menores los costes tanto de instalación como de producción en energía solar fotovoltaica y en energía eólica, posicionándose como dos de las mejores opciones para invertir en energía renovable.

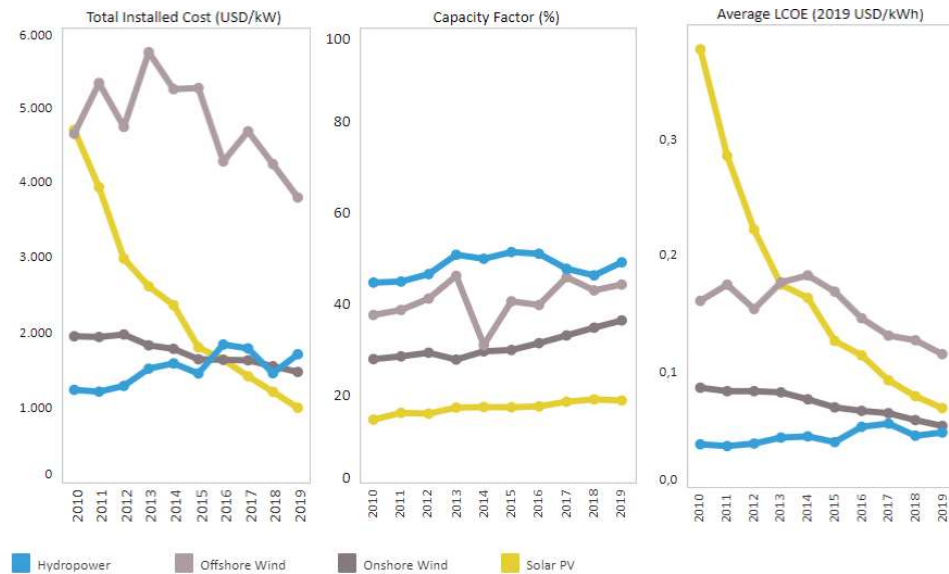


Ilustración 1. Costes totales medios ponderados globales de instalación, factor de capacidad y LCOE 2010-2019 [12].

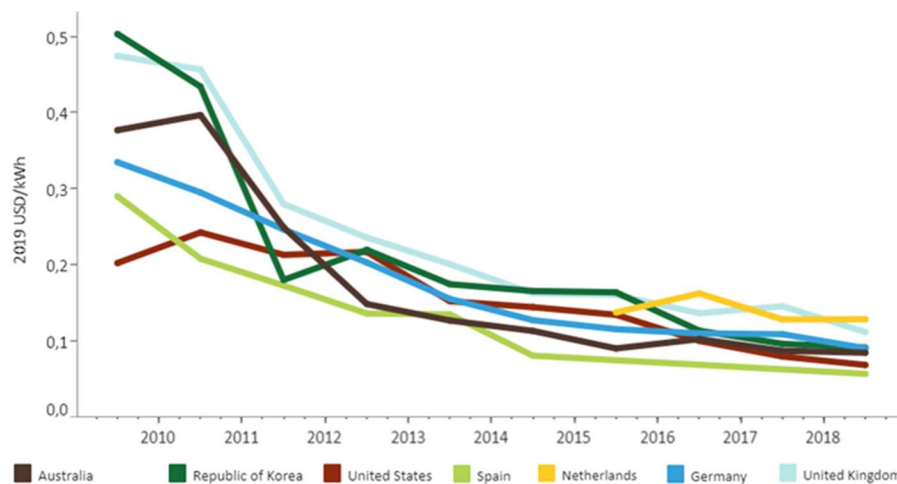


Ilustración 2. Promedio ponderado del LCOE de proyectos de energía solar fotovoltaica en diferentes países 2010-2019 [13].

En conclusión, el aprovechamiento de la **energía solar** mediante tecnología fotovoltaica, además de ser crecientemente competitiva y económicamente asequible cuenta con numerosas ventajas. En primer lugar, es una fuente de **energía no contaminante** dado que no emite sustancias tóxicas que pueden ser muy perjudiciales para el medio ambiente y el ser humano, aunque sí que contamine una pequeña parte en la fabricación de sus componentes. En segundo lugar, **contribuye a frenar el cambio climático**, puesto que no emite gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. Por supuesto, es una **energía renovable** disponible en todo el mundo, cuya explotación permite el desarrollo presente sin poner en riesgo el de las futuras generaciones. Y, finalmente, **genera riqueza y empleo local** [14].

Una de las maneras de aprovechar la energía solar es mediante el **autoconsumo fotovoltaico**. Este se define como la acción por la cual un particular o una empresa produce su propia energía eléctrica mediante paneles solares para consumo propio. Cabe

destacar que la energía es producida en instalaciones de generación fotovoltaica próximas al punto de consumo, sino carece de sentido [15] [16].

El autoconsumo es una solución muy económica a largo plazo de autoabastecimiento eléctrico. Se ha vuelto muy popular en España, puesto que en nuestro país contamos con aproximadamente 300 días de Sol, lo que significa una producción de energía casi ininterrumpida a lo largo del año. Asimismo, esta modalidad de consumo no solo supone un ahorro en la factura de la luz, sino que también contribuye a frenar el cambio climático [15] [16].

La energía fotovoltaica se define como la ciencia de convertir la luz solar directamente en electricidad. Para ello necesita **paneles solares**, los cuales contienen células solares que en su mayoría están formadas por capas de silicio, un material semiconductor con propiedades físicas y químicas muy favorables para propiciar el efecto fotovoltaico [17].

Su **funcionamiento** se produce de la siguiente manera: Cuando los fotones de la luz alcanzan la célula solar son absorbidos excitando electrones en las capas de silicio, provocando su movimiento y, finalmente, originando el flujo de electrones a través de un circuito de cableado que alimenta al sistema fotovoltaico. Este movimiento de electrones es lo que genera la energía eléctrica [18].

La electricidad producida por los módulos fotovoltaicos se genera en forma de corriente continua. Sin embargo, el sistema eléctrico que alimenta a los hogares e industrias utiliza corriente alterna. Por tanto, los sistemas fotovoltaicos incluyen **inversores** que convierten la electricidad de corriente continua generada por la energía solar en energía de corriente alterna utilizable para los hogares e industrias [18].

Los sistemas fotovoltaicos tienen una serie de módulos solares eléctricos, denominada **matriz fotovoltaica**. Los módulos de una matriz suelen estar conectados en grupos, que unidos forman cadenas. Las cadenas en serie se unen en una caja de conexión, que estará en lugar cercano a la matriz, desde la cual sale un cableado que lleva la energía al resto de los componentes del sistema [18].

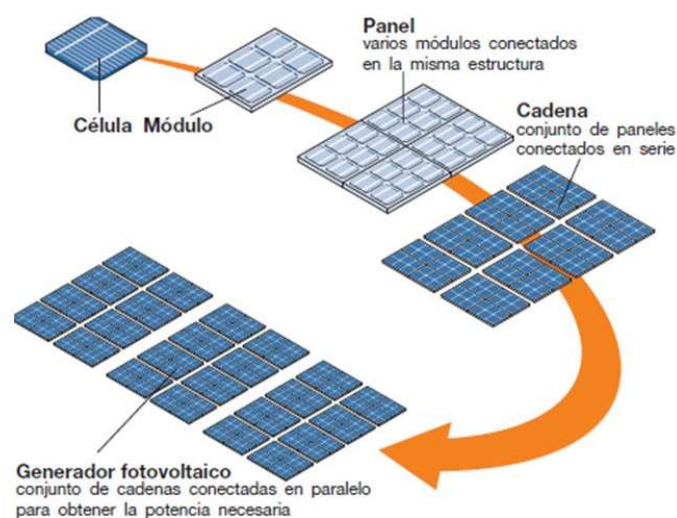


Ilustración 3. Formación de la matriz fotovoltaica [19].

Ahora bien, los **paneles fotovoltaicos** están formados por diferentes partes:

- **Marco:** es la estructura exterior encargada de sujetar todas las capas del panel solar juntas, que a continuación se describen [18].
- **Vidrio templado:** es el cristal que protege a las células solares del polvo, suciedad y posibles impactos. Asimismo, tiene propiedades anti-reflectivas para evitar que los rayos del sol se reflejen, provocando la máxima absorción posible de los rayos solares a los paneles [18].
- **Encapsulantes:** hay dos capas protegiendo la parte superior y la inferior de las células solares. Su función es sujetar las células fotovoltaicas formando una película selladora y aislante en torno a ellas, también actúa como pegamento entre el vidrio y la cubierta posterior con las células solares [18].
- **Células solares:** las más habituales están formadas por diferentes capas de las cuales la de silicio es la principal y más gruesa, donde se absorben los fotones. El resto de las capas tienen funciones anti-reflectantes y absorbentes, además de facilitar la aparición de pares de electrón-hueco los cuales producirán corriente con su movimiento, generando la energía eléctrica [18].
- **Cubierta posterior:** se encarga de sostener el marco, el vidrio templado, las células solares y los encapsulantes juntos. Su función también es reflejar contra las células solares los fotones con longitudes de onda mayores que no hayan sido absorbidos en primera instancia por las células solares, aumentando así la absorción de energía [18].
- **Caja de conexiones:** Esta es la salida del panel solar. Un extremo del cable está conectado a los buses que recogen el cableado de las cadenas de células solares, mientras que el otro extremo del cable se toma como salida de la placa [18].

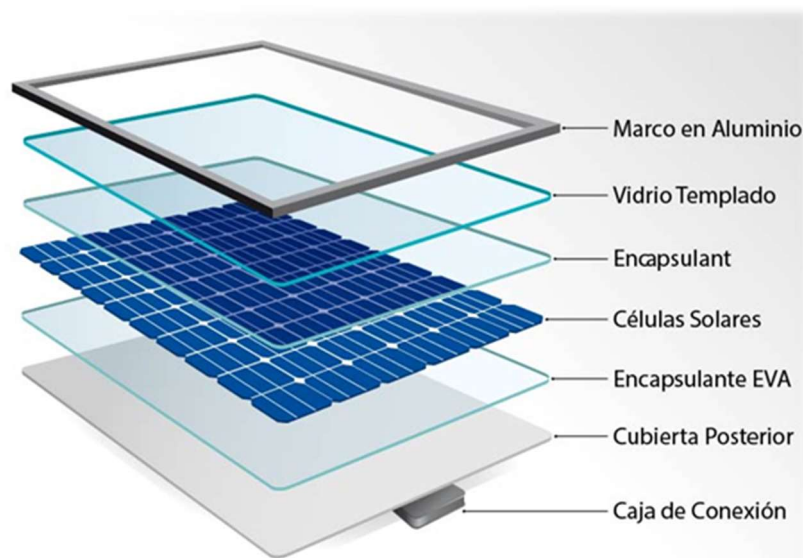


Ilustración 4. Componentes del panel solar [20].

Además de los propios paneles solares, las instalaciones de autoconsumo fotovoltaico se componen de otros elementos como inversores, cables, conectores y, opcionalmente, baterías.

- **Inversor:** es el elemento encargado de convertir la corriente continua, que es la que producen las placas fotovoltaicas, en corriente alterna que es la utilizada en uso doméstico e industrial [21].

- **Baterías:** son las encargadas de almacenar toda la energía eléctrica en su interior con la finalidad de usarlas cuando sea necesario. De manera habitual, se utilizan en las horas nocturnas donde no hay generación mediante energía solar y cuando se producen picos de demanda [21].
- **Regulador de carga:** la función de este elemento consiste en revisar el estado de carga de las baterías con el objetivo de alargar su vida útil [21].

3. Definición del proyecto

Una de las primeras decisiones que se tomaron fue decidir el tipo de sistema fotovoltaico de autoconsumo a instalar. Para este proyecto, se optó por un **sistema conectado a red sin excedentes**. Este sistema es el tipo más común, así como el más simple y menos costoso. La industria a alimentar estará por tanto conectada a la instalación fotovoltaica de autoconsumo y a la red eléctrica, produciéndose dos situaciones diferentes:

En la primera, se utiliza la red como “almacenamiento”, es decir, cuando la instalación fotovoltaica genera más energía de la que consume la industria. Al tratarse de una instalación sin excedentes, contará con un sistema anti-vertido que impide la inyección de energía eléctrica excedente a la red. Si por el contrario hubiese sido una instalación con excedentes, este exceso de energía se inyectaría a la red, compensándose esa energía volcada mediante un mecanismo de compensación gestionado por las compañías eléctricas, o mediante no compensación, en función de una serie de características de la instalación [22].

La segunda situación que se puede producir es que se utilice la red como respaldo. Cuando el consumo es mayor que la generación de la matriz solar, automáticamente se extrae energía de la red hasta satisfacer la demanda.

Por tanto, las razones por las que se optó por un **sistema sin excedentes y sin baterías**, se apoyan en la decisión de la empresa dueña del parque de maquinaria, cuyo como objetivo el ahorro en gasto en electricidad, no generar en exceso y verter a la red beneficiándose de ello, por lo que prefiere ahorrarse los trámites y burocracia necesario para ello.

Las **ventajas** principales de los sistemas conectados a la red son la simplicidad, el bajo coste y mantenimiento, lo que los convierte en una solución sencilla para los propietarios de viviendas que ya utilizan energía de la red pública. Por otra parte, estar conectado a la red también implica desventajas como por ejemplo cuando la red se cae, también lo hace el sistema fotovoltaico. Esta función de apagado automático es requerida por los servicios públicos para la conexión a la red para la seguridad del personal de servicios públicos que trabaja en las líneas eléctricas [23].

A continuación, se muestra un esquema de un sistema conectado a la red, donde aparecen elementos de protección y medidores de la energía producida por los paneles solares y la energía consumida de la red, además del inversor.

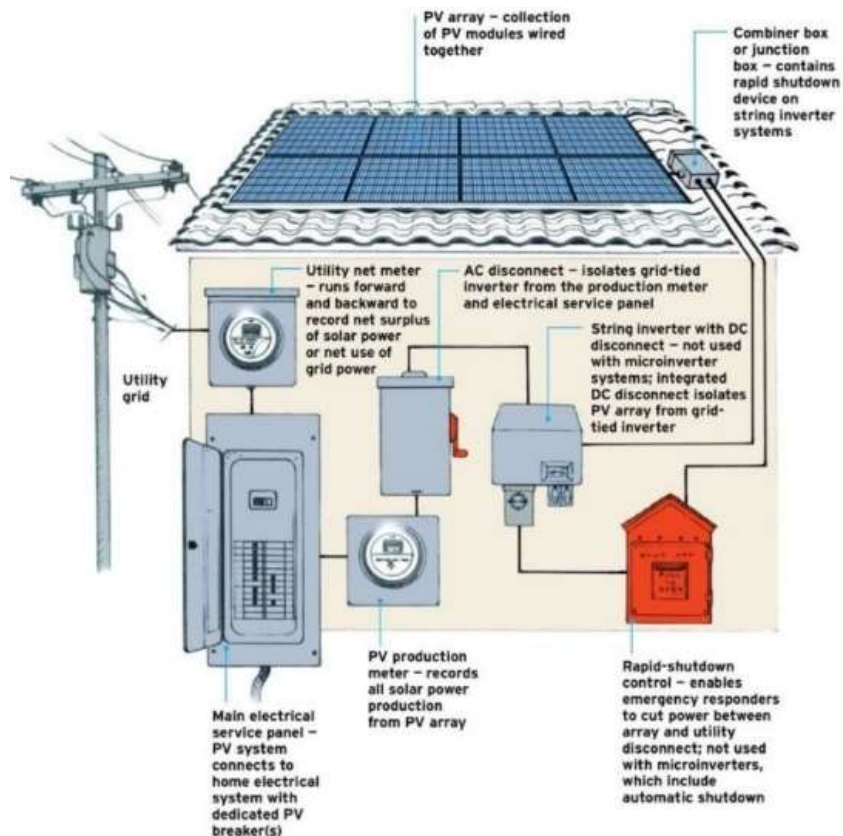


Ilustración 5 Esquema de un sistema conectado a la red [23].

Los sistemas conectados a la red pueden usar un inversor o inversores de cadena, que convierten la energía de CC a CA para un grupo de módulos fotovoltaicos a la vez, o microinversores, que convierten la energía de CC a CA en cada módulo individual.

Lo habitual es encontrar módulos de paneles fotovoltaicos conectados entre sí en serie y, a continuación, un **inversor de cadena**, que así se propone en este proyecto. Esto se debe a que esta configuración es la que obtiene un mayor rendimiento en condiciones de operación normales. Sin embargo, al estar conectados en serie tienen una desventaja, y es que su rendimiento estará determinado por el módulo fotovoltaico limitante, es decir, el que menor rendimiento tenga. Esto se debe a que la corriente que circula por las diferentes matrices fotovoltaicas ha de ser la misma, y el módulo que menos genere, es decir, el módulo con menor intensidad limitará la intensidad de la cadena de módulos. Este desajuste se produce, por ejemplo, cuando en un determinado momento un módulo fotovoltaico se encuentra sombreado. Otra desventaja es que desde el inicio se debe saber a qué tensión va a estar sometido el inversor, no es recomendable agregar posteriormente más módulos fotovoltaicos a la instalación ya que su dimensionamiento no será el adecuado [18] [24].

Otra configuración similar a la anterior es colocar **inversores DC-DC** en la salida de cada matriz fotovoltaica, todos ellos conectados en serie y, a continuación, un inversor de cadena para pasar de DC a AC. De esta manera, cada matriz fotovoltaica opera con su punto de máxima potencia y no se afecta de manera tan severa al rendimiento conjunto de todos los módulos, ya que no hay una matriz limitante. La desventaja de esta configuración es que aumenta la inversión y el gasto en gran medida, no siendo rentable si la disposición de los paneles está adecuadamente dimensionada y no se producen sombra entre ellos, evitándose los desajustes que disminuyen el rendimiento [18] [24].

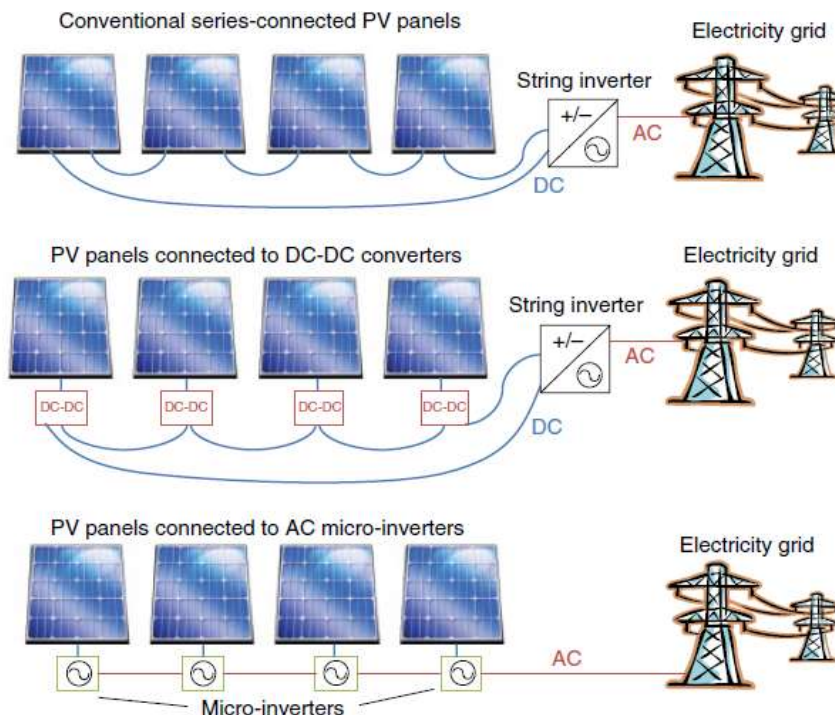


Ilustración 6. Diferentes configuraciones de inversores [18].

La última variación que se discutirá será la colocación de **micro-inversores** conectados a continuación de cada una de las matrices fotovoltaicas. Una ventaja de este tipo de sistemas es la escalabilidad, se pueden ir agregando más paneles fotovoltaicos junto con su respectivo micro-inversor posteriormente, no como en los anteriores casos donde había que dimensionar el inversor de cadena en función de la cantidad de potencia que se espera generar. Otra ventaja es que, si uno de los paneles tiene un defecto o recibe sombra, esta bajada del rendimiento sólo afectará a uno de los micro-inversores, no al resto. Sin embargo, de manera general no consiguen la misma eficiencia que los inversores en cadena, ni es una tecnología asentada ya que no se conoce estadísticamente su fiabilidad a largo plazo aún [18] [24].

4. Descripción de la industria a alimentar

Este proyecto tiene como objetivo diseñar una instalación fotovoltaica para autoconsumo en una nave industrial en Seseña (Toledo), con coordenadas 40.11° de latitud y -3.67° de longitud. Este complejo industrial pertenece a un parque de maquinaria donde se gestionan máquinas, equipos y se almacenan piezas de repuesto, además de tener oficinas.

De las cubiertas disponibles, se escogió la de máxima longitud. Esta elección se debe a que su superficie disponible es mayor ya que tiene unas dimensiones de 99 metros de largo por 21 de ancho. Además, la orientación de su cumbrera está prácticamente orientada respecto la dirección Norte-Sur, en concreto a 30° . Este ángulo se denomina **azimut**. Cuanto menor sea este ángulo, la nave estará más alineada con la dirección Norte-Sur, la cual es la más idónea para la colocación de las placas solares con el objetivo de maximizar la irradiación de luz solar a lo largo del día.

Para un mejor aprovechamiento de la luz solar, los paneles irán inclinados con respecto a la superficie donde se colocarán y se realizaron cálculos para determinar el espaciado

necesario entre paneles solares para que no se produzcan sombra entre ellos y baje el rendimiento de la instalación.



Ilustración 7. Vista aérea del Parque de Maquinaria en Seseña [25].

5. Metodología

Para simular el rendimiento esperado de nuestra instalación fotovoltaica, se hizo uso de una herramienta de la Comisión Europea llamada “**PhotoVoltaic Geographical Information System**” (PVGIS). Esta herramienta es una base de datos destinada a la investigación de recursos solares, estudios de desempeño fotovoltaico y la difusión de conocimiento y datos sobre energía solar. A continuación, se seleccionaron distintas opciones y se introdujeron parámetros para realizar la simulación de nuestra instalación en la localización especificada [26].

En primer lugar, se seleccionó la **base de datos** de radiación solar a utilizar. A continuación, se eligió la **tecnología fotovoltaica**, cuyo rendimiento dependerá de la temperatura, la radiación solar disponible y de la distribución espectral de esta. El siguiente parámetro a especificar fue la **potencia fotovoltaica** pico instalada en kWp. Otro parámetro importante son las **pérdidas estimadas** del sistema que hacen que la potencia disponible para el consumo sea inferior a la potencia producida por los módulos fotovoltaicos y, finalmente, las opciones de montaje. El **ángulo de azimut** estará fijado a -30° determinado por la orientación del edificio y en la herramienta PVGIS se marcó la opción de **optimizar la inclinación de las placas**, con el objetivo de obtener el valor óptimo de este parámetro.

A screenshot of the PVGIS web interface. The interface is in Spanish and shows the configuration for a solar system. On the left, there is a sidebar with navigation options: 'CONECTADO A RED', 'FV CON SEGUIMIENTO', 'FV AUTÓNOMO', 'DATOS MENSUALES', 'DATOS DIARIOS', 'DATOS HORARIOS', and 'TMY'. The main area is titled 'RENDIMIENTO DE UN SISTEMA FV CONECTADO A RED'. It contains several input fields and dropdown menus for configuring the system. The 'Base de datos de radiación solar*' is set to 'PVGIS-SARAH'. The 'Tecnología FV*' is set to 'Silicio cristalino'. The 'Potencia FV pico instalada [kWp]*' is set to 1. The 'Pérdidas sistema [%]*' is set to 14. Under 'Opciones de montaje fijo', the 'Posición de montaje*' is set to 'Posición libre'. The 'Inclinación [°]*' is set to 35 and the 'Azimut [°]*' is set to 0. There are checkboxes for 'Optimizar inclinación' and 'Optimizar inclinación y azimut'. At the bottom, there are input fields for 'Precio electricidad FV', 'Coste sistema FV [su divisa]', 'Interés [%/año]', and 'Vida útil [años]'. The interface is clean and professional, with a clear layout for data entry.

Ilustración 8. Panel de variables de la herramienta PVGIS [27].

En resumen, esta herramienta nos ofrece numerosos resultados de la simulación, como la irradiación solar mensual, la producción de energía, e incluso la inclinación ideal para el máximo aprovechamiento de la energía solar a lo largo de todo el año:

Datos proporcionados:		Resultados de la simulación:	
Localización [Lat/Lon]:	40.111, -3.668	Ángulo de inclinación [°]:	34 (opt)
Horizonte:	Calculado	Ángulo de azimut [°]:	-30
Base de datos:	PVGIS-SARAH	Producción anual FV [kWh]:	320551.51
Tecnología FV:	Silicio cristalino	Irradiación anual [kWh/m²]:	2049.25
FV instalada [kWp]:	200	Variación interanual [kWh]:	12594.48
Pérdidas sistema [%]:	14	Cambios en la producción debido a:	
		Ángulo de incidencia [%]:	-2.66
		Efectos espectrales [%]:	0.49
		Temperatura y baja irradiancia [%]:	-7.02
		Pérdidas totales [%]:	-21.79

Ilustración 9. Resultados de la simulación [27].

Tras la simulación se obtuvo un **ángulo de inclinación óptimo** de 34° para los paneles solares. Para realizar este cálculo, la herramienta maximizó el total de la producción de energía a lo largo de todos los meses del año en función de su base de datos.

Conocida la inclinación de los paneles solares, se tuvo en cuenta este factor para calcular la separación entre los mismos, y que no se generen sombra entre ellos. Para optimizar la mínima separación de los paneles, se partió de la situación más desfavorable donde se pueda producir sombra. Esto ocurre durante el solsticio de invierno (en el hemisferio norte), el 21 de diciembre, donde el ángulo de declinación es de -23.45°. A continuación, para conocer la **distancia mínima entre paneles** fue necesario realizar una serie de cálculos utilizando la latitud y los grados que el Sol se inclina (declinación), que tomará el valor de 23.45°.

Por tanto, el ángulo que nos interesa conocer es el formado por la sombra que queda tras los paneles, llamado **ángulo de sombra crítica**. Lo siguiente fue hallar la distancia mínima entre los paneles mediante una relación matemática obtenida por el Teorema del Seno.

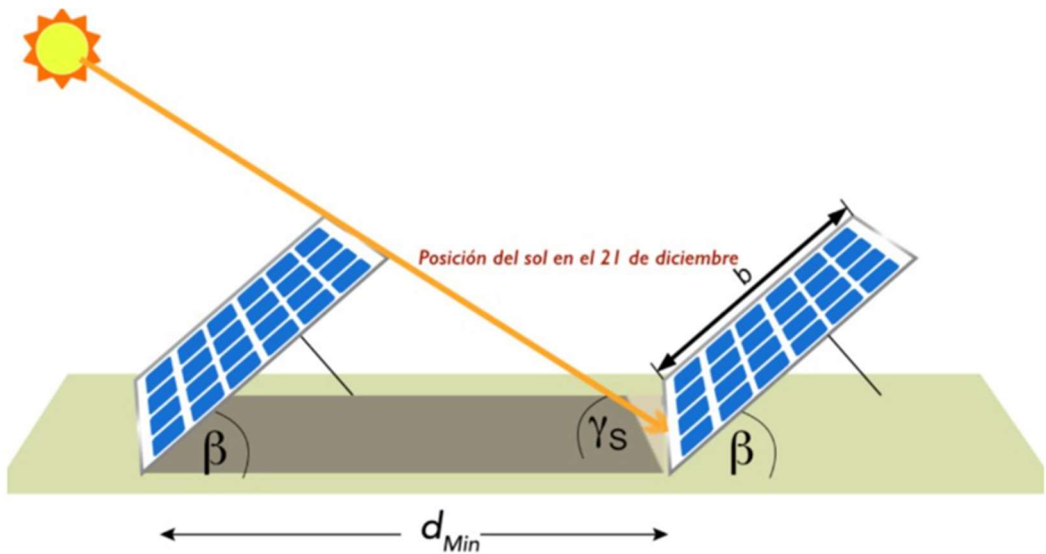


Ilustración 10. Representación distancia mínima entre paneles [28].

Los ángulos de sombra crítica y de inclinación óptima de los paneles ya los conocemos, son 26.44° y 34° , respectivamente. Por tanto, la única incógnita para calcular la distancia mínima entre paneles es la longitud del panel. Este parámetro se determinó más adelante donde previamente se definieron la instalación y los equipos, a partir de los cuáles se valoró la longitud óptima del panel dadas las necesidades de la industria, siempre teniendo en cuenta su disponibilidad en el mercado. Tras concretar dicha longitud, se obtuvo directamente la distancia mínima entre paneles [29].

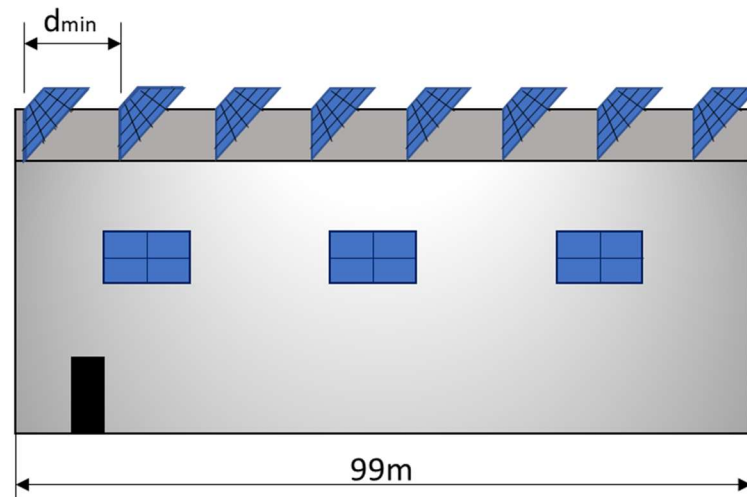


Ilustración 11. Boceto en perfil de la instalación indicando la distancia mínima entre los paneles.

Para dimensionar la instalación era imprescindible estudiar los consumos que se querían satisfacer y la potencia instalada de la que se dispone en el complejo industrial. Para el estudio se utilizaron los datos del año 2019, ya que en 2020 no se ha desarrollado una actividad normal en el complejo industrial debido a la pandemia del COVID-19. Cabe destacar que, durante el proyecto, el sistema tarifario eléctrico español se modificó en junio de 2021, pero como ya se había iniciado el proyecto utilizando los datos de 2019, el estudio de viabilidad se llevará a cabo con las tarifas de 2019.

De las facturas emitidas por la compañía eléctrica se extrajeron los siguientes consumos mensuales:

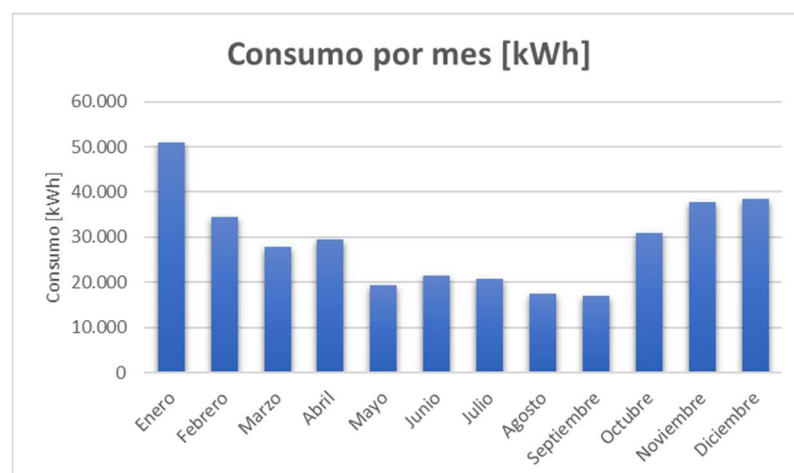


Ilustración 12. Consumos mensuales del complejo industrial en el año 2019.

Del **consumo mensual** se pudo concluir que era interesante instalar una potencia capaz de suplir como mínimo el consumo mensual de todos los meses de verano, donde el

consumo alcanza un mínimo. Así mismo, era interesante estudiar la posibilidad de sobredimensionar la instalación si el espacio disponible en la cubierta lo permitiese. De esta forma, además de suplir la totalidad del consumo mensual de los meses de verano, la instalación también sería capaz de suplir una mayor parte de la demanda producida en los meses de invierno con esta potencia instalada extra, meses cuya producción es menor debido a las condiciones meteorológicas y, por tanto, ayudaría tener más potencia instalada para generar más electricidad.

A parte de la energía total que se consume, es importante estudiar el **consumo medio por franja horaria**, es decir, la cantidad de energía que se va a consumir de media en cada hora. Estudiar este dato es muy importante debido a que con nuestra instalación queremos ser capaces suplir la demanda para no necesitar energía de la red, aunque sin sobredimensionar en exceso la instalación.

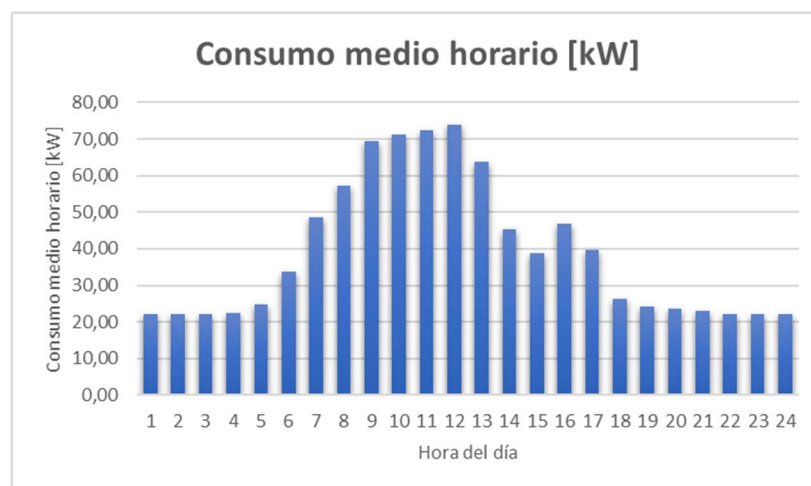


Ilustración 13. Consumo medio horario en 2019

En adición, la empresa dueña del parque de maquinaria pronostica un aumento del consumo en los próximos años debido a que está aumentando y renovando la flota de vehículos de la compañía con vistas a electrificar el parque automovilístico. Por ello, será necesario instalar puntos de recarga dentro del recinto y será necesario sobredimensionar la instalación y no quedarse corto en ningún caso.

6. Resultados y conclusiones

Para este proyecto, se opta por **módulos de silicio** debido a que es la tecnología más extendida y asequible del mercado. Estos módulos fotovoltaicos de silicio cristalino estándar ofrecen entre un 15% y un 20% de eficiencia. El tipo de células elegidas serán las **monocristalinas** con el objetivo de no renunciar a perder rendimiento de nuestra placa solar a pesar de que la inversión vaya a ser ligeramente mayor que con policristalinas. Concretamente se propone instalar el panel solar **ERA-Mono-PERC-400W**. [1] [2]

La **potencia total a instalar** es de **200 kWp**, distribuida en un total de **50 filas de paneles** a lo largo de los 99 metros de cubierta, con una cantidad de **10 paneles por fila**, 5 en cada agua de la cubierta. Con estos **500 paneles**, la energía total generada en un año se obtiene introduciendo todos los parámetros antes descritos en la herramienta de PVGIS. Y la producción de energía mensual esperada es la siguiente:

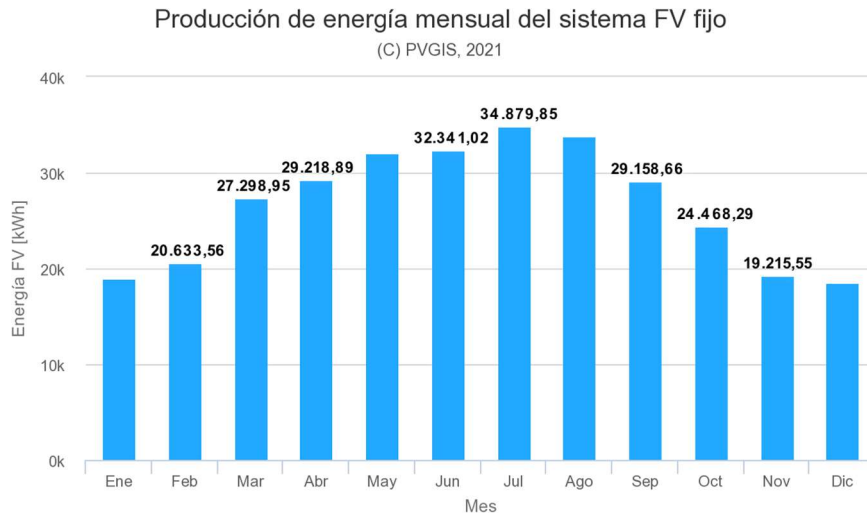


Ilustración 14. Producción mensual de energía esperada [27].

Para hallar el valor de potencia del inversor se tuvieron en cuenta los valores de tensiones e intensidades tanto máximas y mínimas que se producen en la instalación. Además, se estudiaron bajo diferentes condiciones de temperaturas ya que influirá en su valor.

Tras los cálculos realizados, se ha decidido instalar **5 inversores** (Solis-50K) de manera que se respeten los límites de tensiones y corrientes del modelo elegido, a la par que la potencia máxima no perjudique al rendimiento de la instalación. De esta manera, cada inversor se encargará de 10 filas de paneles solares, con 10 paneles cada fila. La potencia de cada inversor será de 60 kW, que en conjunto suman una potencia de 300 kW, mayor que la potencia total instalada de 200 kW. Estos inversores se alojarán en el interior de la nave industrial sobre la que están colocados los paneles solares.

En cuanto a la viabilidad del proyecto, se tendrán en cuenta los costes de la inversión inicial (145.528,67 €) y los gastos anuales de mantenimiento (864 € al año). En nuestro estudio de viabilidad, se asumirá como ingreso cada kWh autoconsumido, es decir, la cantidad de energía no compramos a la compañía eléctrica.

Costes Inversión Inicial	
Placas solares	67.697,07 €
Inversores	17.831,60 €
Bastidor	50.000,00 €
Mano de obra	10.000,00 €
TOTAL	145.528,67 €

Ilustración 15. Resumen del desglose de los costes totales de inversión.

Finalmente, se obtuvo un Valor Actual Neto (VAN) de 237.518,72 € con una tasa de descuento del 3,5%, y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 13,07% bajo un horizonte de 25 años. El periodo de recuperación de la inversión será 8 años, a partir de ahí se generarán ingresos.

RESULTADO FINANCIERO

VAN	237.518,72 €
TIR	13,07%
Pay-Back (años)	8

Ilustración 16. Resultado financiero.

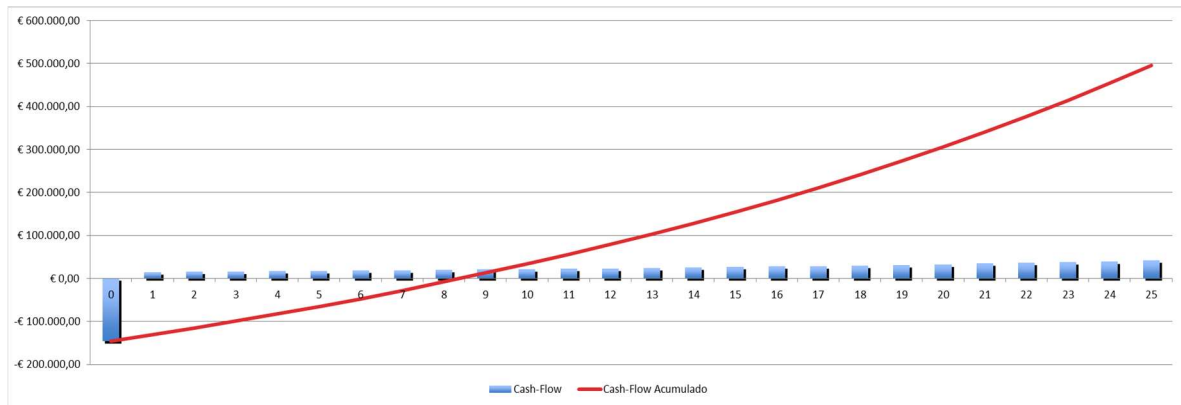


Ilustración 17. Evolución del cash-flow de la inversión a lo largo de los 25 años.

Como conclusión, merece la pena invertir en esta instalación de autoconsumo dado que se recuperará la inversión a los 8 años y, a partir de ese momento, generará ahorro a la empresa del parque de maquinaria.

7. Referencias

- [1] Acciona - Business as unusual, «Acciona Cambio Climático» 2020.
<https://www.acciona.com/es/cambio-climatico/>
- [2] Acciona, «Cómo evitar el Cambio Climático MUY RÁPIDO»
<https://www.youtube.com/watch?v=3X-Z0kMfh4M>
- [3] «World Economic Forum - The Global Risks Report 2020» 2020.
http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf
- [4] Iberdrola, «Estado de información no financiera. Informe de Sostenibilidad»
https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/corporativos/docs/IB_Informe_Sostenibilidad.pdf
- [5] Naciones Unidas «Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna» <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [6] Naciones Unidas, «Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019»
https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf
- [7] Naciones Unidas «Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles» <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- [8] Naciones Unidas «Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles»
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- [9] Naciones Unidas «Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos» <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [10] EALDE Business School «Todas las ventajas de la especialización en energías renovables»
<https://www.ealde.es/especializacion-energias-renovables/>

- [11] Entrepreneur «La transición energética como una lucha por el cambio climático» <https://www.entrepreneur.com/article/372960>
- [12] IRENA «Global trends dashboards» <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Global-Trends>
- [13] IRENA «Solar Costs» <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs>
- [14] Acciona «Energía Solar Fotovoltaica» <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>
- [15] Iberdrola - Autoconsumo Fotovoltaico «El auge del autoconsumo fotovoltaico, un aliado contra el cambio climático» <https://www.iberdrola.com/innovacion/autoconsumo-fotovoltaico>
- [16] M. Hilcu «Otovo - Autoconsumo fotovoltaico: Guía completa» 2021. <https://www.otovo.es/blog/autoconsumo/autoconsumo-fotovoltaico-todo-lo-que-ienes-que-saber/>
- [17] O. Planas «Energía Solar - ¿Qué es el silicio?» 10 Junio 2019. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/silicio>
- [18] A. Reinders, P. Verlinden, W. van Sark y A. Freundlich, Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications, John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [19] Prosumidores: Academia de las renovables «Sistemas de aprovechamiento de energía solar FV» <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/12/M%C3%B3dulo-2-Sistemas-de-aprovechamiento-de-energ%C3%ADa-solar-fv.pdf>
- [20] Ineldec «Partes panel solar» <https://ineldec.com/wp-content/uploads/2020/08/Partes-de-Panel-Solar.jpg>
- [21] AutoSolar «Autoconsumo fotovoltaico» <https://autosolar.es/blog/energia-solar-fotovoltaica/autoconsumo-fotovoltaico>
- [22] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía «Guía profesional de tramitación del autoconsumo» 2020. <https://www.idae.es/publicaciones/guia-profesional-de-tramitacion-del-autoconsumo>
- [23] Taypro Private Limited «PVWiki - Free solar photovoltaic education for all».
- [24] SotySolar «¿Qué inversor solar elegir para tu instalación de placas solares?» Abril 2021. <https://sotysolar.es/blog/que-son-los-inversores-fotovoltaicos>.
- [25] Google Maps «Google Maps» <https://www.google.es/maps/@40.1109681,-3.670129,486m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4>
- [26] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) «Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)» [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
- [27] Photovoltaics Geographical Information System (PVGIS) «PV Performance Tool» https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP
- [28] E. G. Vásquez «Centro de Capacitación Eléctrica y Energías Alternas (CCEEA) - La importancia de hacer un buen cálculo de sombras» <https://cceeaa.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/calculo-de-sombra-con-el-metodo-del-solsticio-de-invierno>
- [29] Monsolar «Calcular la separación entre filas de placas solares para evitar sombras» <https://www.monsolar.com/blog/calcular-la-separacion-entre-filas-de-placas-solares-para-evitar-sombras/>
- [30] Efimarket «¿Monocristalino o policristalino? ¿Necesitas ayuda para elegir placas solares?» Abril 2016. <https://www.efimarket.com/blog/monocristalino-o-policristalinonecesitas-ayuda-para-elegir-placas-solares/>

DESIGN OF A SELF-CONSUMPTION PHOTOVOLTAIC INSTALLATION FOR AN INDUSTRIAL WAREHOUSE IN SESEÑA (TOLEDO).

Author: Casero Lozano, Virgilio.

Supervisor: Fuertes Kronberg, Carlos.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

Photovoltaic self-consumption is one of the most useful tools to fight climate change and save money. In this project, a study will be carried out in an industry and the appropriate self-consumption system will be chosen. Next, all the elements necessary for its operation will be dimensioned and, finally, the viability of the project will be analyzed.

Keywords: Self-consumption, Photovoltaic, Renewable, Energy, Solar.

1. Introduction

Greenhouse gases are basically: carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), ozone (O₃), water vapor (H₂O) and chlorofluorocarbons (CFCs). These gases, provided they are in a suitable proportion, help the Earth's atmosphere to retain the heat of the Sun. This is the so-called **greenhouse effect**, without which we would not be able to live on Earth. However, an accelerated increase in temperature on Earth is taking place due to excess emissions of these gases, causing **climate change** [1] [2].

The **global warming** is due to the fact that carbon dioxide is being produced in large quantities, unbalancing the appropriate proportion of greenhouse gases. This excess CO₂ is mainly caused by the use of fossil fuels for the generation of electricity, transport, heating, industry and building, but is also caused by livestock farming, agriculture, and other actions carried out by the human being [1] [2].

The **World Economic Forum** has been publishing since 2008 a report on the risks that threaten humanity. In the report published in 2020, the top 5 risks in terms of probability are extreme weather, failure of climate action, natural disasters, loss of biodiversity and man-made disasters. All of them belong to the category of environmental disasters, which confirms the need to stop climate change urgently [3].

If climate change is not stopped, the Earth will suffer disastrous **consequences** that endanger the survival of flora and fauna, and even humans. Among the impacts of climate change, the melting of the ice mass at the poles stands out, causing floods. Also, problems related to the shortage of water in certain areas and therefore crop crisis, will consequently end in a shortage of food. On the other hand, torrential rains that cause overflowing of rivers and lakes. These last two, causing a massive migration and death of animal and plant species due to changes in ecosystems [1] [2].

In 2015, the UN approved the **2030 Agenda on Sustainable Development**, an opportunity for countries and their societies to embark on a new path to improve the lives of all, leaving no one behind. The Agenda has **17 Sustainable Development Goals**, of

which this project for a self-consumption photovoltaic installation will cover 4 of them: [4]

First, **goal number 7** based on **affordable, local and clean energy**. Access to electricity in the poorest countries has started to accelerate, energy efficiency continues to improve, and renewable energy is managing to expand rapidly [5] [6].

Secondly, it contributes to **goal number 11**, in such a way that **sustainable cities and communities** are promoted, to the extent that both the new and existing infrastructures are adapted to the increase in the population accompanied by the consequent energy demand. With self-consumption, losses that currently occur throughout the transport of energy will be saved and it will even save money on infrastructures for the transport of energy [7].

Third, it contributes to **goal number 12: responsible consumption and production**. Sustainable consumption and production are about doing more and better with less. It is about decoupling economic growth from environmental degradation, increasing resource efficiency. The aim of this project is to produce energy in a responsible way, promoting production and consumption at the local level, avoiding environmental degradation by obtaining energy in other less sustainable ways [8].

Finally, **goal number 13**, focused on **climate action**. By installing photovoltaic panels and self-consumption, it is intended to propose an alternative for energy production that reduces the levels of greenhouse gas production, more specifically carbon dioxide through a renewable source of energy [9].

2. State of art

The global implementation of **renewable energies** is key for the sustainable development of countries, since it allows generating electricity and boosting economies without harming the environment. In addition, renewable energies are increasingly competitive, their costs are steadily declining while the general trend in costs for fossil fuels is the opposite. This decrease in the price of renewable energy is a point in favor of the energy transition that is going to take place in the coming years [10] [11].

The following illustrations show that the costs of both installation and production in photovoltaic solar energy and wind energy are decreasing, positioning themselves as two of the best options to invest in renewable energy.

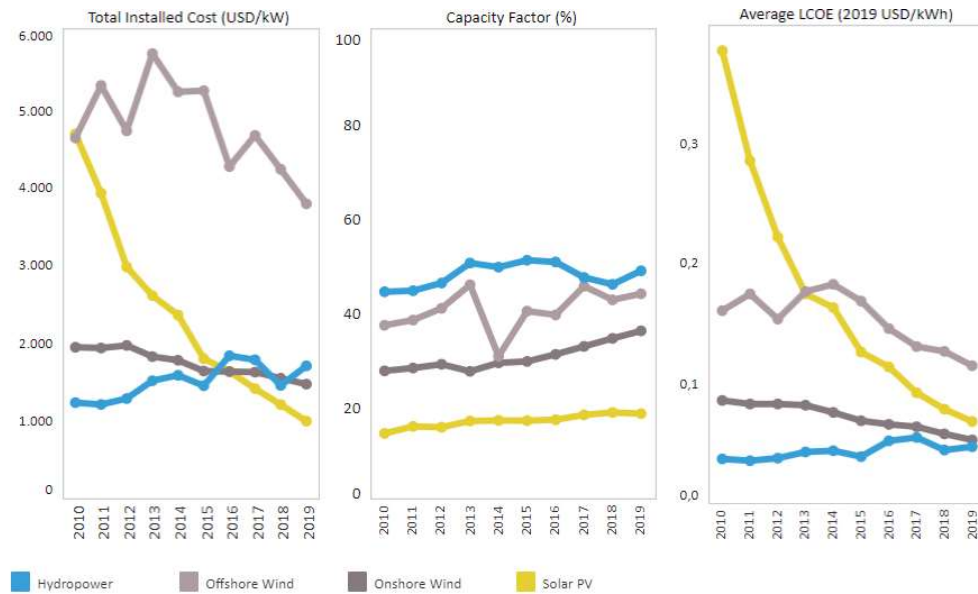


Figure 18. Overall weighted average total installation costs, capacity factor and LCOE 2010-2019 [12].

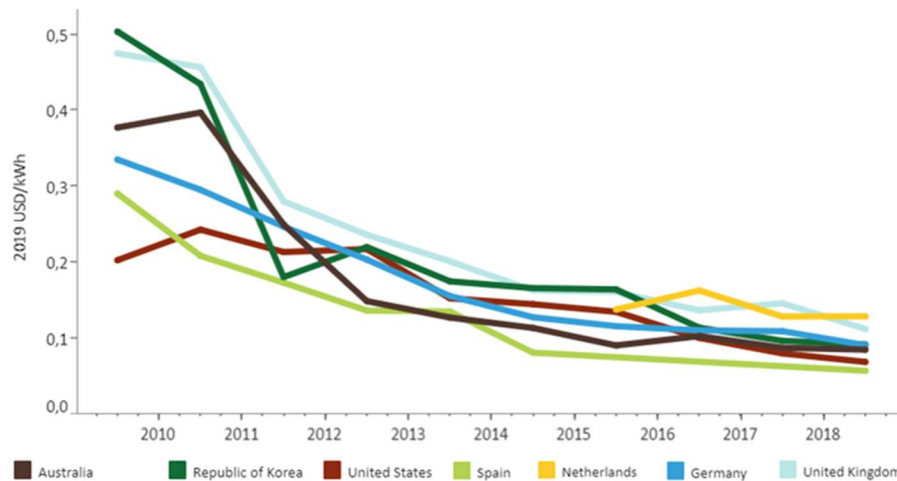


Figure 19. Weighted average of the LCOE of photovoltaic solar energy projects in different countries 2010-2019 [13].

In conclusion, the use of **solar energy** through photovoltaic technology, in addition to being increasingly competitive and economically affordable, has numerous advantages. Firstly, it is a **non-polluting energy** source since it does not emit toxic substances that can be very harmful to the environment and humans, although it does contaminate a small part in the manufacture of its components. Second, it contributes to **curbing climate change**, since it does not emit greenhouse gases that contribute to global warming. Of course, it is a **renewable energy** available throughout the world, whose exploitation allows the present development without risking future generations. Finally, it **generates wealth and local employment** [14].

One of the ways to take advantage of solar energy is through **photovoltaic self-consumption**. This is defined as the action by which an individual or a company produces its own electrical energy through solar panels for its own consumption. It should be noted that the energy is produced in photovoltaic generation facilities close to the point of consumption, otherwise it is meaningless [15] [16].

Self-consumption is a very economical long-term solution for electrical self-sufficiency. It has become very popular in Spain, since in our country we have approximately 300 days of sunshine, which means almost uninterrupted energy production throughout the year. Likewise, this technology not only saves money on electricity bills, but also contributes to curbing climate change [15] [16].

Photovoltaic energy is defined as the science of converting sunlight directly into electricity. For this, it needs solar panels, which contain solar cells that are mostly made up of layers of silicon, a semiconductor material with very favourable physical and chemical properties to promote the photovoltaic effect [17].

Its **operation** occurs as follows: When the photons of light reach the solar cell, they are absorbed by exciting electrons in the silicon layers, causing their movement and therefore causing the flow of electrons through a wiring circuit that feeds to the photovoltaic system. This movement of electrons is what generates electrical energy [18].

The electricity produced by the photovoltaic modules is generated in the form of direct current (DC). However, the electrical system that powers homes and industries uses alternating current (AC). Therefore, photovoltaic systems include inverters that convert DC electricity generated by solar energy into usable AC energy for homes and industries [18].

Photovoltaic systems have a series of electric solar modules, called a **photovoltaic array**. The modules of a matrix are usually connected in groups, which together form chains. The chains in series are joined in a connection box, which will be in a place close to the matrix, from which there is a wiring that carries the energy to the rest of the components of the system [18].

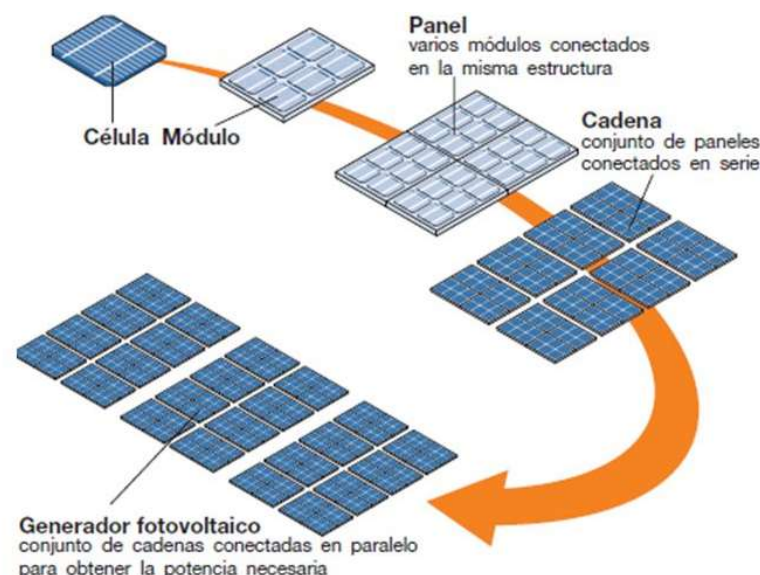


Figure 20. Formation of the photovoltaic array [19].

Photovoltaic panels are made up of different parts:

- **Frame:** it is the external structure in charge of holding all the layers of the solar panel together, which are described below [18].

- **Tempered glass:** it is the glass that protects the solar cells from dust, dirt and possible impacts. Likewise, it has anti-reflective properties to prevent the sun's rays from being reflected, causing the maximum possible absorption of solar rays to the panels [18].
- **Encapsulants:** there are two layers protecting the top and bottom of the solar cells. Its function is to hold the photovoltaic cells forming a sealing and insulating film around them, it also acts as a glue between the glass and the rear cover with the solar cells [18].
- **Solar cells:** the most common are made up of different layers of which silicon is the main and thickest, where photons are absorbed. The rest of the layers have anti-reflective and absorbent functions, in addition to facilitating the appearance of electron-hole pairs which will produce current with their movement, generating electrical energy [18].
- **Back cover:** This is responsible for holding the frame, tempered glass, solar cells and encapsulants together. Its function is also to reflect against the solar cells the photons with longer wavelengths that have not been absorbed in the first instance by the solar cells, thus increasing the absorption of energy [18].
- **Junction box:** This is the output of the solar panel. One end of the cable is connected to the buses that collect the wiring from the solar cell chains, while the other end of the cable is taken as the output of the plate [18].

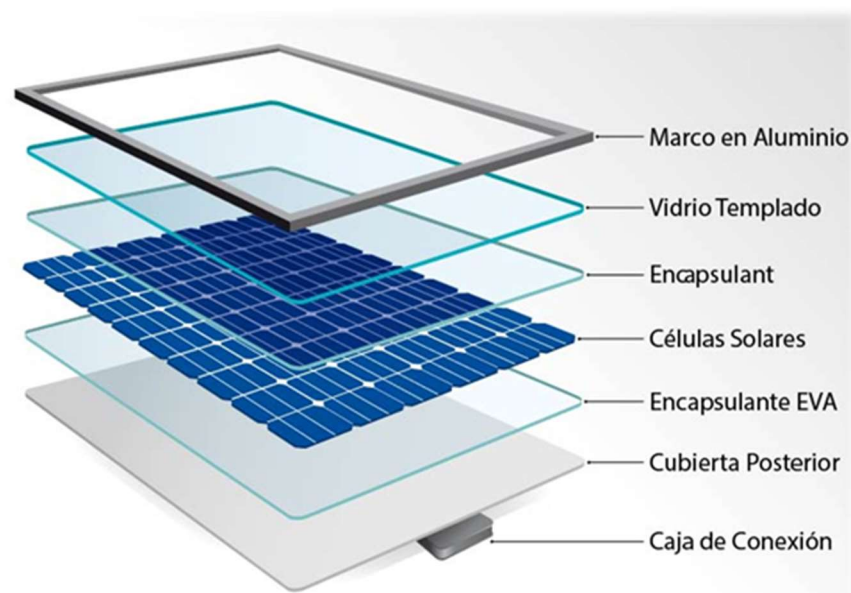


Figure 21. Componentes del panel solar [20].

In addition to the solar panels themselves, the photovoltaic self-consumption facilities are made up of other elements such as inverters, cables, connectors and, optionally, batteries.

- **Inverter:** it is the element in charge of converting DC, which is what photovoltaic panels produce, into AC that is used in domestic and industrial use [21].

- **Batteries:** they are responsible for storing all the electrical energy inside in order to use them when necessary. They are commonly used at night when there is no solar energy generation and when demand peaks occur [21].
- **Charge regulator:** the function of this element is to check the state of charge of the batteries in order to extend their useful life [21].

3. Project definition

One of the first decisions made was to decide the type of self-consumption photovoltaic system to install. For this project, a **grid-connected system without surpluses** was chosen. This system is the most common type, as well as the simplest and cheapest. The industry will therefore be connected to the photovoltaic self-consumption installation and to the electricity grid, producing two different situations:

In the first, the network is used as "storage", that is when the photovoltaic installation generates more energy than is consumed by the industry. As it is a facility without surpluses, it will have an anti-spill system that prevents the injection of surplus electricity into the network. If, on the other hand, it had been an installation with surpluses, this excess energy would be injected into the grid, compensating for that energy dumped through a compensation mechanism managed by the electricity companies, or through non-compensation, depending on a series of characteristics of the utility installation [22].

The second situation that can occur is that the network is used as a backup. When consumption is greater than the generation of the solar array, energy is automatically extracted from the grid.

Therefore, the reasons for opting for a **grid-connected system without surpluses and without batteries** are based on the decision of the company that owns the industrial warehouse, whose objective is to save on the electricity bill, not generate excessively and discharge to the network benefiting from it, so it prefers to avoid the formalities and bureaucracy necessary for it.

The main advantages of grid connected systems are simplicity, low cost and maintenance, making them a simple solution for homeowners who already use power from the public grid. On the other hand, being connected to the grid also involves disadvantages such as when the grid goes down, so does the photovoltaic system. This automatic shutdown function is required by utilities for grid connection for the safety of utility personnel working on power lines [23].

Next, a diagram of a system connected to the grid is shown, showing protection elements and meters for the energy produced by the solar panels and the energy consumed from the grid, in addition to the inverter.

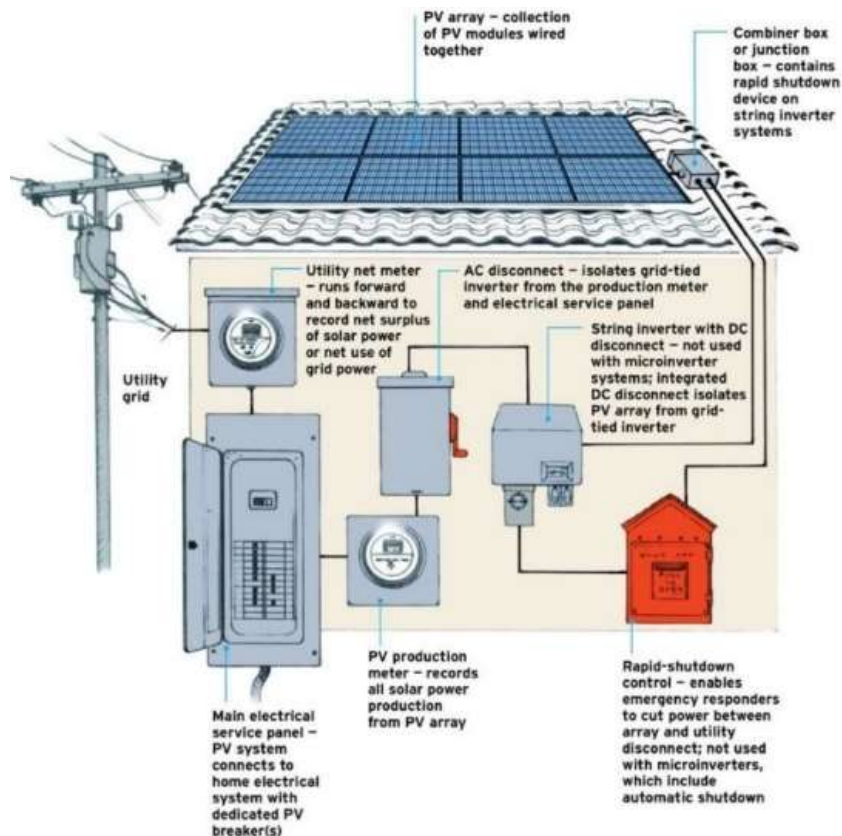


Figure 22. Scheme of a grid-tied PV system [23].

Grid-connected systems can use an inverter or string inverters, which convert power from DC to AC for a group of PV modules at a time, or microinverters, which convert power from DC to AC in each individual module.

The common practice is to find photovoltaic panel modules connected to each other in series and then a **string inverter**, which is thus proposed in this project. This is because this setting performs best under normal operating conditions. However, being connected in series have a disadvantage, their performance will be determined by the limiting photovoltaic module, that is the one with the lowest performance. This is because the current flowing through the different photovoltaic arrays must be the same, and the module that generates the least, that is the module with the lowest intensity, it will limit the intensity of the chain of modules. This mismatch occurs, for example, when at a certain moment a photovoltaic module is shaded. Another disadvantage is that from the beginning it is necessary to know what voltage the inverter is going to be subjected to. It is not advisable to add more photovoltaic modules to the installation later since their dimensioning will not be adequate [18] [24].

Another configuration similar to the previous one is to place **DC-DC inverters** at the output of each photovoltaic array, all of them connected in series, and then a string inverter to go from DC to AC. In this way, each photovoltaic array operates at its maximum power point and the overall performance of all modules is not affected so severely, since there is no limiting array. The disadvantage of this configuration is that it increases the initial investment, not being profitable if the arrangement of the panels is adequately dimensioned and there is no shading between them, avoiding mismatches that decrease performance [18] [24].

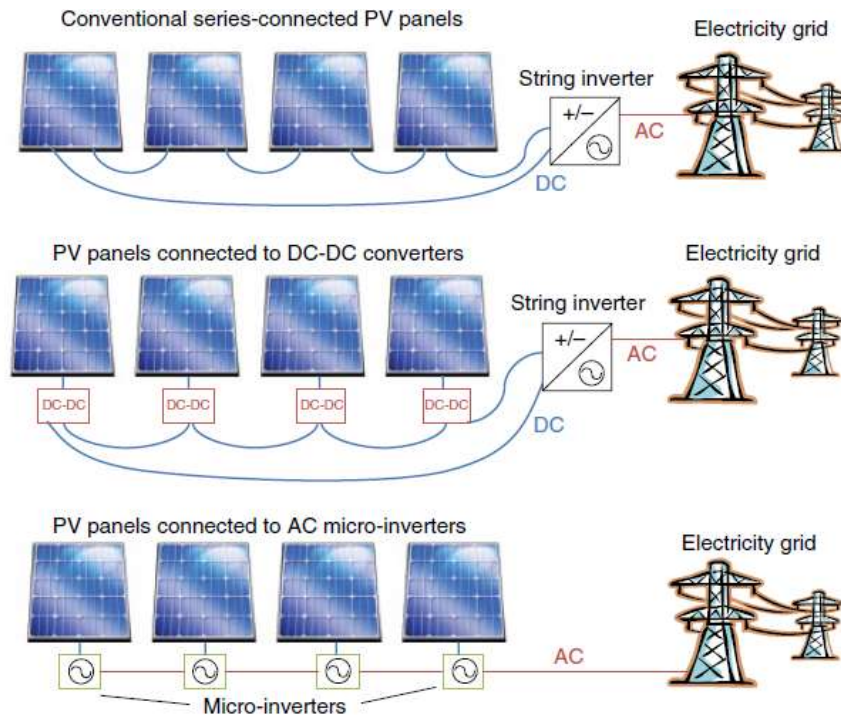


Figure 23. Different inverter configurations [18].

The last variation to be discussed will be the placement of **micro-inverters** connected after each of the photovoltaic arrays. An advantage of this system is the scalability, more photovoltaic panels can be added together with their respective micro-inverter later, not as in the previous cases where the string inverter had to be dimensioned based on the amount of power to be used. expects to generate. Another advantage is that, if one of the panels has a defect or is shaded, this drop in performance will only affect one of the micro-inverters, not the rest. However, in general they do not achieve the same efficiency as chain inverters, nor is it an established technology since its long-term reliability is not statistically known yet [18] [24].

4. Description of the industry

This project aims to design a photovoltaic installation for self-consumption in an industrial warehouse in Seseña (Toledo), with coordinates 40.11° latitude and -3.67° longitude. This industrial complex belongs to a machinery park where machines, equipment and spare parts are managed, as well as having offices.

Of the roofs available, the longest one was chosen. This choice is due to the fact that its available surface is greater since it has dimensions of 99 meters long by 21 meters wide. In addition, the orientation of its ridge is practically oriented with respect to the North-South direction, specifically at 30° . This angle is called the **azimuth**. The smaller this angle, the more aligned the warehouse with the North-South direction, which is the most suitable for the placement of solar panels in order to maximize the irradiation of sunlight throughout the day.

For a better use of sunlight, the panels will be inclined with respect to the surface where they will be placed, and calculations were made to determine the necessary spacing between solar panels so that they do not shade each other and lower the performance of the installation.

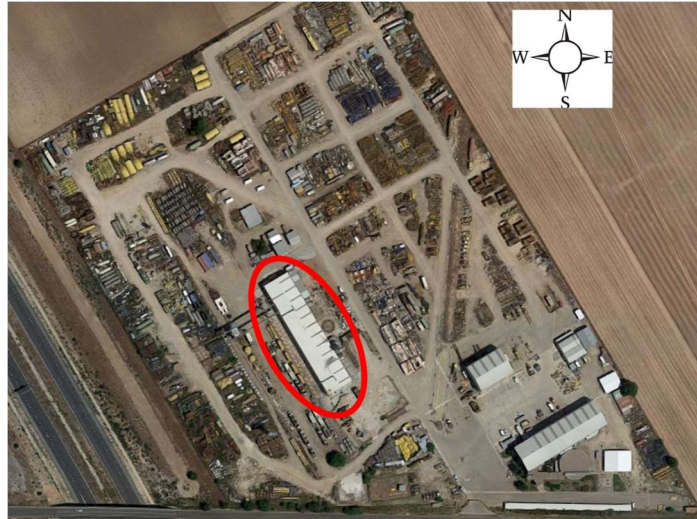


Figure 24. Aerial view of the industrial complex in Seseña [25].

5. Methodology

To simulate the expected performance of our photovoltaic installation, a tool from the European Commission called “**PhotoVoltaic Geographical Information System**” (**PVGIS**) was used. This tool is a database for solar resource research, photovoltaic performance studies and the dissemination of knowledge and data on solar energy. Next, different options were selected and parameters were filled to simulate our facility at the specified location [26].

First, the **solar radiation database** to be used was selected. Next, **photovoltaic technology** was chosen, whose performance will depend on the temperature, the available solar radiation and its spectral distribution. The next parameter to be specified was the **installed peak photovoltaic power** in kWp. Another important parameter is the **estimated losses** of the system that make the power available for consumption lower than the power produced by the photovoltaic modules and, finally, the mounting options. The **azimuth angle** will be fixed at -30° determined by the orientation of the building and in the PVGIS tool the option to optimize the **inclination of the panels** was marked, in order to obtain the optimal value of this parameter.

Figure 25. Dashboard of the PVGIS tool [27].

In summary, this tool offers us numerous simulation outcomes, such as monthly solar irradiation, energy production, and even the ideal inclination for the maximum use of solar energy throughout the year:

Datos proporcionados:		Resultados de la simulación:	
Localización [Lat/Lon]:	40.111, -3.668	Ángulo de inclinación [°]:	34 (opt)
Horizonte:	Calculado	Ángulo de azimut [°]:	-30
Base de datos:	PVGIS-SARAH	Producción anual FV [kWh]:	320551.51
Tecnología FV:	Silicio cristalino	Irradiación anual [kWh/m ²]:	2049.25
FV instalada [kWp]:	200	Variación interanual [kWh]:	12594.48
Pérdidas sistema [%]:	14	Cambios en la producción debido a:	
		Ángulo de incidencia [%]:	-2.66
		Efectos espectrales [%]:	0.49
		Temperatura y baja irradiancia [%]:	-7.02
		Pérdidas totales [%]:	-21.79

Figure 26. Simulation results [27].

After the simulation, an **optimal inclination angle** of 34 ° was obtained for the solar panels. To perform this calculation, the tool maximized the total energy production throughout all the months of the year based on its database.

Knowing the inclination of the solar panels, this factor was taken into account to calculate the separation between them, and that no shadow is generated between them. To optimize the minimum separation of the panels, we started from the most unfavorable situation where shade can occur. This occurs during the winter solstice (in the northern hemisphere), on December 21, where the declination angle is -23.45 °. Next, to know the **minimum distance between panels**, it was necessary to perform a series of calculations using latitude and the degrees that the Sun inclines (declination), which will take the value of 23.45 °.

Therefore, the angle that we are interested in knowing is the one formed by the shadow that remains behind the panels, called the **critical shadow angle**. The following was to find the minimum distance between the panels by means of a mathematical relationship obtained by the Sine Theorem.

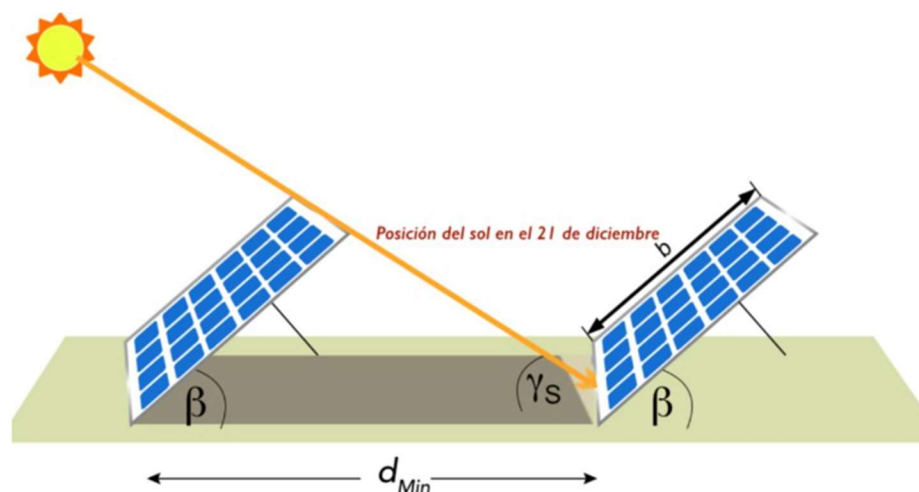


Figure 27. Minimum distance between panels [28].

We already know the critical shadow and optimal tilt angles of the panels, they are 26.44° and 34° , respectively. Therefore, the only unknown to calculate the minimum distance between panels is the length of the panel. This parameter was later determined where the installation and equipment were previously defined, from which the optimal length of the panel was valued given the needs of the industry, always taking into account its availability in the market. After specifying said length, the minimum distance between panels was obtained directly [29].

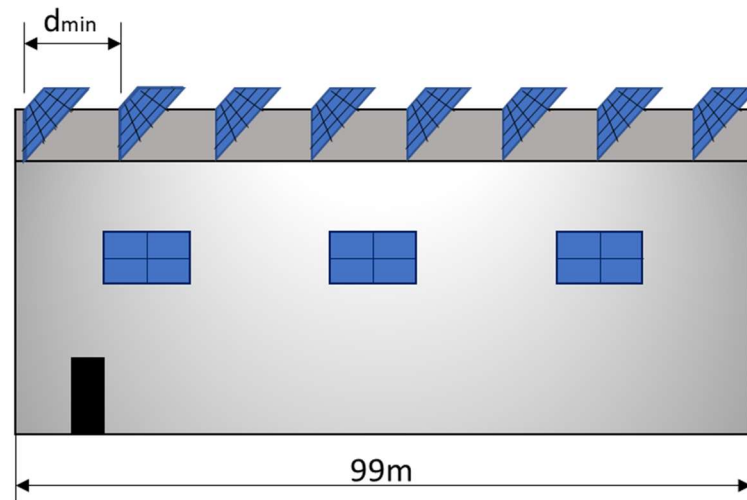


Figure 28. Sketch of the installation indicating the minimum distance between the panels.

To size the installation, it was essential to study the consumption to be satisfied and the installed power available in the industrial complex. For the study data from 2019 were used since in 2020 normal activity has not developed in the industrial complex due to the COVID-19 pandemic. It should be noted that, during the project, the Spanish electricity tariff system was modified in June 2021, but since the project had already started using the 2019 data, the feasibility study will be carried out with the 2019 rates.

The following monthly consumptions have been extracted from the invoices issued by the electricity company:

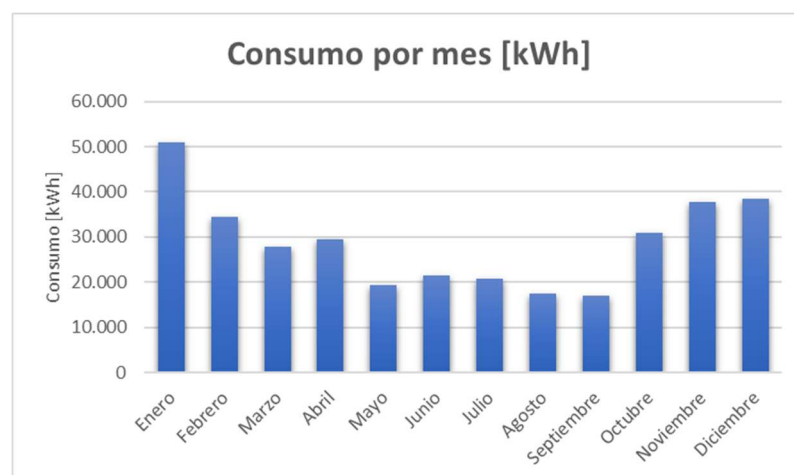


Figure 29. Monthly consumption of the industrial complex in 2019.

From the **monthly consumption** it was possible to conclude that it was interesting to install a power capable of supplying at least the monthly consumption of all the summer months, where the consumption reaches a minimum. Likewise, it was interesting to study the possibility of oversizing the installation if the space available on the roof allowed it. In this way, in addition to supplying all the monthly consumption in the summer months, the installation would also be able to supply a greater part of the demand produced in the winter months with this extra installed power, months whose production is lower due to weather conditions and, therefore it would help to have more installed power to generate more electricity.

Apart from the total energy consumed, it is important to study **the average consumption per hour**, that is the amount of energy that is going to be consumed on average in each hour. Studying this data is very important because with our installation we want to be able to meet the demand so as not to need energy from the network, although without excessively oversizing the installation.

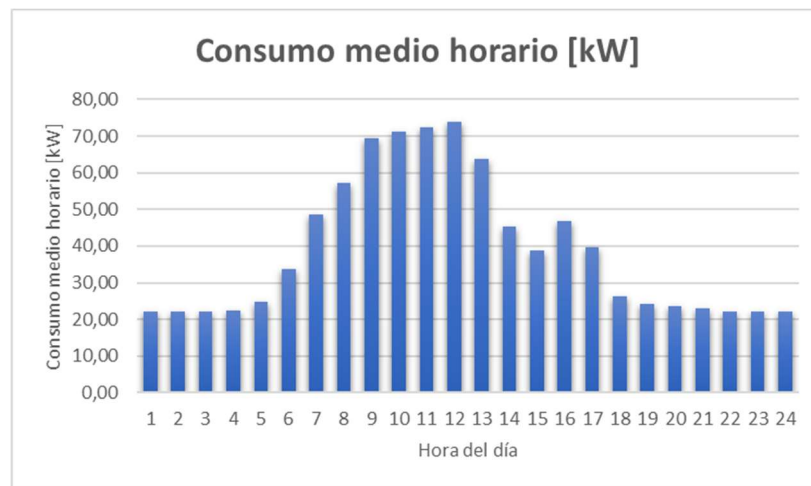


Figure 30. Average hourly consumption in 2019.

In addition, the company that owns the industrial complex predicts an increase in consumption in the coming years due to the fact that the company's fleet of vehicles is increasing and renewing to electrifying the vehicles. For this reason, it will be necessary to install charging points within the enclosure and it will be necessary to oversize the installation and not fall short in any case.

6. Results and conclusions

For this project, **silicon modules** are chosen because it is the most widespread and affordable technology on the market. These standard crystalline silicon photovoltaic modules offer 15-20% efficiency. The type of cells chosen will be **monocrystalline** with the aim of not giving up losing performance of our solar panel despite the fact that the investment will be slightly higher than with polycrystalline. Specifically, it is proposed to install the **ERA-Mono-PERC-400W solar panel** [59] [90].

The **total power to be installed is 200 kWp**, distributed in a total of **50 rows of panels** along the 99 meters of roof, with a quantity of **10 panels per row**, 5 in each water of the roof. With these **500 panels**, the total energy generated in a year is obtained by entering all

the parameters described above in the PVGIS tool. And the expected monthly energy production is as follows:

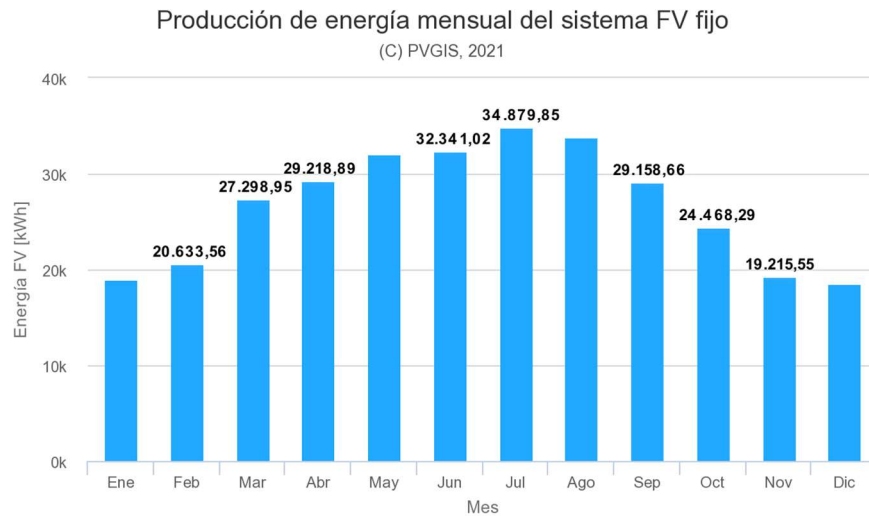


Figure 31. Expected monthly energy production [27].

To size the inverter, the values of voltages and currents both maximum and minimum that occur in the installation were taken into account. In addition, they were studied under different temperature conditions since it will influence their value.

After the calculations carried out, it has been decided to install **5 inverters (Solis-50K)** in such a way that the limits of voltages and currents of the chosen model are respected, while the maximum power does not affect the performance of the installation. In this way, **each inverter will handle 10 rows of solar panels, with 10 panels each row. The power of each inverter will be 60 kW**, which together add up to a power of 300 kW, greater than the total installed power of 200 kW. These inverters will be placed inside the industrial warehouse on which the solar panels are placed.

Regarding the viability of the project, the costs of the initial investment (€ 145,528.67) and the annual maintenance costs (€ 864 per year) will be taken into account. In our feasibility study, each kWh self-consumed will be assumed as income, that is the amount of energy we do not buy from the electricity company.

Costes Inversión Inicial	
Placas solares	67.697,07 €
Inversores	17.831,60 €
Bastidor	50.000,00 €
Mano de obra	10.000,00 €
TOTAL	145.528,67 €

Figure 32. Summary of the total investment costs.

Finally, a Net Present Value (NPV) of € 237,518.72 was obtained with a discount rate of 3.5%, and an Internal Rate of Return (IRR) of 13.07% under a horizon of 25 years. The investment recovery period will be 8 years, from there income will be generated.

RESULTADO FINANCIERO	
VAN	237.518,72 €
TIR	13,07%
Pay-Back (años)	8

Figure 33. Financial results.

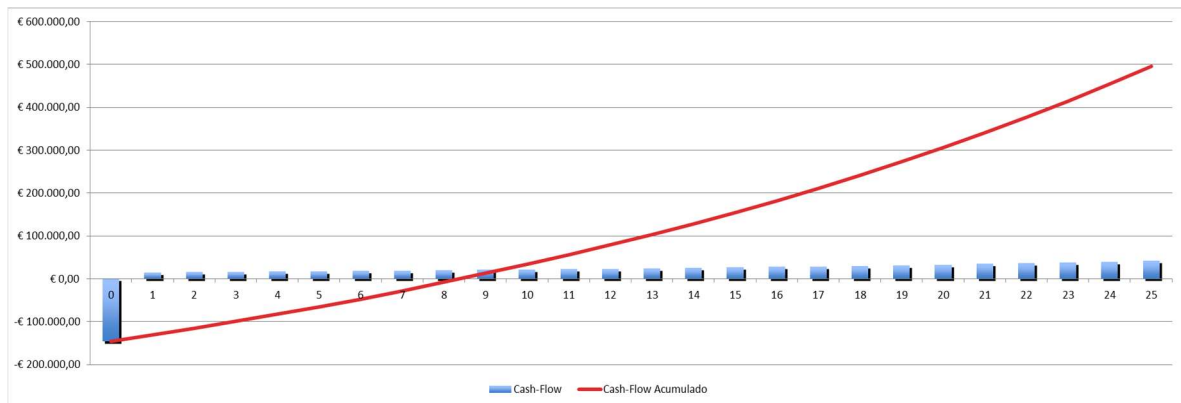


Figure 34. Evolution of investment cash-flow over 25 years.

In conclusion, it is worth investing in this self-consumption installation since the investment will be recovered after 8 years and from that moment it will generate savings for the company.

7. References

- [1] Acciona - Business as unusual, «Acciona Cambio Climático» 2020. <https://www.acciona.com/es/cambio-climatico/>
- [2] Acciona, «Cómo evitar el Cambio Climático MUY RÁPIDO» <https://www.youtube.com/watch?v=3X-Z0kMfh4M>
- [3] «World Economic Forum - The Global Risks Report 2020» 2020. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf
- [4] Iberdrola, «Estado de información no financiera. Informe de Sostenibilidad» https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/corporativos/docs/IB_Informe_Sostenibilidad.pdf
- [5] Naciones Unidas «Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna» <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [6] Naciones Unidas, «Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019» https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf
- [7] Naciones Unidas «Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles» <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- [8] Naciones Unidas «Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles» <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- [9] Naciones Unidas «Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos» <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [10] EALDE Business School «Todas las ventajas de la especialización en energías renovables» <https://www.ealde.es/especializacion-energias-renovables/>
- [11] Entrepreneur «La transición energética como una lucha por el cambio climático» <https://www.entrepreneur.com/article/372960>

- [12] IRENA «Global trends dashboards» <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Global-Trends>
- [13] IRENA «Solar Costs» <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs>
- [14] Acciona «Energía Solar Fotovoltaica» <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>
- [15] Iberdrola - Autoconsumo Fotovoltaico «El auge del autoconsumo fotovoltaico, un aliado contra el cambio climático» <https://www.iberdrola.com/innovacion/autoconsumo-fotovoltaico>
- [16] M. Hilcu «Otovo - Autoconsumo fotovoltaico: Guía completa» 2021. <https://www.otovo.es/blog/autoconsumo/autoconsumo-fotovoltaico-todo-lo-que-ienes-que-saber/>
- [17] O. Planas «Energía Solar - ¿Qué es el silicio?» 10 Junio 2019. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/silicio>
- [18] A. Reinders, P. Verlinden, W. van Sark y A. Freundlich, Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications, John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [19] Prosumidores: Academia de las renovables «Sistemas de aprovechamiento de energía solar FV» <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/12/M%C3%B3dulo-2-Sistemas-de-aprovechamiento-de-energ%C3%ADa-solar-fv.pdf>
- [20] Ineldec «Partes panel solar» <https://ineldec.com/wp-content/uploads/2020/08/Partes-de-Panel-Solar.jpg>
- [21] AutoSolar «Autoconsumo fotovoltaico» <https://autosolar.es/blog/energia-solar-fotovoltaica/autoconsumo-fotovoltaico>
- [22] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía «Guía profesional de tramitación del autoconsumo» 2020. <https://www.idae.es/publicaciones/guia-profesional-de-tramitacion-del-autoconsumo>
- [23] Taypro Private Limited «PVWiki - Free solar photovoltaic education for all».
- [24] SotySolar «¿Qué inversor solar elegir para tu instalación de placas solares?» Abril 2021. <https://sotysolar.es/blog/que-son-los-inversores-fotovoltaicos>.
- [25] Google Maps «Google Maps» <https://www.google.es/maps/@40.1109681,-3.670129,486m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4>
- [26] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) «Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)» [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
- [27] Photovoltaics Geographical Information System (PVGIS) «PV Performance Tool» https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP
- [28] E. G. Vásquez «Centro de Capacitación Eléctrica y Energías Alternas (CCEEA) - La importancia de hacer un buen cálculo de sombras» <https://ccee.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/calculo-de-sombra-con-el-metodo-del-solsticio-de-invierno>
- [29] Monsolar «Calcular la separación entre filas de placas solares para evitar sombras» <https://www.monsolar.com/blog/calcular-la-separacion-entre-filas-de-placas-solares-para-evitar-sombras/>
- [30] Efimarket «¿Monocristalino o policristalino? ¿Necesitas ayuda para elegir placas solares?» Abril 2016.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Cambio Climático.....	11
1.1 Gases de Efecto Invernadero	11
1.2 Incidencia del hombre en el cambio climático	13
1.3 Riesgos del Cambio Climático	14
1.4 Consecuencias del cambio climático.....	17
1.5 Cómo evitar el cambio climático.....	19
Capítulo 2. Objetivos Desarrollo Sostenible (ODS)	21
Capítulo 3. Energías Renovables	27
3.1 Crecimiento de las Energías Renovables	28
3.2 Evolución de los Costes de las Energías Renovables.....	29
3.3 Energía Solar	31
3.3.1 Ventajas de la Energía Solar.....	31
3.3.2 Tipos de Paneles Solares.....	32
3.4 Energía Eólica	34
3.4.1 Ventajas de la Energía Eólica.....	34
3.4.2 Componentes	35
3.5 Repartición de Energías Renovables y Energías Fósiles en España	37
Capítulo 4. Energía Solar Fotovoltaica.....	41
4.1 Energía Solar Fotovoltaica en el Mundo	41
4.2 Energía Solar Fotovoltaica en España.....	43
4.3 Proyectos Futuros.....	44
4.4 Regulación en España	46
4.5 Autoconsumo Fotovoltaico	46
4.6 Funcionamiento	46
4.7 Componentes Principales de un Sistema Fotovoltaico.....	48
4.8 Clasificación de Sistemas Fotovoltaicos de Autoconsumo	50
4.8.1 Sistemas Conectados a la Red.....	50
4.8.2 Sistemas Conectados a la Red con Baterías.....	52
4.8.3 Sistemas Aislados	53

4.8.4 Sistemas Conmutados con la Red.....	54
4.9 Obstáculos a los que se enfrenta el Autoconsumo	54
4.10 Regulación en España del Autoconsumo	55
4.10.1 Autoconsumo Sin Excedentes	56
4.10.2 Autoconsumo con excedentes	56
Capítulo 5. Descripción de la industria a alimentar	61
5.1 Factores a tener en cuenta para el dimensionamiento	63
5.2 Consumos de la instalación	71
Capítulo 6. Elementos del Sistema de Autoconsumo	77
6.1 Panel Solar.....	77
6.1.1 Potencia Nominal.....	77
6.1.2 Tolerancia de potencia	81
6.1.3 Coeficientes de temperatura.....	81
6.1.4 Fabricante y garantía.....	83
6.1.5 Eficiencia de la celda solar	84
6.1.6 Tipo de célula solar	86
6.1.7 Tensión y número de células	91
6.1.8 Elección de los módulos fotovoltaicos.....	91
6.2 Baterías.....	97
6.2.1 Tipo.....	97
6.2.2 Mantenimiento.....	98
6.2.3 Tamaño.....	98
6.2.4 Capacidad	98
6.2.5 Ciclo de vida.....	98
6.3 Inversor.....	100
6.3.1 Funciones del inversor	100
6.3.2 Tipos de inversores.....	101
6.3.3 Parámetros del inversor.....	103
6.3.4 Dimensionamiento y elección del inversor.....	106
6.4 Bastidor	111
6.4.1 Diseño de soportes para tejados inclinados.....	112
6.4.2 Diseño de soportes para suelo	114

6.4.3 Elección del bastidor	115
Capítulo 7. Viabilidad del proyecto	117
Capítulo 8. Bibliografía.....	123
ANEXO I: Análisis de Viabilidad	137
ANEXO II: Planos.....	141
ANEXO III: Fichas Técnicas	145

Índice de figuras

Figura 1. Porcentaje de gases de efecto invernadero en la atmósfera.	12
Figura 2. Explicación gráfica del efecto invernadero [5].	13
Figura 3. Evolución niveles de concentración de CO ₂ en la atmósfera [6].	14
Figura 4. Perspectivas de aumento del porcentaje de riesgo a corto plazo para el año 2020 [8].	15
Figura 5. Top 10 de perspectivas de aumento del probabilidad de ocurrir e impacto de riesgo a largo plazo [8].	15
Figura 6. Panorama de riesgos globales en cuanto a impacto y probabilidad en 2020 [8]. ..	16
Figura 7. Mapa de interconexiones de los riesgos globales de 2020 [8].	17
Figura 8. Población mundial proyectada [10].	18
Figura 9. Principales cumbres climáticas y sus hitos [11].	20
Figura 10. Objetivos Desarrollo Sostenible [12].	21
Figura 11. Objetivos claves para 2030 en materia de descarbonización [13].	22
Figura 12. Proporción de población con acceso a electricidad, 2000 y 2017 [15].	23
Figura 13. Generación eléctrica de energías tanto renovables como fósiles a lo largo de los últimos años y previsión de los próximos años [25].	27
Figura 14. Generación de energía eléctrica de origen renovable [27] [28].	28
Figura 15. Nuevas incorporaciones a la generación de electricidad con energías renovables [26] [27].	28
Figura 16. Costes totales medios ponderados globales de instalación, factor de capacidad y LCOE 2010-2019 [33].	30
Figura 17. Promedio ponderado del LCOE de proyectos de energía solar fotovoltaica encargados por país 2010-2019 [34].	30
Figura 18. Promedio ponderado del LCOE de proyectos eólicos terrestres encargados por país 1980-2019 [35].	31
Figura 19. Panel fotovoltaico [39].	33

Figura 20. Panel solar térmico de captador plano [40].	33
Figura 21. Panel solar térmico de captador de tubos [41].	34
Figura 22. Partes de un aerogenerador [45].	36
Figura 23. Tipos de potencia eléctrica instalada en España a 31-12-2019 [46] [47].	37
Figura 24. Evolución de la potencia instalada renovable en MW en España [46] [47].	38
Figura 25. Evolución generación renovable y no renovable, y emisiones CO ₂ asociadas a la generación eléctrica. Sistema eléctrico nacional [46] [47].	38
Figura 26. Evolución de la generación de energía renovable. Sistema eléctrico nacional [46] [47].	39
Figura 27. Fuentes de generación de energía eléctrica en España en 2019 [46] [47].	39
Figura 28. Tipos de generación anual de energía renovable en 2019 en España [46] [47].	40
Figura 29. Potencia instalada de energía solar en todo el mundo [52].	42
Figura 30. Potencia solar fotovoltaica instalada. Sistema eléctrico nacional [46].	43
Figura 31. Generación solar fotovoltaica. Sistema eléctrico nacional (GWh) [46].	44
Figura 32. Planta fotovoltaica Núñez de Balboa [56].	45
Figura 33. Formación de la matriz fotovoltaica [61].	47
Figura 34. Componentes del panel solar [62].	49
Figura 35. Esquema de un sistema conectado a la red [65].	51
Figura 36. Sistema conectado a la red con baterías [65].	52
Figura 37. Esquema de un sistema aislado de la red [65].	53
Figura 38. Cuadro resumen de las modalidades y las diferentes posibilidades de autoconsumo [72].	58
Figura 39. Resumen de las etapas de tramitación y organismos/entidades implicados [72].	59
Figura 40. Vista aérea del Parque de Maquinaria en Seseña [74].	61
Figura 41. Ángulo azimut [75].	62
Figura 42. Localización de la nave industrial en el mapa de la herramienta PVGIS [75].	63
Figura 43. Panel de variables de la herramienta PVGIS [75].	64
Figura 44. Resultados de la simulación [75].	65
Figura 45. Representación del ángulo de inclinación [75].	66

Figura 46. Irradiación mensual sobre plano fijo obtenido de la simulación [75].	66
Figura 47. Incidencia de los rayos solares durante el solsticio de invierno (hemisferio norte) [80].	67
Figura 48. Ángulos de latitud [81].	67
Figura 49. Representación incidencia del Sol [80].	68
Figura 50. Obtención gráfica de la suma de ángulos de latitud y declinación.	68
Figura 51. Representación distancia mínima entre paneles [82].	69
Figura 52. Boceto en planta de la instalación indicando la distancia mínima entre las columnas de paneles.	70
Figura 53. Boceto en perfil de la instalación indicando la distancia mínima entre los paneles.	71
Figura 54. Consumos mensuales del complejo industrial en el año 2019.	72
Figura 55. Consumos mensuales y total del año 2019.	73
Figura 56. Consumo medio horario por día en 2019.	74
Figura 57. Consumo medio horario en 2019.	74
Figura 58. Diferentes AM utilizados para el estudio de energía solar [1].	78
Figura 59. Modelo de la célula solar simplificado a un diodo [1].	78
Figura 60. Curva I-V de las celdas solares [1].	79
Figura 61. Ecuación del factor de forma.	79
Figura 62. Curva I-V en función de diferentes irradiancias para un módulo de 370W [85].	80
Figura 63. Curva de potencia en función de diferentes irradiancias para un módulo de 370W [85].	80
Figura 64. Conexión de las celdas fotovoltaicas [80].	81
Figura 65. Corriente - Tensión en función de la temperatura [87].	83
Figura 66. Comportamiento esperado de la potencia durante los 25 primeros años [88].	84
Figura 67. Eficiencias de los distintos tipos de celdas solares [89].	85
Figura 68. Ley de Beer-Lambert	86
Figura 69. Representación gráfica de la ley de Beer-Lambert [80].	87

Figura 70. Coeficiente de absorción para células cristalinas de Silicio (c-Si) y thin film en función de la longitud de onda [90].	88
Figura 71. Distribución de la energía en función del band gap [80].	89
Figura 72. Eficiencia máxima posible según Shockley-Queisser en función del band gap [80].	89
Figura 73. Panel monocristalino a la izquierda, y policristalino a la derecha [2].	91
Figura 74. Dimensiones del panel solar ERA-Mono-PERC-400W.	92
Figura 75. Especificaciones del panel solar ERA-Mono-PERC-400W.	93
Figura 76. Características del panel solar ERA-Mono-PERC-400W.	94
Figura 77. Gráfica Intensidad-Tensión y Potencia-Tensión para temperatura constante del módulo de 25°C e irradiancia variable (eje vertical derecho).	94
Figura 78. Gráfica Intensidad-Tensión a temperatura variable e irradiancia constante de 1000 W/m ² .	95
Figura 79. Tabla características panel solar ERA-Mono-PERC-400W.	95
Figura 80. Datos proporcionados y resultados de la simulación [76].	96
Figura 81. Producción mensual de energía esperada [76].	96
Figura 82. Relación entre la capacidad de la batería y el número de ciclos en función de la profundidad de descarga [93].	99
Figura 83. Comparativa entre diferentes tecnologías de baterías [1].	99
Figura 84. Punto de Máxima Potencia (MPP) en función de la intensidad y voltaje [1].	100
Figura 85. Diferentes configuraciones de inversores [1].	101
Figura 86. Potencia limitante del inversor [80].	104
Figura 87. Perfil de irradiancia en julio [76].	104
Figura 88. Ejemplo de eficiencia de un inversor en función de su carga [80].	105
Figura 89. Tabla de datos del inversor Solis-50K.	110
Figura 90. Unión entre la superficie y el bastidor [65].	112
Figura 91. Fijación de los rieles del bastidor en techos metálicos corrugados.	113
Figura 92. Fijación de los rieles del bastidor en un techo con tejas.	113
Figura 93. Montaje de la matriz solar sin rieles [95].	114
Figura 94. Estructura de panel solar instalado sobre el suelo [65].	115

Figura 95. Placa solar instalada horizontalmente en el soporte [96].	116
Figura 96. Estructura regulable 30°-35° CH915 [97].	116
Figura 97. Extracto de la factura de noviembre de 2019, con los precios de cada uno de los períodos.	118
Figura 98. Resultado financiero.	120
Figura 99. Evolución del cash-flow de la inversión a lo largo de los 25 años.	120

Índice de tablas

Tabla 1. Coeficientes de temperatura para paneles solares de silicio [1].	82
Tabla 2. Resultados de tensión e intensidad necesarios para dimensionar el inversor.	110
Tabla 3. Ponderación del consumo en cada franja tarifaria.	117
Tabla 4. Tabla resumen de los costes de la inversión inicial.	119

Capítulo 1. CAMBIO CLIMÁTICO

En primer lugar, hay que explicar dos conceptos muy parecidos que, a menudo, se interpretan de manera errónea como sinónimos: el **calentamiento global** y el **cambio climático**. La diferencia se encuentra en que el calentamiento global es la causa del cambio climático. “Esto significa que el aumento de la temperatura en la Tierra está provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera procedentes en su mayoría por la acción del ser humano, lo que produce variaciones en el clima que no ocurrirían de manera natural, desencadenando graves consecuencias en los sistemas físicos, biológicos y humanos” [3] [4].

La Tierra ya ha sufrido ciclos de calentamiento y enfriamiento en otras ocasiones de forma natural, sin embargo, estos ciclos se habían producido de una forma más gradual necesitando millones de años, mientras que ahora estamos alcanzando niveles que en otras épocas provocaron una masacre conocida como la “Gran muerte” donde desaparecieron el 95% de las especies que habitaban el planeta. Por tanto, la clave es la velocidad con la que se producen estas variaciones de temperatura en los ciclos [3] [4].

En uno de los esfuerzos realizados para combatir el cambio climático, se firmó el acuerdo de París. Este acuerdo fue firmado por 190 países con el objetivo de reducir, pero no menciona en ningún caso evitar el cambio climático, dado que no se puede evitar el cambio climático [3] [4].

1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO

Los gases de efecto invernadero son básicamente: Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido nitroso (N_2O), Ozono (O_3), vapor de agua (H_2O) y Clorofluorocarbonos (CFC). Estos gases siempre que se encuentren en proporción adecuada ayudan a la atmósfera de la Tierra a retener el calor del sol, esto es el llamado efecto invernadero [3] [4].

Gases de Efecto Invernadero en la atmósfera

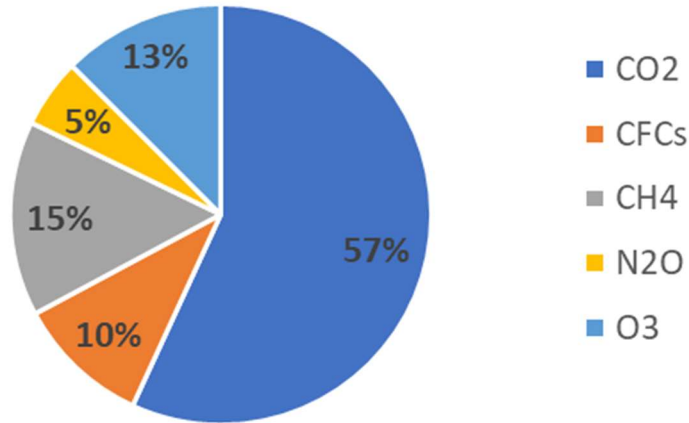


Figura 1. Porcentaje de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Este efecto se produce de manera natural y es básico para mantener a la Tierra en unas condiciones necesarias para albergar vida. Sin estos gases, la temperatura media de la tierra sería de -18°C . El problema surge debido a que una especie, en concreto el dióxido de carbono, se está produciendo en grandes cantidades desequilibrando la proporción adecuada de gases de efecto invernadero. “Estos gases están provocados principalmente por la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad, el transporte, la calefacción, la industria y la edificación, pero también son provocados por la ganadería, la agricultura (principalmente el cultivo del arroz), el tratamiento de aguas residuales y los vertederos entre otros” [3] [4].

La siguiente imagen muestra una descripción gráfica del efecto invernadero:

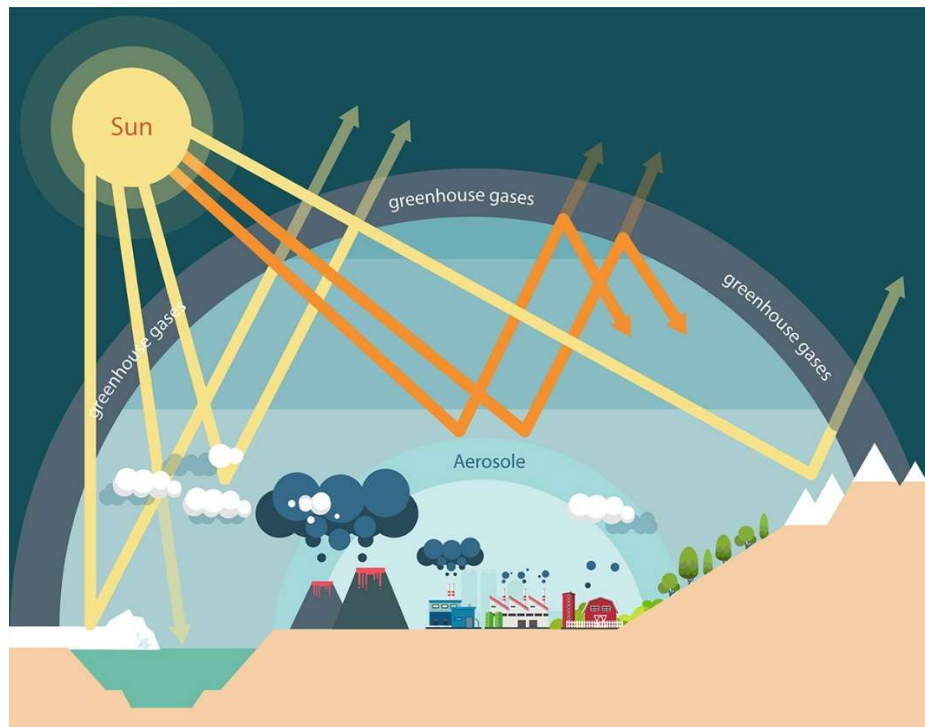


Figura 2. Explicación gráfica del efecto invernadero [5].

1.2 INCIDENCIA DEL HOMBRE EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

Un estudio del hielo de la Antártida ha observado la existencia de burbujas de aire de los últimos 800.000 años. En esas burbujas de aire hay datos sobre el CO₂ y la temperatura de eras pasadas, y se han observado dos cosas: La primera que cada vez que sube el CO₂, sube la temperatura de la Tierra. Y la segunda que estamos llegando a los mayores niveles de CO₂ jamás registrados. El estudio concluye que la actual subida desmesurada de CO₂ empieza justo cuando comenzamos a construir fábricas y quemar carbón [3] [4].

Ciertos informes apuntan a la Revolución Industrial como el punto de inflexión en el que las emisiones de gases de efecto invernadero vertidas a la atmósfera empezaron a incrementarse en gran medida. A partir de la llamada revolución industrial, que agrupó sectores como el agrícola, el tecnológico, el demográfico, el de medios de transporte y finanzas, se empezó a quemar carbón, petróleo y gas natural en grandes cantidades. El objetivo era producir energía y fabricar bienes, con el inconveniente de que se produjo mucho CO₂. Como consecuencia de ello, la temperatura ha empezado a subir más de lo

que se esperaría en ausencia de estas circunstancias, provocando el llamado calentamiento global [3] [4].

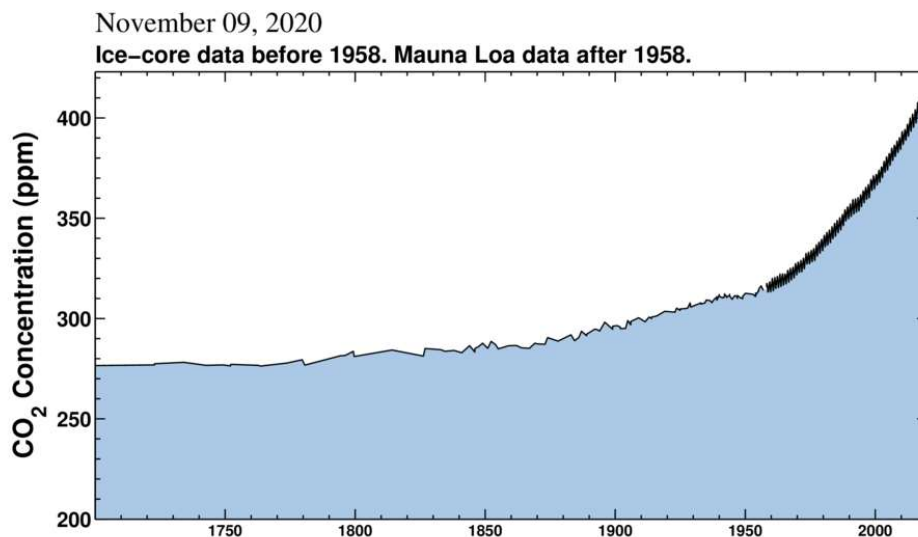


Figura 3. Evolución niveles de concentración de CO₂ en la atmósfera [6].

Este calentamiento global es la causa del cambio climático. El cambio climático, como su nombre indica, cambia nuestro clima; si nuestro clima cambia y se hace más cálido ocurren fenómenos que tienen consecuencias catastróficas como la crecida del nivel del mar, desbordamiento de ríos y lagos, incendios forestales, avances de desiertos, y desplazamiento y extinción de especies animales [3] [4].

1.3 RIESGOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los mapas de riesgo son representaciones que sirven como herramienta para analizar el riesgo. Se usan para estudiar la probabilidad y el impacto potencial de los riesgos, de manera que se puedan tomar decisiones estratégicas con un fin determinado. El eje horizontal muestra el porcentaje de probabilidad de que ocurra el suceso, y en el eje vertical se representa el porcentaje de impacto que alcanza dicho suceso [7]. A continuación, en la figura 6 se muestra un mapa de riesgo.

El foro económico mundial (World Economic Forum) lleva desde 2008 editando un informe sobre los riesgos que amenazan la humanidad [8]:

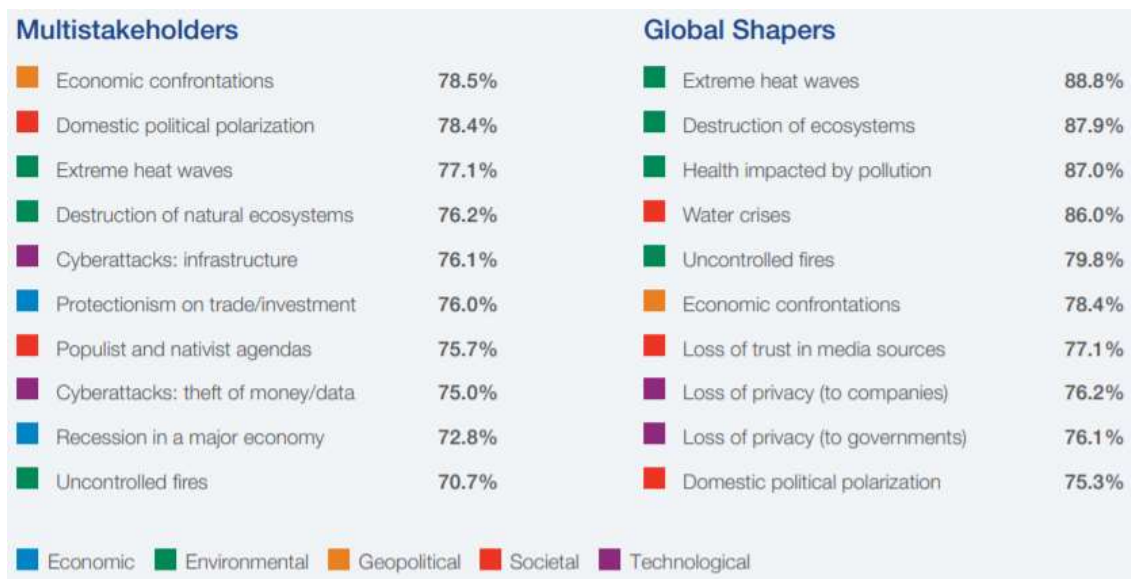


Figura 4. Perspectivas de aumento del porcentaje de riesgo a corto plazo para el año 2020 [8].

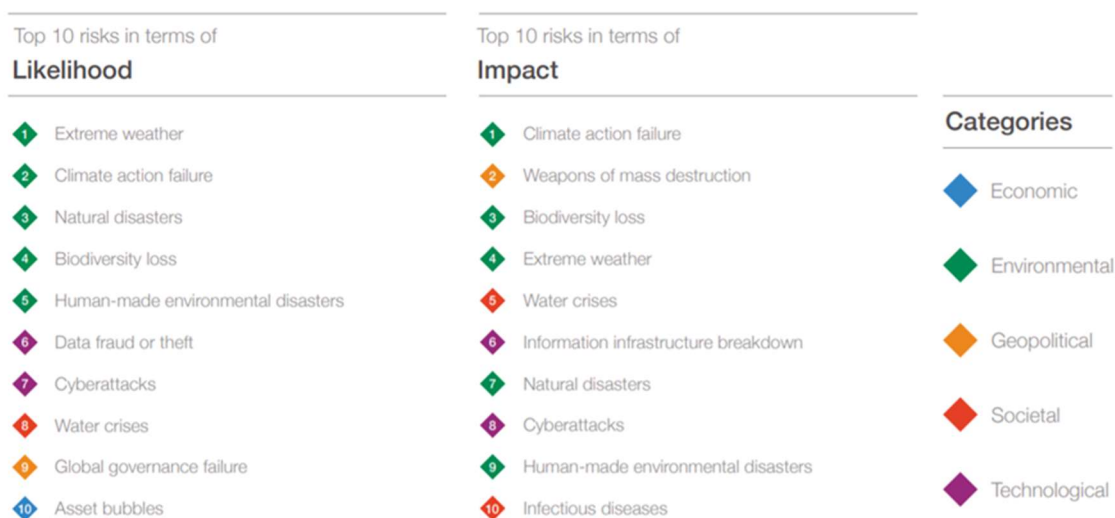


Figura 5. Top 10 de perspectivas de aumento del probabilidad de ocurrir e impacto de riesgo a largo plazo [8].

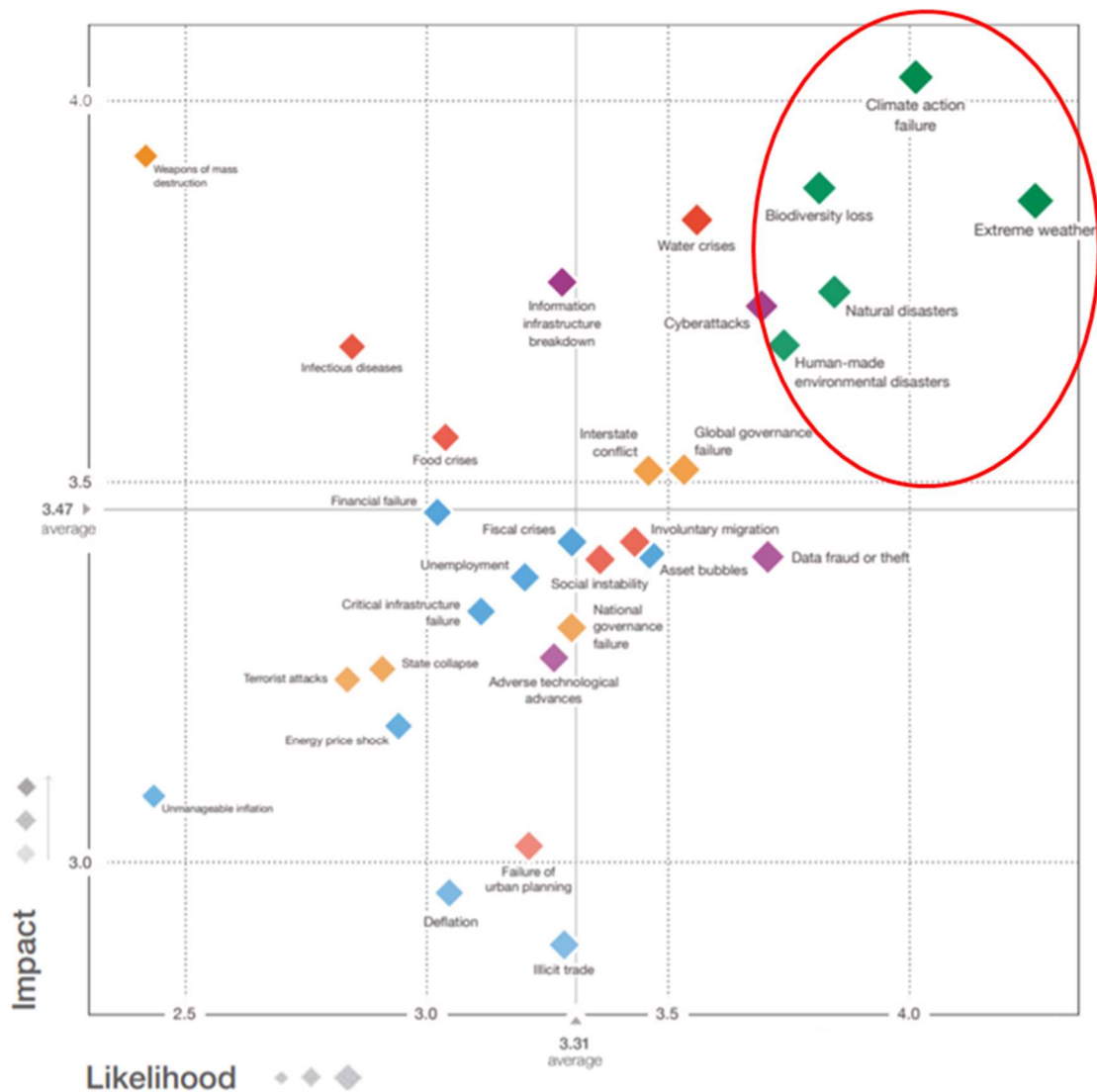


Figura 6. Panorama de riesgos globales en cuanto a impacto y probabilidad en 2020 [8].

Los 5 primeros riesgos en términos de probabilidad son el clima extremo, el fracaso de la acción climática, los desastres naturales, pérdida de biodiversidad y los desastres provocados por el hombre. Todos ellos pertenecen a la categoría de desastres medioambientales, lo que confirma la necesidad de frenar el cambio climático urgentemente [8].

Todos estas amenazas están conectadas unas con otras, y han sido representadas junto con sus conexiones en el siguiente mapa de interconexiones de riesgos globales:

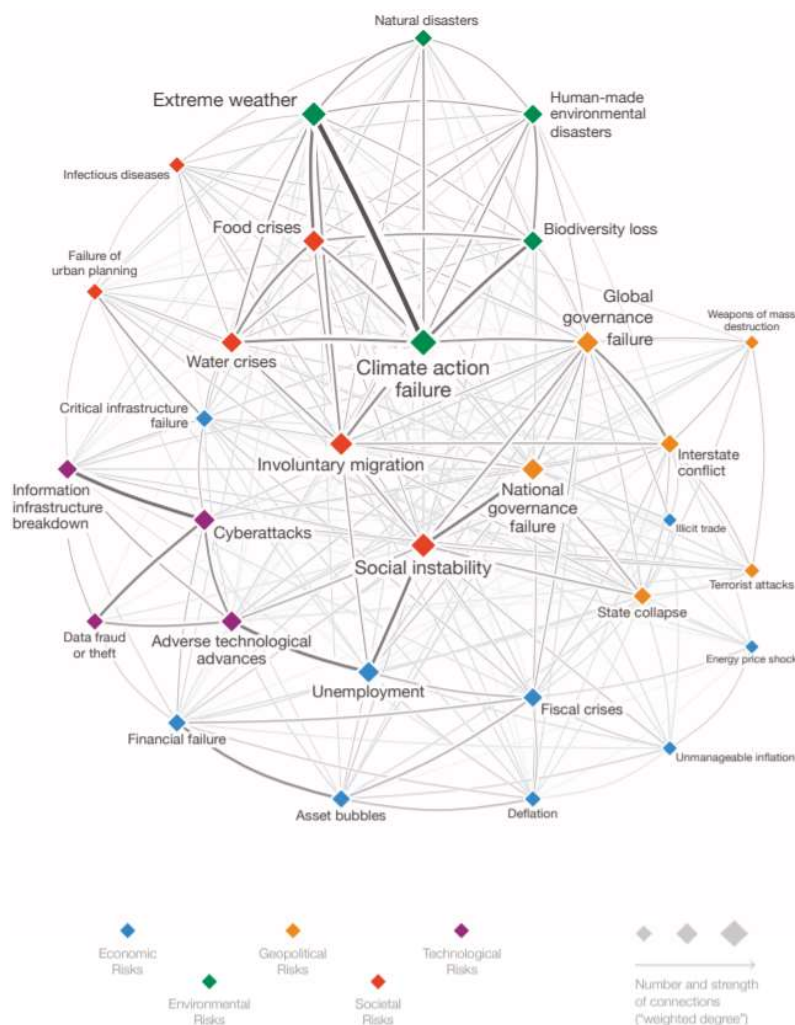


Figura 7. Mapa de interconexiones de los riesgos globales de 2020 [8].

1.4 CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

“El aumento global de la temperatura trae consecuencias que pueden ser trágicas, poniendo en peligro la perduración de la flora y la fauna de la Tierra, incluido el ser humano. Entre los impactos del cambio climático destaca el derretimiento de la masa de hielo en los polos, que a su vez provoca el aumento del nivel del mar, lo que produce inundaciones y amenaza los litorales costeros”. Se espera que nuestras ciudades e infraestructuras fallen debido a que no están preparadas para las consecuencias de estos sucesos. De hecho, ya hay países cuyos gobiernos están pidiendo ayuda porque predicen que van a desaparecer del mapa y serán inhabitables en menos de 15 años como por ejemplo Kiribati [3] [9].

Siguiendo por los problemas relacionados con la escasez de agua, vamos a tener crisis de cosechas que acaban consecuentemente en una escasez de alimentos. Estas crisis son inevitables si no frenamos el cambio climático ya que, por el calentamiento, las lluvias se irán a otras zonas provocando sequías e incendios en algunas zonas y lluvias torrenciales, desbordamientos de ríos y lagos en otras. Estos desastres naturales irán ocurriendo cada vez más frecuentemente, provocando además la migración masiva y muerte de especies animales y vegetales debidos a los cambios en los ecosistemas [3] [4].

Como consecuencia de esta escasez de alimentos y de agua, el cambio climático está detrás de las mayores migraciones que se verá, la de los refugiados climáticos. Teniendo en cuenta que la población mundial para los próximos años se estima que crezca de forma relevante, todos estos problemas se verán agravados. Una población cada vez más numerosa necesita cada vez más recursos, lo que acelera el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero en todos los procesos de producción, complicando más aún el principal problema [3] [4].

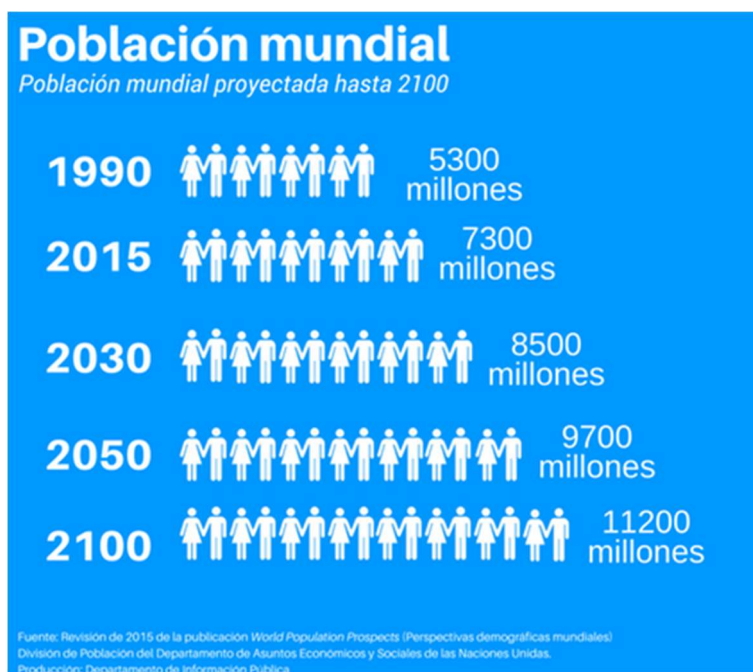


Figura 8. Población mundial proyectada [10].

Otra consecuencia del cambio climático surge debido a que la red energética mundial está basada en combustibles fósiles, generando CO₂ que acelera el cambio climático. Una

desventaja de esta situación es que algunos países debido a su situación geográfica gozan de estos recursos fósiles y otros no, lo que puede llegar a generar guerras para controlar los territorios que poseen estos recursos, crisis de precios debido a la exclusividad geográfica [3] [4].

Así mismo, dado que nuestro estilo de vida demanda una gran cantidad de productos, se está procediendo a una destrucción de ecosistemas terrestres y deforestación. En los últimos 10 años, los bosques y selvas tropicales se han destruido aproximadamente 13 millones de hectáreas. La importancia radica en que los bosques son sumideros naturales de carbono que mediante la fotosíntesis absorben CO₂ y devuelven oxígeno a la atmósfera. Lo mismo ocurre con los ecosistemas marinos, donde su destrucción produce que el océano se acidifique progresivamente, produciendo muertes y enfermedades de la flora y fauna marina [3] [4].

1.5 CÓMO EVITAR EL CAMBIO CLIMÁTICO

Como se ha mencionado antes, el cambio climático no se puede evitar, sino únicamente se puede frenar. “Para frenarlo, en primer lugar, habrá que mitigar sus efectos poniendo en marcha acciones para reducir y limitar las emisiones de gases de efecto invernadero con el objetivo de evitar que la temperatura global del planeta siga aumentando. Estas acciones consisten en una mayor inversión en energías renovables, la transición hacia una economía baja en carbono, promover la eficiencia energética, la electrificación de procesos industriales o la implementación de medios de transportes eficientes (transporte público eléctrico, bicicleta, coches compartidos...)”. Estas acciones implican menos CO₂, energía más barata, puede producirse en casi cualquier lugar surgiendo nuevas oportunidades para muchos países por ejemplo en África donde la energía solar tiene mucho potencial [3] [4].

Otra forma de mitigar los efectos del cambio climático es la adaptación al entorno enfocando las acciones para reducir la vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático. Por ejemplo, mejorar infraestructuras e instalaciones más seguras y resilientes, la reforestación y restauración paisajística, el tratamiento y depuración del agua, el cultivo

flexible y variado para estar preparado ante catástrofes naturales, ser capaces de prever estos desastres o invertir en investigación y desarrollo sobre el comportamiento de la temperatura o la posible aparición de fenómenos atmosféricos [3] [4].

Para combatir el cambio climático es necesario establecer acuerdos internacionales donde establecer tanto los retos concretos, como la financiación de la mitigación y la adaptación al cambio climático o la transferencia tecnológica. Para todo esto, es indispensable la investigación y la colaboración internacional. EL IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) se dedica a evaluar los impactos del ser humano en el clima y propone posibles soluciones, mientras que acuerdos y tratados globales como las Conferencias de las Partes (COPs) y el Protocolo de Montreal establecen pactos conjuntos y buscan un marco común de actuación contra el cambio climático [3] [4] [11].



Figura 9. Principales cumbres climáticas y sus hitos [11].

Definidos el cambio climático, sus causas, riesgos y consecuencias, es hora de comenzar a describir posibles soluciones para mitigar sus efectos.

Capítulo 2. OBJETIVOS DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

“En 2015, la ONU aprobó la **Agenda 2030** sobre el Desarrollo Sostenible, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino con el que mejorar la vida de todos, sin dejar a nadie atrás. La Agenda cuenta con **17 Objetivos de Desarrollo Sostenible**, que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades. Cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en ese intervalo de 15 años” [12].



Figura 10. Objetivos Desarrollo Sostenible [12].

Con la consecución de estos objetivos, en materia de descarbonización se espera lograr una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de un 40% con respecto a los niveles de 1990, también alcanzar un mínimo del 32% de cuota de energías renovables y una mejora de la eficiencia energética de casi un tercio. No debemos olvidar que la

Agenda 2030 forma parte de una estrategia global cuya fecha en el calendario es 2050, año en el que se quiere haber alcanzado una descarbonización del 85% [12] [13].



Figura 11. Objetivos claves para 2030 en materia de descarbonización [13].

A continuación, se describirán los objetivos del desarrollo sostenible a los cuales se contribuye con este proyecto.

En primer lugar, comenzaremos describiendo el objetivo número 7 basado en energía asequible y no contaminante, y justificando el por qué se contribuye con este proyecto de instalación fotovoltaica de autoconsumo.

- **Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante**

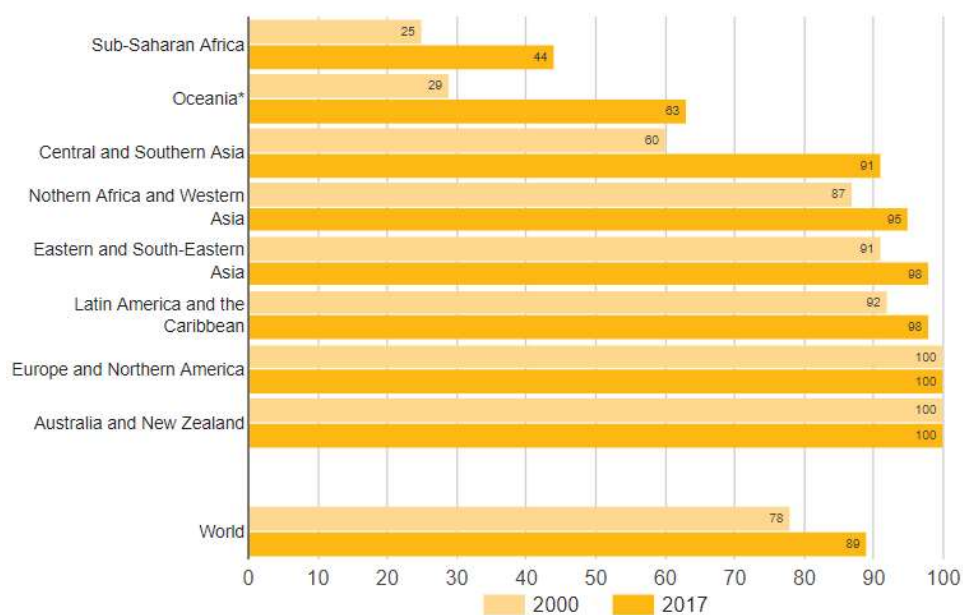
El objetivo número 7 consiste en garantizar el acceso a energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos. El mundo está avanzando hacia la consecución de este objetivo, el acceso a la electricidad en los países más pobres ha comenzado a acelerarse, la eficiencia energética continúa mejorando y la energía renovable está logrando expandirse rápidamente [14] [15].

“A pesar de ello, es necesario prestar una mayor atención a las mejoras para el acceso a combustibles limpios y seguros, y a tecnologías para 3000 millones de personas, para expandir el uso de la energía renovable más allá del sector eléctrico e incrementar la electrificación en el África subsahariana” [14] [15].

“El informe de progreso en materia de energía proporciona un registro mundial del progreso relativo al acceso a la energía, la eficiencia energética y la energía renovable. Evalúa el progreso conseguido por cada país en estos tres pilares y ofrece una panorámica del camino que nos queda por recorrer para conseguir las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030” [14] [15].

Concluye que más personas que nunca utilizan electricidad, y la proporción de la población mundial que tiene acceso a este servicio aumentó del 83% en 2010 al 87% en 2015, y luego se aceleró al 89% en 2017. Aun así, 840 millones de personas se quedaron sin este servicio esencial en 2017, principalmente en África subsahariana. En esa región, solo el 44% de la población tenía acceso, y se estima que 573 millones de personas todavía carecen de electricidad [15] [16].

Proporción de población con acceso a electricidad, 2000 y 2017 (porcentaje)



* Excluyendo Australia y Nueva Zelanda.

Figura 12. Proporción de población con acceso a electricidad, 2000 y 2017 [15].

Además, a nivel mundial la electrificación de las zonas rurales avanzó rápidamente entre 2015 y 2017, pero sigue habiendo una gran brecha. En 2017, la cobertura rural fue del 78% en comparación con el 97% en las zonas urbanas. Esto significa que el

87% de las personas que actualmente no tienen electricidad viven en zonas rurales. Los esfuerzos futuros de electrificación enfrentarán la complejidad de llegar a las poblaciones desatendidas, incluidas las que están desplazadas o viven en comunidades remotas de difícil acceso y las que están conectadas a una red urbana frágil y sobrecargada [15].

Descrito el objetivo, con este proyecto se contribuye a conseguir este objetivo mediante una generación de energía asequible, local y no contaminante.

A continuación, se explicará el objetivo 11 que trata sobre las ciudades y comunidades sostenibles, lo cual está relacionado con nuestro proyecto debido a que con nuestra solución de autoconsumo estamos generando comunidades sostenibles.

- **Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles**

El objetivo número 11 consiste en conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles [17].

“El mundo cada vez está más urbanizado. Desde 2007, más de la mitad de la población mundial ha estado viviendo en ciudades, y se espera que dicha cantidad aumente hasta el 60 % para 2030. Las ciudades y las áreas metropolitanas son centros neurálgicos del crecimiento económico, ya que contribuyen al 60% aproximadamente del PIB mundial. Sin embargo, también representan alrededor del 70% de las emisiones de carbono mundiales y más del 60% del uso de recursos” [15] [18].

“La rápida urbanización está dando como resultado un número creciente de habitantes en barrios pobres, infraestructuras y servicios inadecuados y sobrecargados, lo cual está empeorando la contaminación del aire y el crecimiento urbano incontrolado” [15] [18].

Con este proyecto se pretende fomentar las ciudades y comunidades sostenibles, de manera que tanto las nuevas infraestructuras como las ya existentes, estén adaptadas a el incremento de la demanda energética. Con el autoconsumo se ahorrarán pérdidas que actualmente se producen a lo largo del transporte de la energía e incluso ahorraríamos en infraestructuras para el transporte de la energía.

- **Objetivo 12: Producción y consumo responsables**

El consumo y la producción mundiales dependen del uso del medio ambiente natural y de sus recursos, desafortunadamente de una manera que tiene efectos negativos sobre el planeta. El progreso económico y social conseguido durante el último siglo ha estado acompañado de una degradación medioambiental que está poniendo en peligro los mismos sistemas de los que depende nuestro desarrollo futuro [19].

“El consumo y la producción sostenibles consisten en hacer más y mejor con menos. También se trata de desvincular el crecimiento económico de la degradación medioambiental, aumentar la eficiencia de recursos y promover estilos de vida sostenibles. También pueden contribuir de manera sustancial a la mitigación de la pobreza y a la transición hacia economías verdes y con bajas emisiones de carbono” [19].

Con este proyecto fotovoltaico de autoconsumo se pretende producir energía de una manera responsable, fomentando la producción y consumo a nivel local, evitando entre otras causas la degradación medioambiental mediante obtención de energía de otras formas menos sostenibles.

- **Objetivo 13: Acción por el clima**

El 2019 fue el segundo año más caluroso de la historia y supuso la década más calurosa (2010-2019) jamás registrada. Los niveles de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero en la atmósfera aumentaron hasta niveles récord en 2019 [20].

El cambio climático está afectando a todo el planeta, los sistemas meteorológicos están cambiando, los niveles del mar están subiendo y los fenómenos meteorológicos son cada vez más extremos [20].

Mediante la instalación de paneles fotovoltaicos y el autoconsumo, se pretende proponer una alternativa de producción de energía que reduzca los niveles de producción de gases de efectos invernadero, más concretamente de dióxido de carbono mediante una fuente renovable de energía.

Capítulo 3. ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son fuentes de energía limpias e inagotables, tales como el sol, el viento, el mar, los ríos y el calor de la tierra. “Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero ni emisiones contaminantes” [21] [22].

“Su implantación global es clave para el desarrollo sostenible de los países, puesto que permite generar electricidad y potenciar las economías sin perjudicar al medio ambiente”. Además, las energías renovables son crecientemente competitivas, sus costes evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costes de los combustibles fósiles es la opuesta. Esta disminución en el precio de la energía renovable es un punto a favor de la transición energética que se va a llevar a cabo en los próximos años [23] [24].

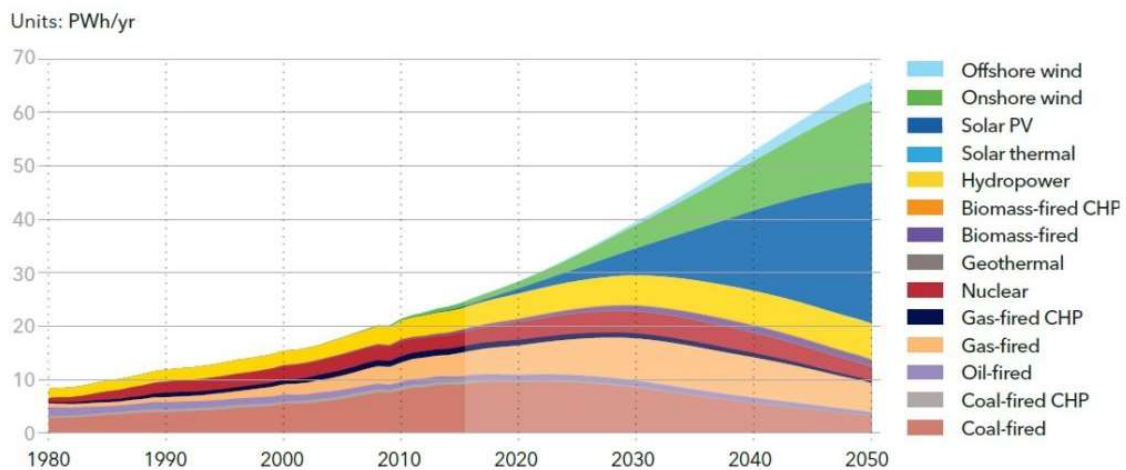


Figura 13. Generación eléctrica de energías tanto renovables como fósiles a lo largo de los últimos años y previsión de los próximos años [25].

3.1 CRECIMIENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

El crecimiento de las energías renovables es notable, como queda reflejado en las estadísticas aportadas anualmente por la Agencia Internacional de la Energía Renovable (IRENA: International Renewable Energy Agency) [26].

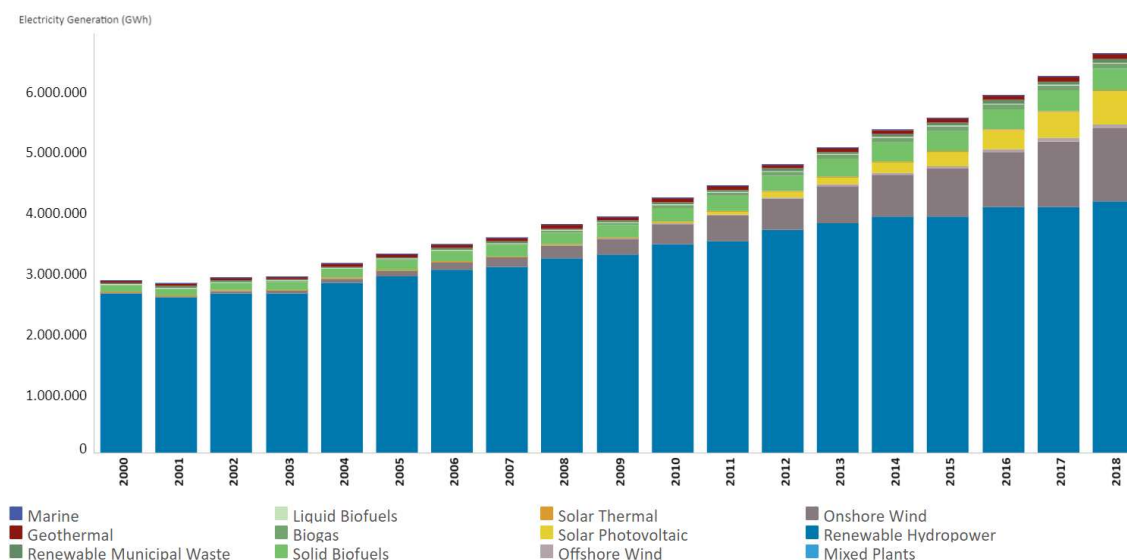


Figura 14. Generación de energía eléctrica de origen renovable [27] [28].

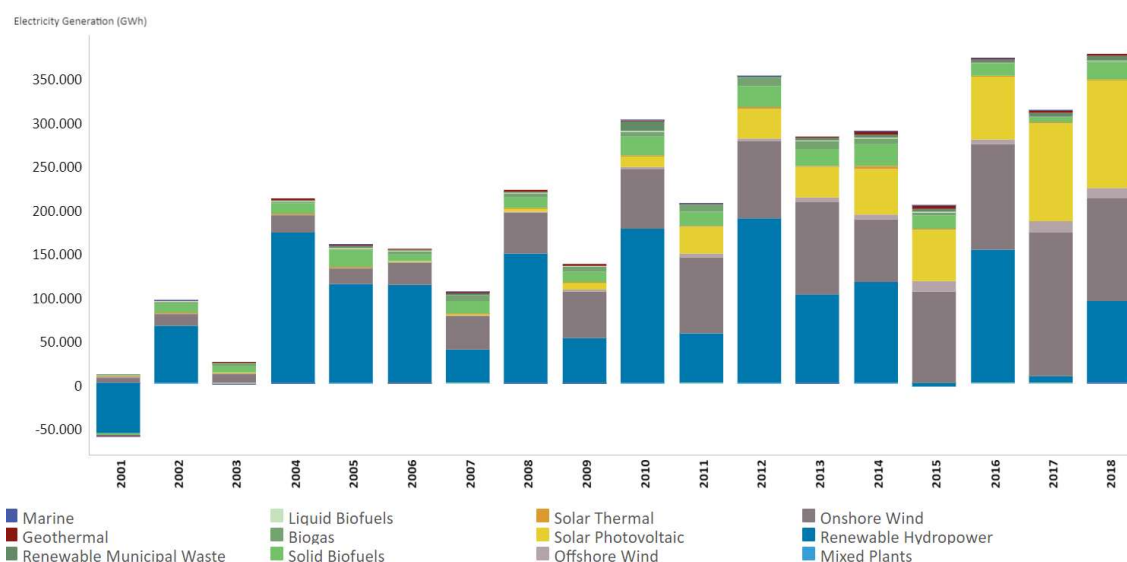


Figura 15. Nuevas incorporaciones a la generación de electricidad con energías renovables [26] [27].

Según las previsiones de la Agencia Internacional de Energía (AIE), la participación de las renovables en el suministro eléctrico global pasará del 26% en 2018 al 44% en 2040,

y proporcionarán 2/3 del incremento de demanda eléctrica, principalmente a través de las tecnologías eólica y fotovoltaica [21] [29] [30] [31].

De acuerdo con la AIE, la demanda mundial de electricidad aumentará un 70% hasta 2040, impulsada principalmente por regiones emergentes como India, China, África, Oriente Medio y el sureste asiático [21] [29] [30] [31].

3.2 EVOLUCIÓN DE LOS COSTES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

El coste normalizado de la energía (**LCOE – Levelized Cost Of Energy**) es un método para analizar y comparar distintas tecnologías de generación, ya que se trata de una técnica que considera la inversión inicial y los diferentes costes de producción a lo largo de la vida útil del proyecto, asumiendo una cierta certeza en dichos costes de producción, es decir, en ausencia de los riesgos asociados al mercado o la tecnología.

La utilización del coste normalizado para proyectos energéticos tiene su origen en la necesidad de conocer las tarifas a las que se va a vender el producto energético, ya sea electricidad o calor. Tener un coste normalizado del producto permite comparar costes de generación de diferentes tecnologías [32].

El coste normalizado de la generación de electricidad consiste en acumular todos los costes proyectados hacia el futuro durante la vida útil del proyecto y descontarlos hacia el tiempo presente, lo que podía conocerse como coste anual neto, y que es posteriormente analizado mediante el factor de amortización, para obtener un coste uniforme a lo largo de todos los años.

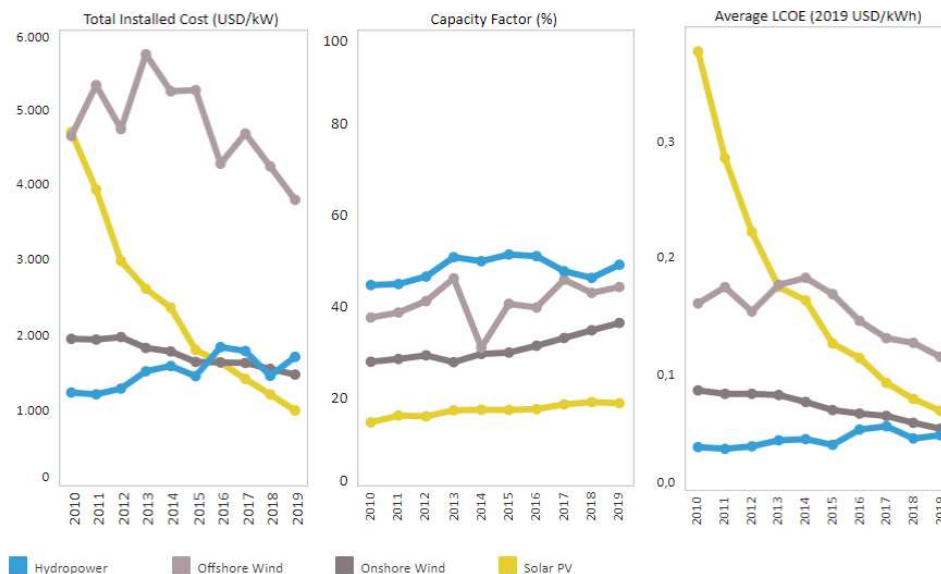


Figura 16. Costes totales medios ponderados globales de instalación, factor de capacidad y LCOE 2010-2019 [33].

Se observa que cada vez son menores los costes tanto de instalación como de producción en energía solar fotovoltaica y en energía eólica, posicionándose como dos de las mejores opciones para invertir en energía renovable.

A continuación, se muestran dos gráficos donde se reflejan la energía solar y eólica en distintas partes del mundo, donde se observa la continua disminución de su precio a lo largo de los últimos años:

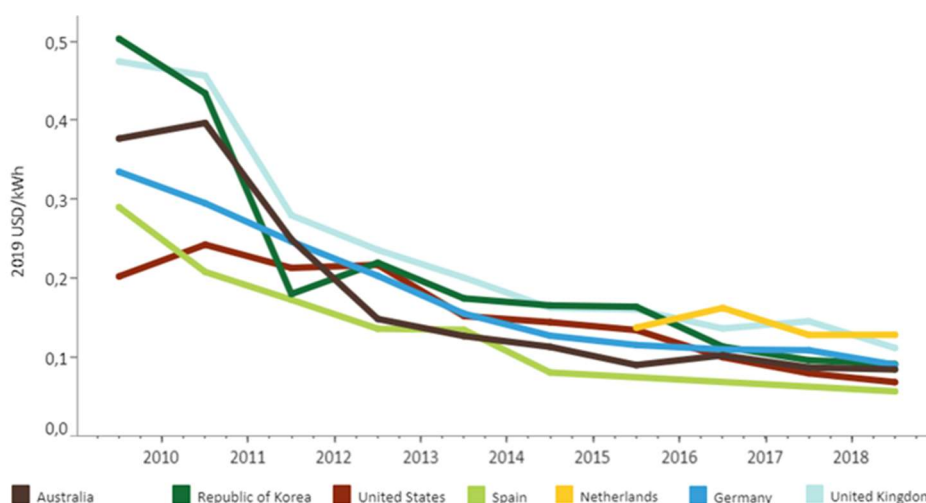


Figura 17. Promedio ponderado del LCOE de proyectos de energía solar fotovoltaica encargados por país 2010-2019 [34].

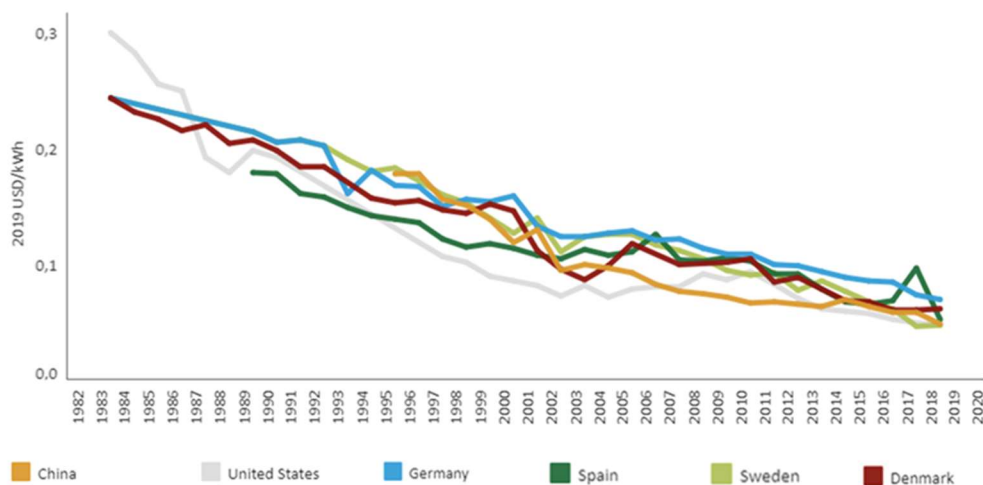


Figura 18. Promedio ponderado del LCOE de proyectos eólicos terrestres encargados por país 1980-2019 [35].

3.3 ENERGÍA SOLAR

La energía solar fotovoltaica transforma de manera directa la luz solar en electricidad empleando una tecnología basada en el efecto fotovoltaico.

“Al incidir la radiación del Sol sobre una de las caras de una célula fotoeléctrica que conforman los paneles solares, se produce una diferencia de potencial eléctrico entre ambas caras que hace que los electrones salten de un lugar a otro, generando así corriente eléctrica”.

3.3.1 VENTAJAS DE LA ENERGÍA SOLAR

A continuación, se presentan brevemente las ventajas de la energía solar:

- **No contaminante:** la energía solar fotovoltaica no emite sustancias tóxicas ni contaminantes, que pueden ser muy perjudiciales tanto para el medio ambiente como para el ser humano. Dichas emisiones pueden acidificar los ecosistemas terrestres y acuáticos, y corroer edificios. Los contaminantes de aire pueden desencadenar enfermedades como el cáncer y enfermedades respiratorias. Su generación no produce residuos ni contaminación del agua, un factor muy importante teniendo en cuenta la escasez de agua en determinadas partes del planeta, aunque sí que contamine una pequeña parte en la fabricación de los componentes necesarios para aprovechar este tipo de energía [36].

- **Ayuda a frenar el cambio climático:** No contribuye al calentamiento global ya que no emite gases de efecto invernadero. De hecho, se presenta como una de las tecnologías renovables más eficientes para frenar el cambio climático [36].
- **Renovable:** Al contrario que las fuentes tradicionales de energía como el carbón, el gas o el petróleo, cuyas reservas son finitas, la energía del Sol está disponible en todo el mundo y se adapta a los ciclos naturales. Por ello son un elemento esencial de un sistema energético sostenible que permita el desarrollo presente sin poner en riesgo el de las futuras generaciones [36].
- **Crecientemente competitiva:** Las renovables como la eólica y la fotovoltaica, son más baratas que las energías convencionales en cada vez más lugares. Las economías de escala y el desarrollo en innovación han conseguido que las energías renovables sean la solución más sostenible, no sólo ambiental sino también económicamente para el futuro. [36].
- **Genera riqueza y empleo local:** Además, la energía solar fotovoltaica es una energía disponible en prácticamente todo el planeta, lo que contribuye a reducir las importaciones energéticas y a crear riqueza y empleo de forma local. Por todo ello, la producción de electricidad mediante energía fotovoltaica y su uso de forma eficiente contribuyen al desarrollo sostenible [36].

3.3.2 TIPOS DE PANELES SOLARES

En cuanto a su manera de aprovechar la radiación solar, existen dos tipos de paneles solares:

- **Paneles fotovoltaicos:** generan electricidad por reacciones químicas. Estos paneles fueron los primeros que se utilizaron exitosamente para abastecer una zona con la generación de energía procedente del Sol. Estos paneles pueden tener cualquier tamaño, desde unos pocos centímetros cuadrados hasta varios de metros cuadrados de superficie. Los paneles solares fotovoltaicos funcionan mediante la incidencia de los rayos solares sobre su superficie, lo que necesita que estos estén correctamente orientados en todo momento hacia el Sol para captar la máxima irradiancia posible. Esta irradiancia transmite energía a los electrones, lo que provoca que estos se separen de protones y neutrones y sean liberados del panel en forma de electricidad [37] [38].

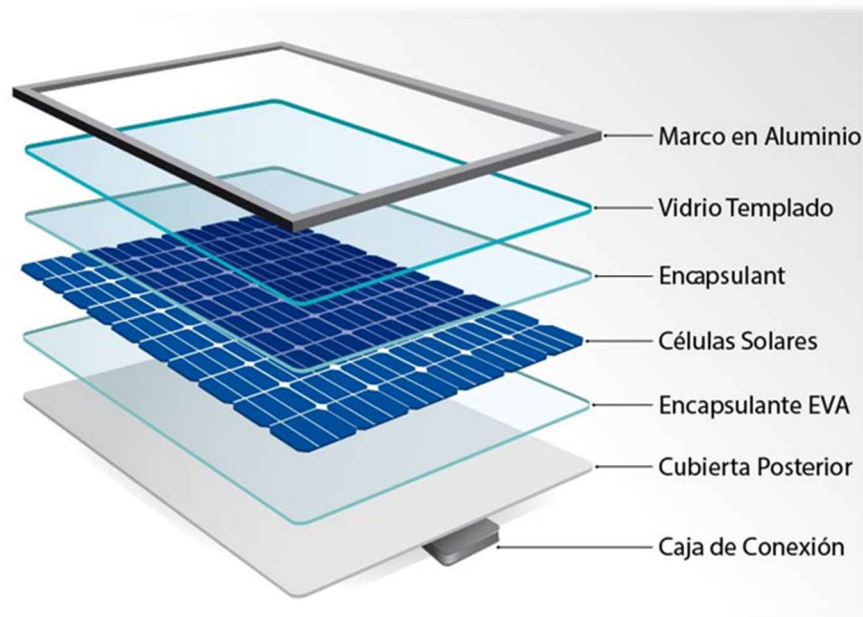


Figura 19. Panel fotovoltaico [39].

- **Paneles térmicos:** Tienen una configuración más sencilla que los fotovoltaicos. Estos paneles reciben los rayos solares sobre su superficie y utilizan la energía del Sol para calentar el agua que circula a través de unos tubos que se encuentran dentro del panel con el objetivo de obtener energía o utilizarse esta agua calentada para uso doméstico [37] [38].

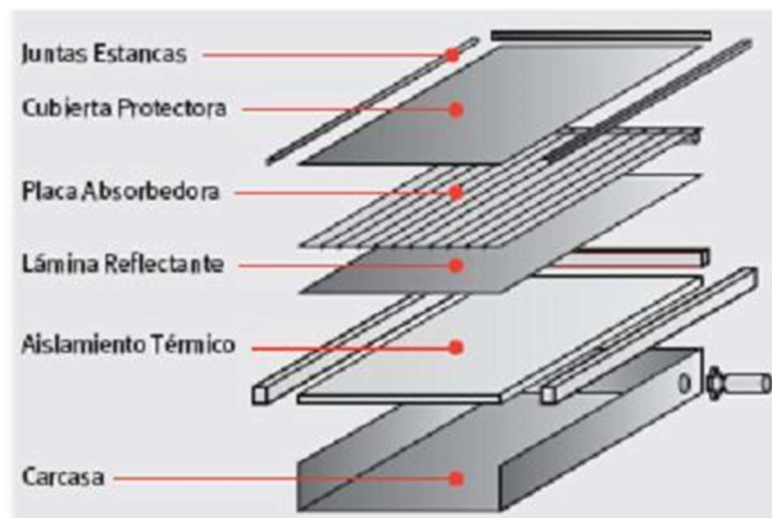


Figura 20. Panel solar térmico de captador plano [40].



Figura 21. Panel solar térmico de captador de tubos [41].

3.4 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es uno de los recursos energéticos más antiguos explotados por el ser humano y es hoy en día la energía más desarrollada y eficiente de todas las energías renovables [42].

Esta energía consiste en aprovechar la energía procedente del viento que produce el movimiento de las palas de un aerogenerador convirtiendo energía rotatoria en energía eléctrica [42].

3.4.1 VENTAJAS DE LA ENERGÍA EÓLICA

“La energía eólica es una fuente de energía renovable, no contamina, es inagotable y reduce el uso de combustibles fósiles. Además, la energía eólica es una energía disponible en la mayoría del planeta, lo que contribuye a reducir las importaciones energéticas y a crear riqueza y empleo de forma local. Por todo ello, la producción de electricidad mediante energía eólica y su uso de forma eficiente contribuyen al desarrollo sostenible” [42] [43].

“De todas estas ventajas, es importante destacar que la energía eólica no emite sustancias tóxicas ni contaminantes del aire, que pueden ser muy perjudiciales para el medio ambiente y el ser humano. Las sustancias tóxicas pueden acidificar los ecosistemas terrestres y acuáticos, y corroer edificios. Los contaminantes de aire pueden desencadenar enfermedades del corazón, cáncer y enfermedades respiratorias” [42].

De igual manera que la energía fotovoltaica, la energía eólica tiene una de las huellas de consumo de agua más bajas, lo que la convierte en clave para la preservación de los recursos hídricos siendo un factor clave teniendo en cuenta la escasez de agua [42].

3.4.2 COMPONENTES

A continuación, se presenta el componente principal para la generación de energía eólica: el aerogenerador.

Un aerogenerador es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Las palas de un aerogenerador giran con una frecuencia aproximada de 15 revoluciones por minuto, ya sea a una velocidad constante o variable, donde la velocidad del rotor varía en función de la velocidad del viento para alcanzar una mayor eficiencia, según su tecnología [44].

Los aerogeneradores tienen una veleta en la parte superior para saber la dirección del viento. Este instrumento le permite conocer la dirección óptima y, por tanto, el aerogenerador gira sobre la torre orientándose automáticamente. Además, las palas también giran sobre su eje para ofrecer la máxima resistencia al aire y captar más energía [44].

La fuerza del viento hace girar las palas, que están diseñadas para absorber al máximo su energía. Las palas pueden llegar a medir 60 metros de longitud y están fabricadas con materiales ligeros y muy resistentes para facilitar su movimiento. Por ello, pueden producir energía con vientos muy suaves desde a partir de 11 Km/h [44].

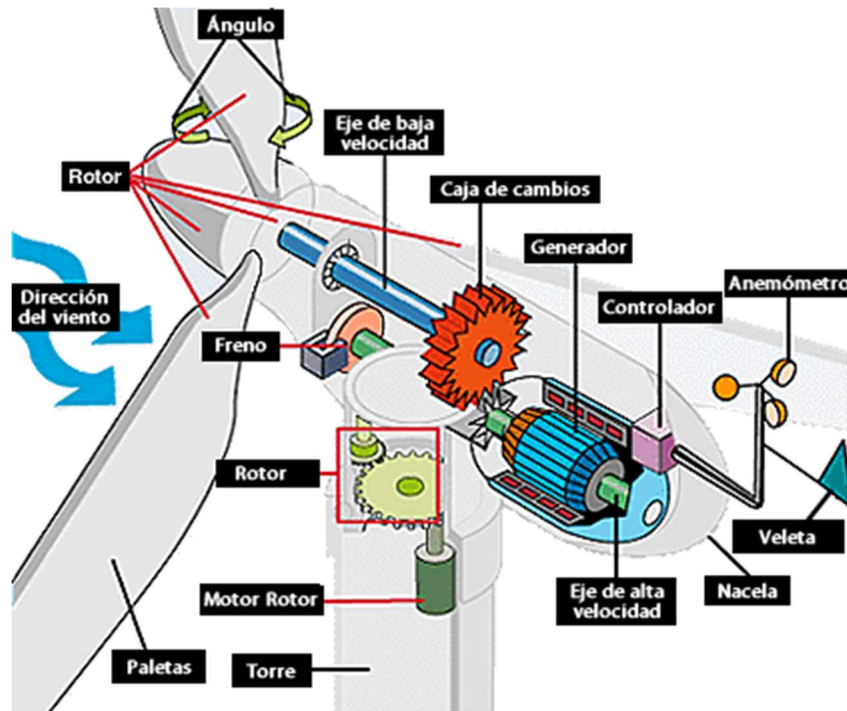


Figura 22. Partes de un aerogenerador [45].

Las palas están conectadas mediante el buje al llamado “eje lento”, que gira a la misma velocidad que las palas, a una velocidad aproximada de 10 vueltas por minuto. Para optimizar la producción de electricidad, es necesario aumentar la velocidad del eje, que se realiza mediante una multiplicadora compuesta por engranajes acoplados al eje rápido, que a su vez está unido a un generador de energía eléctrica a partir de la energía cinética. Esta electricidad producida en el generador es conducida hasta la base de la torre donde se encuentra un transformador que eleva la tensión de la electricidad para poder transportar la electricidad con menores pérdidas [44].

Finalmente, para finalizar este apartado de energías renovables, conviene llevar a cabo un estudio sobre la repartición de energías renovables frente a energías fósiles en España con el objetivo de conocer la situación actual en la que se encuentra el país.

3.5 REPARTICIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES Y ENERGÍAS FÓSILES EN ESPAÑA

A continuación, se describirán brevemente las reparticiones de energías tanto renovables como no renovables, en cuanto a potencia instalada y generación.

A lo largo del año 2019 se produjo un incremento de potencia instalada renovable un 14% mayor al producido en 2018, lo que supuso un aumento de 6.693 MW. Estadísticamente fue la primera vez que la potencia instalada renovable superaba la mitad del total del parque generador de energía eléctrica en España, alcanzando un 50,1%. Este crecimiento fue impulsado, principalmente, por el aumento de la potencia solar fotovoltaica que aportó un 63% de la nueva potencia. La eólica también ha contribuido a la nueva potencia renovable, en su caso con 2.254 MW adicionales [46] [47] [48] [49].

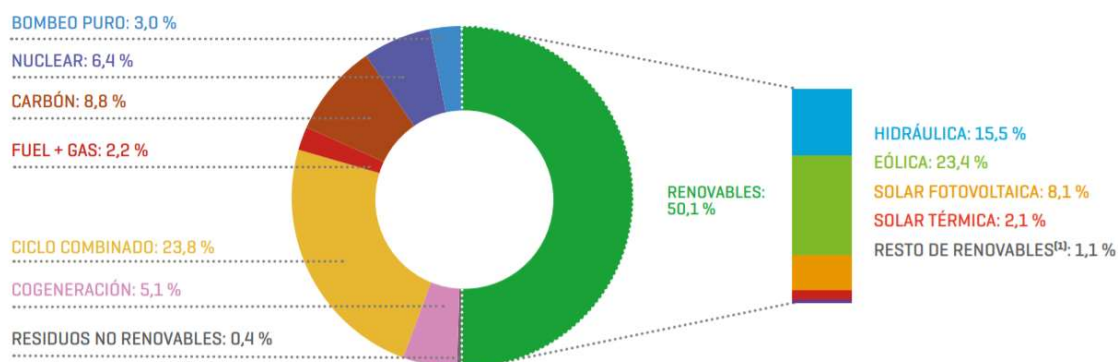


Figura 23. Tipos de potencia eléctrica instalada en España a 31-12-2019 [46] [47].

La contribución de las energías renovables a la generación eléctrica nacional durante este año se redujo de un 38,4% en el año 2018 a un 37,5% en 2019. Sin embargo, el peso de la generación renovable alcanzó el quinto valor más alto de los últimos diez años como se observa en la siguiente imagen [46] [47] [48] [49].

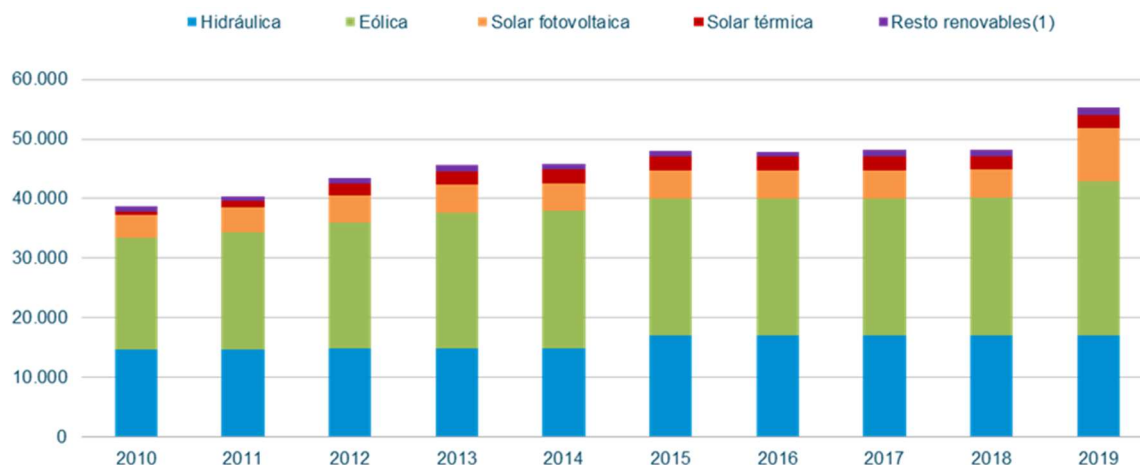


Figura 24. Evolución de la potencia instalada renovable en MW en España [46] [47].

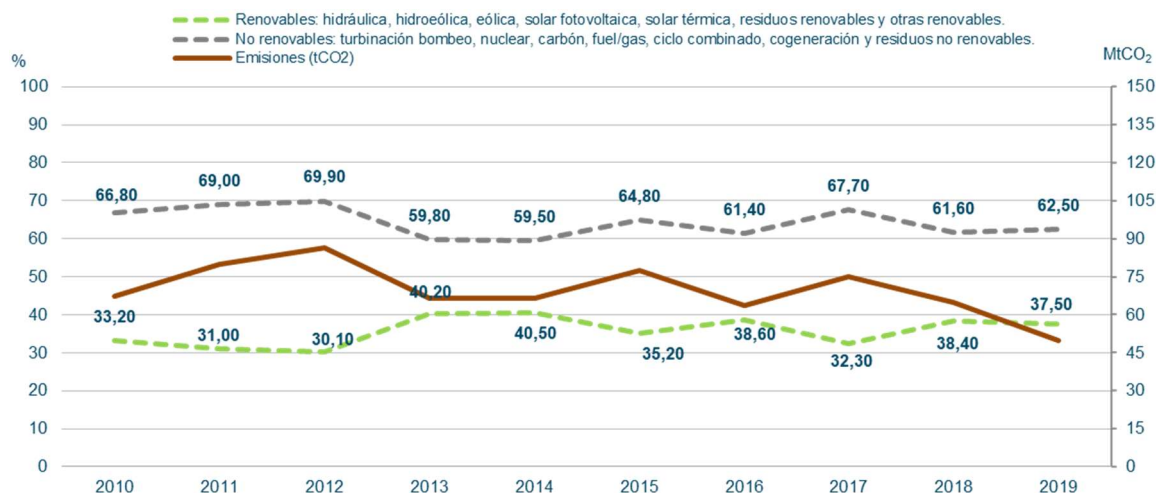


Figura 25. Evolución generación renovable y no renovable, y emisiones CO₂ asociadas a la generación eléctrica. Sistema eléctrico nacional [46] [47].

Este descenso de la generación renovable ha sido motivado por una menor producción hidráulica respecto a la del año anterior, como consecuencia de las escasas precipitaciones. Sin embargo, el resto de las tecnologías renovables en el sistema eléctrico ha aumentado en el 2019 un 10,5%, ya que todas ellas han registrado incrementos respecto al año anterior [46] [47] [48] [49].

Cabe destacar que, aunque la generación de renovables ha resultado ligeramente inferior, se ha producido una reducción considerable de las emisiones de CO₂ equivalente debido al fuerte descenso de la producción con centrales de carbón, en casi un 66% menos

respecto a la del año anterior, llegando a marcar un mínimo histórico: 50 millones de toneladas de CO₂ equivalente, un 23% menos que en el 2018 [46] [47] [48] [49].

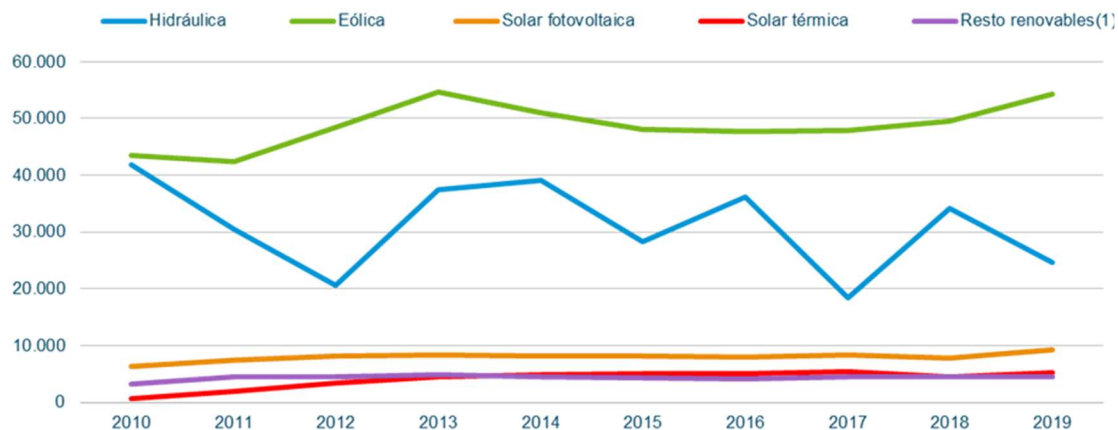


Figura 26. Evolución de la generación de energía renovable. Sistema eléctrico nacional [46] [47].

La energía eólica sigue siendo la tecnología renovable más importante en el mix de generación nacional, suponiendo el 20,8% de la producción total, con producción nuclear y de ciclo combinado muy cercanos [46] [47] [48] [49].

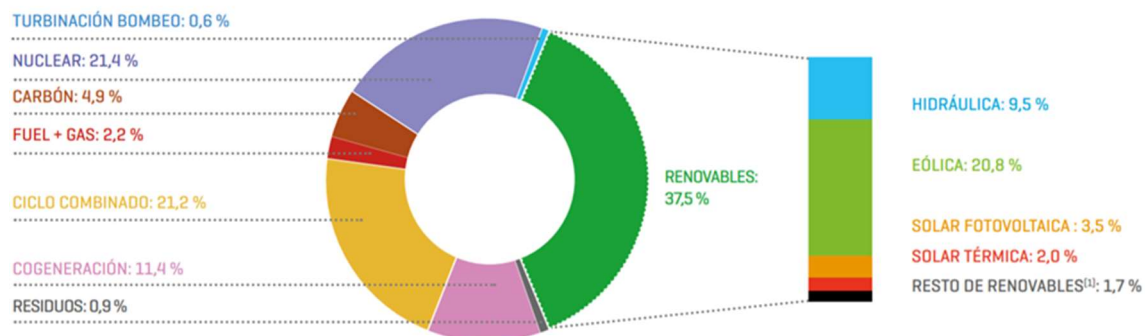


Figura 27. Fuentes de generación de energía eléctrica en España en 2019 [46] [47].

“Sin embargo, continúa siendo la tecnología renovable más relevante a nivel nacional ya que, en el 2019, ha supuesto el 55,4% del conjunto de las renovables. En total se han producido con esta tecnología 54.238 GWh, valor muy cercano a la máxima producción eólica registrada en el año 2013 con un 3,3% de potencia instalada inferior. Por otro lado, durante este 2019 las instalaciones solares fotovoltaicas casi han duplicado la potencia instalada y han incrementado su producción un 19%, alcanzando los 9.240 GWh, lo que

supone un récord de generación anual y de participación en el mix nacional con un 3,5%” como se ve en la imagen anterior [46] [47] [48] [49].

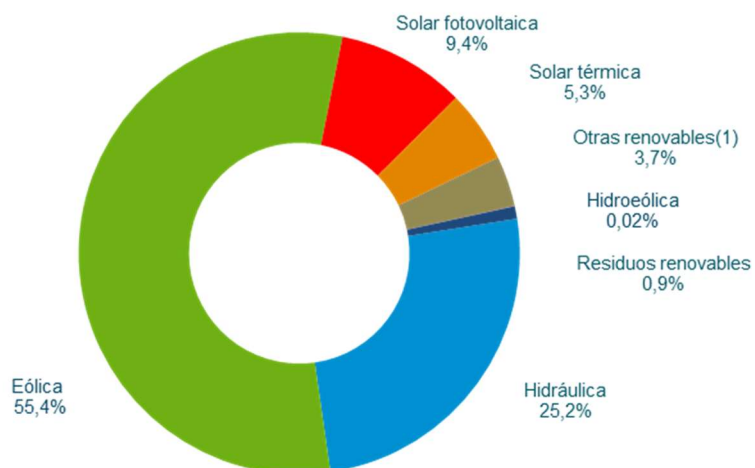


Figura 28. Tipos de generación anual de energía renovable en 2019 en España [46] [47].

Capítulo 4. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Tras la introducción de las energías renovables, especialmente de la solar y la eólica, y su repartición en cuanto a potencia instalada y energía generada, en este proyecto se plantea el problema de cómo implantar una instalación de paneles fotovoltaicos destinados al autoconsumo para una nave industrial, por lo que ahora nos centraremos en la energía solar fotovoltaica.

Se empezará describiendo la situación actual de la energía solar fotovoltaica en el mundo y después se afinará centrándose en España. Finalmente se comentará brevemente la regulación de la energía solar fotovoltaica que, principalmente, está ligada al autoconsumo, el cual será nuestro siguiente apartado.

4.1 *ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL MUNDO*

La capacidad solar mundial conectada a la red casi alcanzó los 500 GW en 2018, y los 580 GW a finales de 2019, junto con 3,4 GW de fotovoltaica aislada, según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA). Con energía fotovoltaica aislada nos referimos a capacidad solar total sin conexión, la cual países como La India, China y Bangladesh albergan la mayor parte de esta capacidad, junto con otros puntos importantes a nivel mundial en África y Oriente Medio [50] [51].

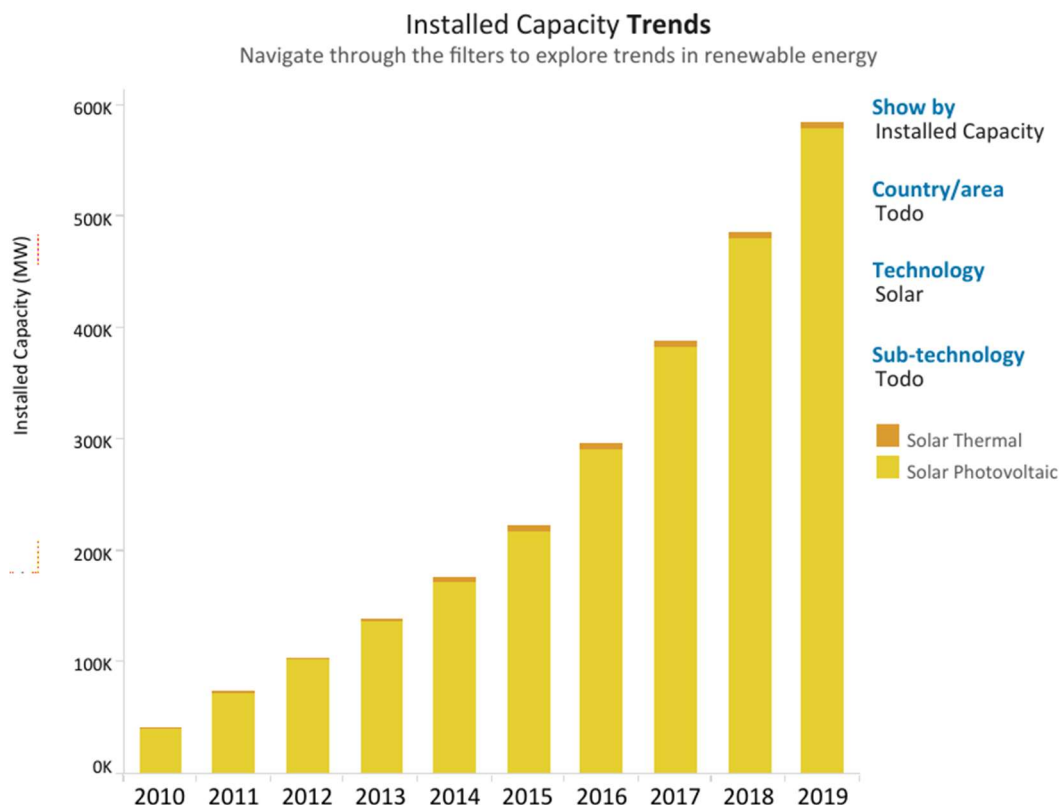


Figura 29. Potencia instalada de energía solar en todo el mundo [52].

Asia cuenta con 330,1 GW de capacidad instalada, siendo el continente con la mayor capacidad fotovoltaica. Por su parte, China es el mayor mercado de la región con 205,7 GW de instalaciones, seguido del Japón con 61,8 GW, la India con 34,8 GW y Corea del Sur con 10,5 GW [51].

Europa contaba con 138,2 GW de energía solar instalada a finales de 2019, de los cuales 129,8 GW pertenecían a países de la Unión Europea. Alemania es el país que lidera esta lista con 49,9 GW, seguido de Italia con 20,9 GW, el Reino Unido con 13,3 GW, Francia con 10,5 GW y España con 8,6 GW [51].

La región euroasiática, que incluye Armenia, Azerbaiyán, Rusia, Georgia y Turquía, alcanzó un total de 7,14 GW [51].

El continente con menor capacidad instalada total es África, la cual alcanzó los 6,36 GW a finales de 2019, según IRENA [51].

En América del Norte, la potencia fotovoltaica total instalada conectada a la red alcanzó la cifra de 68,2 GW. Este valor se reparte entre Estados Unidos con unos 60,5 GW, seguido de 4,8 GW en México y 3,3 GW en Canadá. En América Central se alcanzó la cifra de 2,1 GW. Y, en América del Sur, la capacidad fotovoltaica instalada se situó en 6,46 GW, encabezado por Chile y Brasil, con 2,6 GW y 2,4 GW, respectivamente [51].

Y, finalmente, el total acumulado de Oceanía alcanzó los 16,23 GW, liderado por Australia con 15,9 GW [51].

4.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA

A lo largo del año 2019 la energía solar ha registrado valores históricos récord tanto en potencia instalada como en generación en España. Este fuente de energía ha alcanzado la tercera posición en generación eléctrica renovable en España con 11.217 MW de capacidad instalada a finales del 2019, lo que representa alrededor del 10% del total de la potencia instalada desglosándose en 8.913 MW de energía solar fotovoltaica y 2.304 MW de energía solar térmica [46] [47].

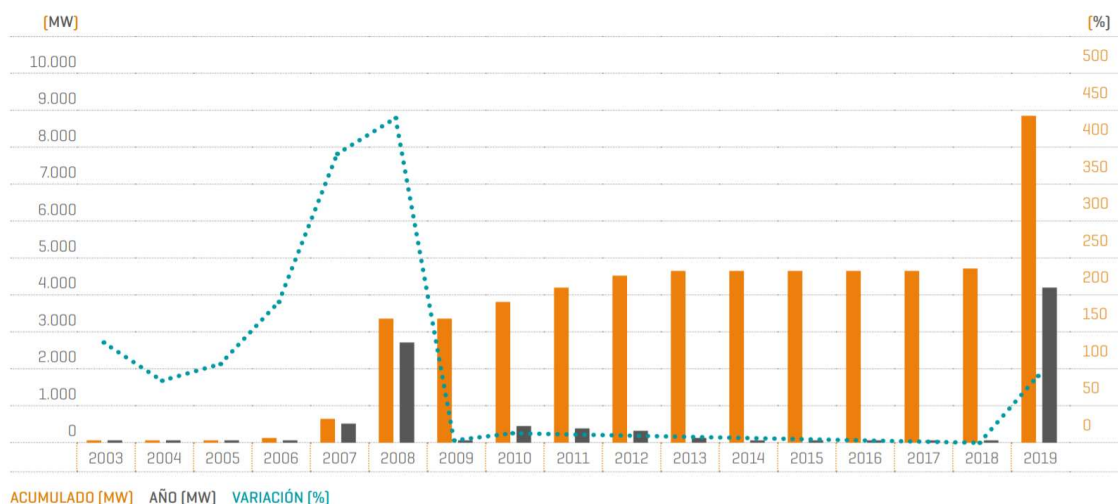


Figura 30. Potencia solar fotovoltaica instalada. Sistema eléctrico nacional [46].

Este crecimiento representa un incremento del 89% de potencia solar fotovoltaica instalada alcanzando un total de casi 9.000 MW de potencia instalados, el más elevado de la historia, permitiendo una generación solar un 18,2% superior a la registrada en 2018,

alcanzando el valor anual más alto registrado hasta el momento en España: 14.407 GWh [46] [47].

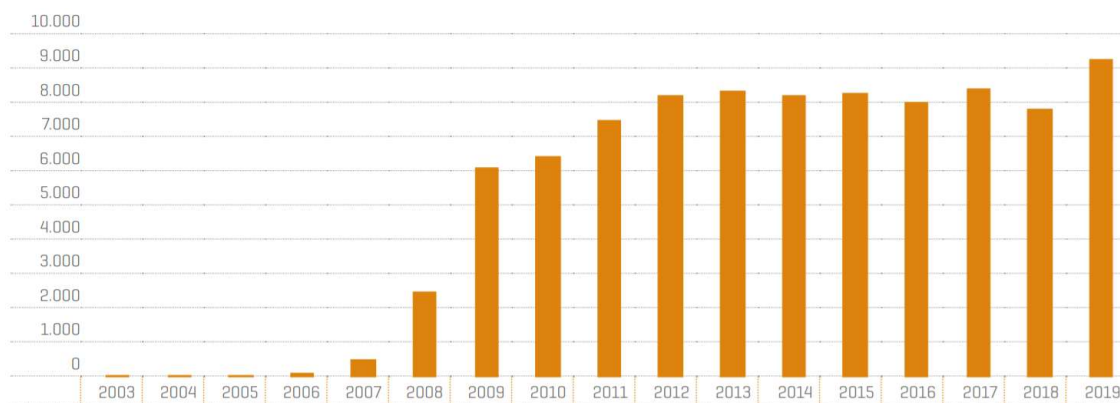


Figura 31. Generación solar fotovoltaica. Sistema eléctrico nacional (GWh) [46].

Descrita la situación actual tanto en todo el mundo como en España, es necesario conocer cuáles serán los proyectos futuros en cuanto a energía solar fotovoltaica.

4.3 PROYECTOS FUTUROS

El cumplimiento de los objetivos climáticos del Acuerdo de París requiere una importante aceleración en múltiples sectores y tecnologías, y una de las mejores opciones de tecnologías bajas en carbono es la energía solar fotovoltaica con la cual se pueden conseguir importantes reducciones de las emisiones. Para ello es preciso multiplicar la capacidad instalada por 6 veces en los 10 próximos años, lo que supone un gran reto [53].

Para lograrlo, se están realizando y planeando proyectos de dimensiones colosales para el futuro. Uno de los continentes que más apuesta por la energía renovable es el asiático, donde se espera que Asia impulse sus instalaciones de capacidad solar fotovoltaica, dada su condición de líder mundial del sector, dominando más aún el sector solar fotovoltaico en lo que respecta a la capacidad total instalada, con una cuota prevista superior al 50% para 2050, seguida de Norteamérica con un 20% y de Europa con un 10% [53].

Dentro del continente asiático destaca la figura de China, país líder mundial en fabricación e instalación de energía solar fotovoltaica. Su principal objetivo para las próximas décadas es duplicar sus instalaciones anuales de nueva capacidad solar a 85

GW. Para tener una referencia de la magnitud de este objetivo, es necesario aclarar que equivale a más de dos tercios de la instalación solar anual en todo el mundo en 2019 [54].

Pero no solo se están llevando a cabo grandes proyectos en el continente asiático, sino que, sin ir más lejos, en España ya está puesto en marcha el mayor proyecto fotovoltaico de Europa. En concreto en los pueblos de Aldeacentenera y Torrecillas de la Tiesa donde la instalación ocupará una superficie de 1.300 hectáreas y se evitará la emisión a la atmósfera de 245.000 toneladas de CO₂ al año. Iberdrola va a construir el proyecto Francisco Pizarro que contará con una inversión superior a los 300 millones de euros y dará trabajo a 1.000 personas durante su construcción. La instalación contará con 590 MW de capacidad instalada y dotará de energía limpia a 375.000 personas al año, convirtiéndose en la mayor planta fotovoltaica de Europa tras su puesta en marcha en 2021 [55].



Figura 32. Planta fotovoltaica Núñez de Balboa [56].

Con el proyecto Francisco Pizarro, Iberdrola supera así al otro gran proyecto emblemático anterior también en Extremadura, la planta fotovoltaica Núñez de Balboa, cuya potencia instalada es de 500 MW.

4.4 REGULACIÓN EN ESPAÑA

España es un país que se caracteriza por tener muchas horas del sol al día a lo largo de todo el año, lo que lo convierte en un candidato idóneo para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica. Nuestro país, consciente de su clima y capacidad para sacar provecho de la energía solar, empezó muy pronto a investigar y desarrollar proyectos de energía solar y fotovoltaica. Sin embargo, la existencia de excesivas regulaciones y normativas sobre energía solar en España ha frenado que se aprovechara este tipo de energía en todo su potencial, especialmente perjudicando a la energía solar de autoconsumo [57].

4.5 AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO

En primer lugar, hay que definir qué es exactamente el autoconsumo fotovoltaico. Este se define como la acción por la cual un particular o una empresa produce su propia energía eléctrica mediante paneles solares para consumo propio. Cabe destacar que la energía es producida en instalaciones de generación fotovoltaica próximas al punto de consumo, sino carece de sentido [58] [59].

El autoconsumo es una solución muy económica a largo plazo de autoabastecimiento eléctrico. Se ha vuelto muy popular en España, puesto que en nuestro país contamos con aproximadamente 300 días de sol de 365, lo que significa una producción de energía casi ininterrumpida a lo largo del año. Asimismo, esta modalidad de consumo no solo supone un ahorro en la factura de la luz, sino que también contribuye a frenar el cambio climático al utilizar el Sol, que es una energía renovable [58] [59].

4.6 FUNCIONAMIENTO

La ciencia de convertir la luz solar directamente en electricidad se conoce como energía fotovoltaica, nombre que hace referencia a los fotones de luz y voltios de electricidad. Los paneles solares, también llamados paneles fotovoltaicos, contienen células solares que en su mayoría están formadas por capas de silicio, un material semiconductor con propiedades físicas y químicas muy favorables para propiciar el efecto fotovoltaico [60].

Cuando los fotones de luz alcanzan la célula solar, son absorbidos y excitan electrones en las capas de silicio, provocando su movimiento y, finalmente, originando el flujo de electrones a través de un circuito de cableado que alimenta al sistema fotovoltaico. Este movimiento de electrones es lo que genera la energía eléctrica [1].

La electricidad producida por los módulos fotovoltaicos es corriente continua. Sin embargo, el sistema eléctrico que alimenta a los hogares e industrias utiliza corriente alterna. Por lo tanto, los sistemas fotovoltaicos incluyen uno o más inversores que convierten la electricidad de corriente continua generada por la energía solar en energía de corriente alterna utilizable para los hogares e industrias [1].

Los sistemas fotovoltaicos tienen una serie de módulos solares eléctricos, denominada matriz fotovoltaica. Los módulos de una matriz suelen estar conectados en grupos, que unidos forman cadenas. Las cadenas en serie se unen en una caja de conexión, que estará en lugar cercano a la matriz, desde la cual sale un cableado que lleva la energía al resto de los componentes del sistema. El primer componente al que se conectan estas líneas de suministro depende del tipo de sistema [1].

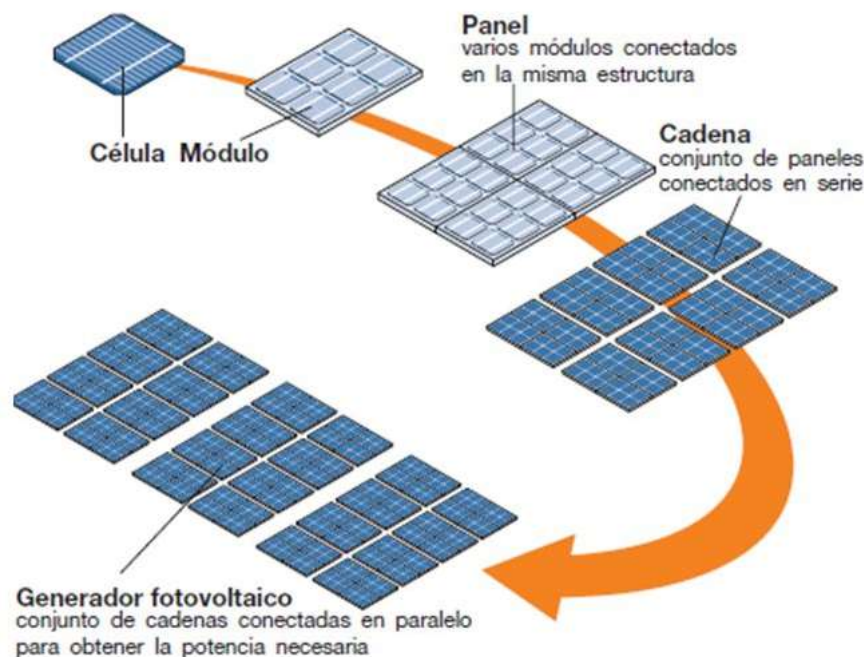


Figura 33. Formación de la matriz fotovoltaica [61].

4.7 COMPONENTES PRINCIPALES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

En primer lugar, hay que explicar los **paneles fotovoltaicos**, los cuales están formados por diferentes partes:

- **Marco:** es la estructura exterior encargada de sujetar todas las capas del panel solar juntas, que a continuación se describen. También ayuda a prevenir los daños que pudiera sufrir la placa solar en el transporte. En cuanto a seguridad, este elemento está conectado a tierra para evitar accidentes provocados por posibles cortocircuitos debidos a un mal aislamiento o defectos [1].
- **Vidrio templado:** es el cristal que protege a las células solares del polvo, suciedad y posibles impactos. Asimismo, tiene propiedades anti reflectivas para evitar que los rayos del sol se reflejen, provocando la máxima absorción posible de los rayos solares a los paneles [1].
- **Encapsulantes:** hay dos capas protegiendo la parte superior y la inferior de las células solares, típicamente están hechas de un material llamado EVA (*Ethylene co-Vinyl Acetate*). Su función es sujetar las células fotovoltaicas formando una película selladora y aislante en torno a ellas, también actúa como pegamento entre el vidrio y la cubierta posterior con las células solares. Esta capa debe ser capaz de absorber las deformaciones producidas por el calor y ser transparente para dejar pasar la luz [1].
- **Células solares:** las más habituales están formadas por diferentes capas de las cuales la de silicio es la principal y más gruesa, donde se absorben los fotones. El resto de las capas tienen funciones anti-reflectantes y absorbentes, además de facilitar la aparición de pares de electrón-hueco los cuales producirán corriente con su movimiento, generando la energía eléctrica [1].
- **Cubierta posterior:** se encarga de sostener el marco, el vidrio templado, las células solares y los encapsulantes juntos. La cubierta posterior también ayuda el conjunto a la caja de conexiones. Su función también es reflejar contra las células solares los fotones con longitudes de onda mayores que no hayan sido absorbidos en primera instancia por las células solares, aumentando así la absorción de energía [1].

- **Caja de conexiones:** Esta es la salida del panel solar. Un extremo del cable está conectado a los buses que recogen el cableado de las cadenas de células solares, mientras que el otro extremo del cable se toma como salida de la placa [1].

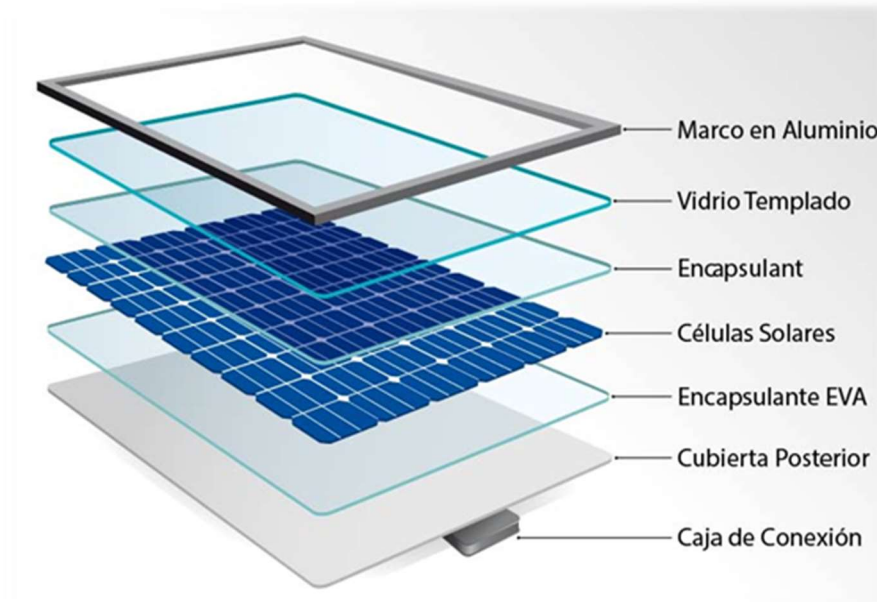


Figura 34. Componentes del panel solar [62].

Además de los propios paneles solares, las instalaciones de autoconsumo fotovoltaico se componen de otros elementos como inversores, cables, conectores y, opcionalmente, baterías.

- **Inversor:** es el elemento encargado de convertir la corriente continua, que es la que producen las placas fotovoltaicas, en corriente alterna que es la utilizada en uso doméstico e industrial [63].
- **Baterías:** son las encargadas de almacenar toda la energía eléctrica en su interior con la finalidad de usarlas cuando sea necesario. De manera habitual, se utilizan en las horas nocturnas donde no hay generación mediante energía solar y cuando se producen picos de demanda [63].
- **Regulador de carga:** la función de este elemento consiste en revisar el estado de carga de las baterías con el objetivo de alargar su vida útil [63].

4.8 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE AUTOCONSUMO

A continuación, se describirán los diferentes tipos de instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo en función de su conexión a la red.

4.8.1 SISTEMAS CONECTADOS A LA RED

Un sistema conectado a la red, en inglés *grid-tied PV system*, es el tipo más común de sistema fotovoltaico residencial, así como el más simple y menos costoso. Este tipo de sistemas se conecta a la red eléctrica y aquí se pueden producir dos situaciones diferentes:

- En la primera, se utiliza la red como "almacenamiento", es decir, cuando la instalación genera más energía de la que consume la vivienda o industria, este exceso de energía se inyecta a la red, contando el medidor de consumo hacia atrás. Esta compensación de saldos se produce mediante un mecanismo de compensación diferida o balance neto, gestionado por las compañías eléctricas, que descuenta de la electricidad obtenida de la red, los **excesos de producción** del sistema de autoconsumo [64].
- La segunda situación que se puede producir es que se utilice la red como respaldo. Cuando el consumo es mayor que la generación de la matriz solar, automáticamente se extrae energía de la red hasta satisfacer la demanda.

Las ventajas principales de los sistemas conectados a la red son la simplicidad, el bajo coste y mantenimiento, lo que los convierte en una solución sencilla para los propietarios de viviendas que ya utilizan energía de la red pública. Por otra parte, estar conectado a la red también tiene desventajas porque cuando la red se cae, también lo hace el sistema fotovoltaico. Esta función de apagado automático es requerida por los servicios públicos para la conexión a la red para la seguridad del personal de servicios públicos que trabaja en las líneas eléctricas [65].

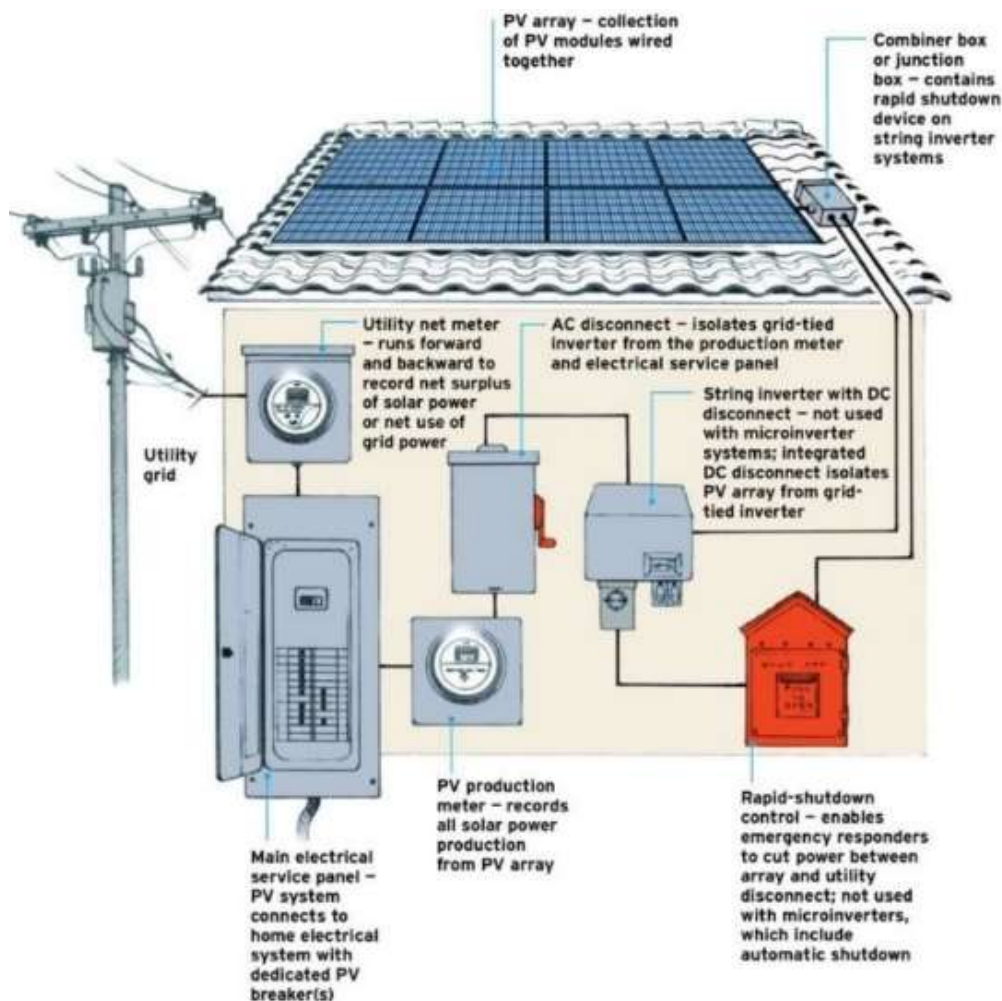


Figura 35. Esquema de un sistema conectado a la red [65].

Los sistemas conectados a la red pueden usar un inversor o inversores de cadena, que convierten la energía de CC a CA para un grupo de módulos fotovoltaicos a la vez, o microinversores, que convierten la energía de CC a CA en cada módulo individual. Una tercera opción es agregar optimizadores de CC a un sistema de inversor de cadena, que añaden algunas funciones de monitorización y optimización del rendimiento que ofrecen los microinversores, pero no convierten CC en CA. En cuanto a qué ventajas y desventajas presenta cada tipo de inversor se hablará más adelante, en el apartado correspondiente a su elección [65].

4.8.2 SISTEMAS CONECTADOS A LA RED CON BATERÍAS

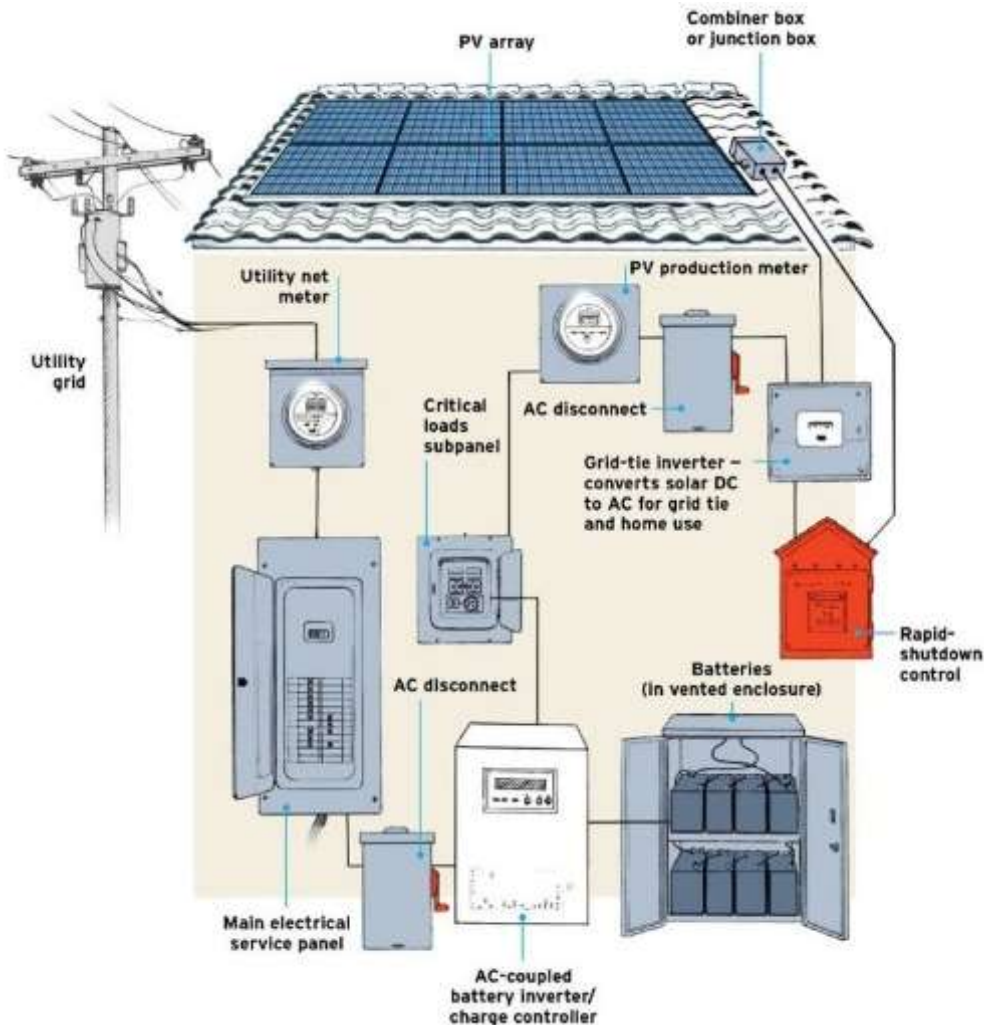


Figura 36. Sistema conectado a la red con baterías [65].

Un sistema conectado a la red se puede combinar con una batería de respaldo, de modo que la energía solar cargue las baterías y retroalimente la red cuando hay un exceso de generación. Cuando el usuario necesita más energía de la que produce la matriz solar, puede extraerla tanto de la red como de las baterías [65].

Una de las grandes ventajas de este tipo de sistema se produce cuando la red se cae. En esta situación, las baterías suministran energía que sirve a algunos circuitos domésticos. Esto le permite mantener en funcionamiento consumos importantes como la nevera, la iluminación y ordenadores durante un corte de energía. Por lo general, las baterías no

alimentan toda la instalación, ya que esto requeriría un banco de baterías mucho más caro [65].

Las desventajas de los sistemas conectados a la red con baterías son su relativa complejidad, que son técnicamente sofisticados y que son más costosos que un sistema estándar conectado a la red [65].

4.8.3 SISTEMAS AISLADOS

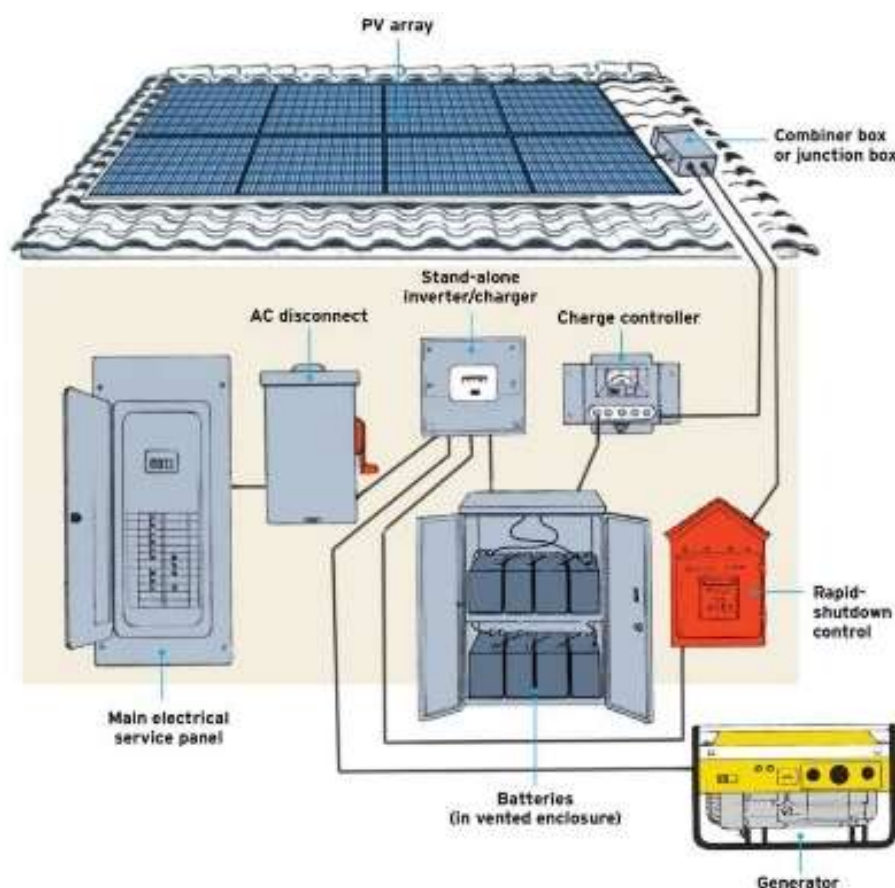


Figura 37. Esquema de un sistema aislado de la red [65].

Los sistemas aislados no tienen conexión a la red pública, siendo este tipo de autoconsumo la mejor opción para hogares lejos de las líneas de servicios públicos. Este tipo de sistemas deben incluir un banco de baterías para almacenar energía solar durante el día y alimentar la demanda durante la noche. Habitualmente, estos sistemas también pueden obtener energía de respaldo adicional de un generador de combustible (generalmente gas, diésel o propano). Una peculiaridad de este sistema es que la

electricidad generada pasa en primer lugar por las baterías, no alimenta la casa directamente desde la matriz. Las baterías se cargan con energía de CC de la matriz y son monitoreadas y controladas por un dispositivo llamado controlador de carga. La energía de la batería se convierte en CA a través de un inversor antes de suministrar energía al hogar [65].

4.8.4 SISTEMAS CONMUTADOS CON LA RED

También se puede hacer un sistema conmutado con la red. Esto se consigue mediante un conmutador que puede estar integrado en el inversor o ser independiente. Este sistema conmuta la instalación fotovoltaica de autoconsumo con la instalación de la red en 10 milisegundos, con lo que convertimos la instalación solar conectada a la red en un sistema aislado, diferenciando dos instalaciones completamente distintas [66].

4.9 OBSTÁCULOS A LOS QUE SE ENFRENTA EL AUTOCONSUMO

El principal obstáculo que dificulta la apuesta por la energía fotovoltaica es la inversión inicial que hay que desembolsar para obtener esta tecnología. A pesar de que el coste de los paneles solares es 9 veces menor que hace 15 años, sigue siendo relativamente costoso y en función de la instalación puede tardar a rentabilizarse en aproximadamente 10 años [67].

Más allá del aspecto económico, se deben eliminar todas las trabas administrativas y obstáculos para favorecer un crecimiento energético sostenible de manera inmediata. Sin embargo, en España para poder autosuministrarse energía hace falta un permiso único en Europa. Organismos como la Comisión Europea ya han mostrado su desacuerdo frente a esta traba exigiendo a España simplificar los trámites administrativos. En nuestro país se requiere al menos el doble permiso de conexión de una determinada distribuidora, y un lapso de espera de varios meses, por norma general. Por el contrario, en el resto de Europa basta con una notificación [68] [69].

Otro impedimento a la transición energética de España en materia de autoconsumo fue el llamado “**Impuesto al Sol**”, derogado en 2018. Este impuesto se definía como un “peaje

de respaldo” aplicado a la energía generada mediante el uso de paneles fotovoltaicos. Consistía en que el consumidor que estaba produciendo electricidad para su autoconsumo, cuando fuese a utilizar la red que pagamos entre todos también contribuyera porque si no, los demás consumidores “normales” estarían pagando una parte del autoconsumo. El estado consideraba que eximir del pago de un peaje de respaldo supondría la subvención al autoconsumo a costa del resto de consumidores, por ello reguló que tuvieran que pagar los peajes de transporte y distribución en la medida en que usaban el sistema, tanto para generar como consumir, y contribuir como cualquier otro consumidor en los costes [70] [71].

Sin embargo, entrando más en detalle, lo lógico sería que estos autoconsumidores pagasen por el respaldo de la red cuando necesitasen recurrir a ella para cubrir sus necesidades porque su producción fuese insuficiente y, sin embargo, según se establece en la regulación aprobada, el autoconsumidor pagaba también, aunque no estuviese consumiendo de la red, es decir, en aquellos momentos en los que los paneles fotovoltaicos estuvieran funcionando y por lo tanto no utilizase la red [70] [71].

El problema no sólo era el peaje, sino también ocurría que los consumidores carecían de cualquier retorno por la energía que ellos producían y volcaban en la red con el agravante de que la compañía eléctrica si facturaba a los usuarios [70] [71].

4.10 REGULACIÓN EN ESPAÑA DEL AUTOCONSUMO

“Mediante el Real Decreto 244/2019, se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica que regula las modalidades de autoconsumo de energía eléctrica definidas en el artículo 9 de la Ley 24/2013 del Sector Eléctrico. Lo dispuesto en este Real Decreto resulta de aplicación a las instalaciones y sujetos acogidos a cualquiera de las modalidades de autoconsumo de energía eléctrica definidas en dicho artículo. Así, las instalaciones de autoconsumo deberán pertenecer a una de las siguientes modalidades: autoconsumo sin excedentes y con excedentes” [72].

4.10.1 AUTOCONSUMO SIN EXCEDENTES

Se denominan así a las instalaciones de autoconsumo conectadas a la red de distribución o transporte que disponen de un sistema antivertido tal que impide la inyección de energía eléctrica excedente a la red de transporte o de distribución [72].

4.10.2 AUTOCONSUMO CON EXCEDENTES

Se denominan así a las instalaciones que, además de suministrar energía eléctrica para autoconsumo, pueden inyectar energía excedente en las redes de transporte y distribución. Dentro de este grupo las instalaciones con excedentes podrán ser [72]:

- Autoconsumo con excedentes acogida a compensación:
“Instalaciones de autoconsumo con excedentes, en las que productor y consumidor optan por acogerse al sistema de compensación de excedentes. El consumidor utiliza la energía procedente de la instalación de autoconsumo cuando la necesita, pudiendo comprar energía de la red en los momentos en que esta energía no sea suficiente para satisfacer su consumo eléctrico” [72].
“Cuando no se consume la totalidad de la energía procedente de la instalación de autoconsumo ésta puede inyectarse a la red y, en cada periodo de facturación, la factura emitida por la comercializadora compensará el coste de la energía comprada a la red con la energía excedentaria vertida a la red valorada al precio medio del mercado horario menos el coste de los desvíos o al precio acordado con la comercializadora, aplicándose posteriormente los beneficios a los que puedan acogerse y los peajes e impuestos que procedan. En ningún caso el resultado podrá ser negativo” [72].

Para ello es necesario que se cumplan todas las condiciones siguientes:

- i. La fuente de energía primaria ha de ser de origen renovable.
- ii. La potencia total de las instalaciones de producción asociadas no sea superior a 100 kW.
- iii. En su caso, el consumidor haya suscrito un único contrato de suministro para el consumo asociado y para los consumos auxiliares con una empresa comercializadora.
- iv. El consumidor y productor asociado hayan suscrito un contrato de compensación de excedentes de autoconsumo definido en el artículo 14 del Real Decreto 244/2019.

- v. La instalación de producción no esté sujeta a la percepción de un régimen retributivo adicional o específico.
- Autoconsumo con excedentes **no acogida a compensación**:
“Pertenece a esta modalidad todos los autoconsumos con excedentes que no cumplan con alguno de los requisitos para pertenecer a la modalidad anterior, o que voluntariamente opten por no acogerse a ella. En este caso, los excedentes se venderán en el mercado eléctrico” [72].
“Sin embargo, a la instalación de autoconsumo le será de aplicación las mismas normas que a una planta de producción de energía eléctrica. Lo que implica diversos requisitos de seguridad, mantenimiento y trámites como por ejemplo inscribirse en el RAIPRE (Registro Administrativo de Instalaciones Productoras de Energía Eléctrica), firmar un contrato de representación en el mercado eléctrico para poder acceder a él y vender a través de ese representante, y obtener una licencia de actividad con todos los trámites fiscales y administrativos que conlleva” [73].

Así, las instalaciones de autoconsumo deberán pertenecer a una de las modalidades recogidas en el siguiente cuadro resumen:

Autoconsumo INDIVIDUAL Un consumidor asociado O Autoconsumo COLECTIVO Varios consumidores asociados	Instalación PRÓXIMA en RED INTERIOR Conexión Red interior.	SIN excedentes (individual) Mecanismo anti-vertido.	CONSUMIDOR Titular del suministro PRODUCTOR No existe TITULAR INSTALACIÓN Consumidor PROPIETARIO Puede ser diferente
		SIN excedentes ACOGIDA a compensación (colectivo) Mecanismo anti-vertido.	CONSUMIDOR Titular del suministro PRODUCTOR No existe TITULAR INSTALACIÓN Consumidor PROPIETARIO Puede ser diferente
		CON excedentes ACOGIDA a compensación Fuente renovable. Potencia de producción $\leq 100\text{kW}$. Si aplica, contrato único consumo-auxiliares. Contrato de compensación No hay otro régimen retributivo.	CONSUMIDOR Titular del suministro PRODUCTOR Titular de la instalación TITULAR INSTALACIÓN El inscrito en el registro de autoconsumo PROPIETARIO Puede ser diferente
	Instalación PRÓXIMA a TRAVÉS DE RED Conexión a red BT del mismo centro de transformación. Distancia entre contadores generación y consumo $< 500\text{ m}$, ambos conectados en BT. Misma referencia catastral (14dígitos).	CON excedentes NO ACOGIDA a compensación Resto de instalaciones con excedentes.	CONSUMIDOR Titular del suministro PRODUCTOR Titular de la instalación TITULAR INSTALACIÓN El inscrito en el registro de autoconsumo y RAIPRE PROPIETARIO Puede ser diferente
		CON excedentes NO ACOGIDA a compensación Instalaciones con excedentes.	CONSUMIDOR Titular del suministro PRODUCTOR Titular de la instalación TITULAR INSTALACIÓN El inscrito en el registro de autoconsumo y RAIPRE PROPIETARIO Puede ser diferente
		CON excedentes NO ACOGIDA a compensación Instalaciones con excedentes.	CONSUMIDOR Titular del suministro PRODUCTOR Titular de la instalación TITULAR INSTALACIÓN El inscrito en el registro de autoconsumo y RAIPRE PROPIETARIO Puede ser diferente

Figura 38. Cuadro resumen de las modalidades y las diferentes posibilidades de autoconsumo [72].

A continuación, se resumen los trámites más significativos que deben realizarse en las instalaciones de autoconsumo ante las administraciones y compañías eléctricas distribuidoras y/o comercializadoras.

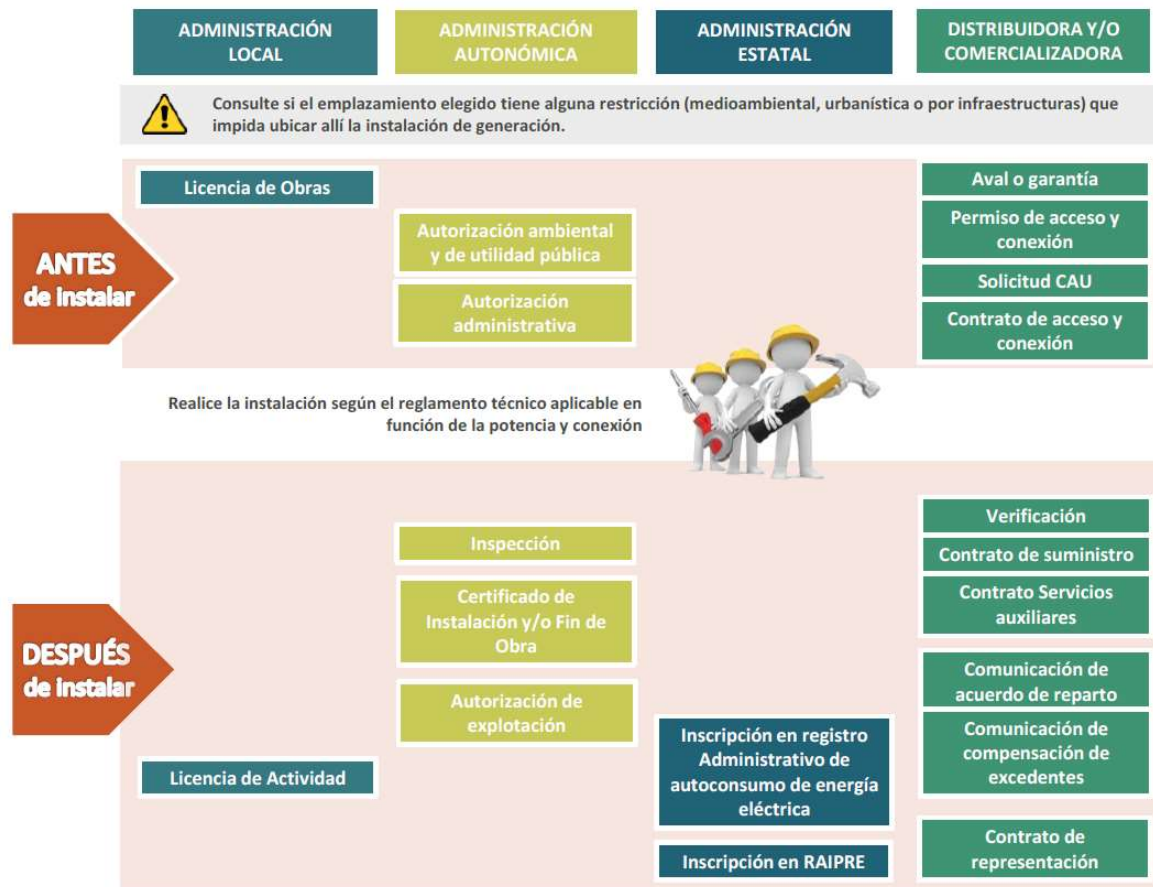


Figura 39. Resumen de las etapas de tramitación y organismos/entidades implicados [72].

Capítulo 5. DESCRIPCIÓN DE LA INDUSTRIA A ALIMENTAR

En este Proyecto de Fin de Máster se propone diseñar una instalación fotovoltaica para autoconsumo en una nave industrial en Seseña (Toledo). Este complejo industrial pertenece a un parque de maquinaria donde se gestionan máquinas, equipos y se almacenan piezas de repuesto, además de tener oficinas.

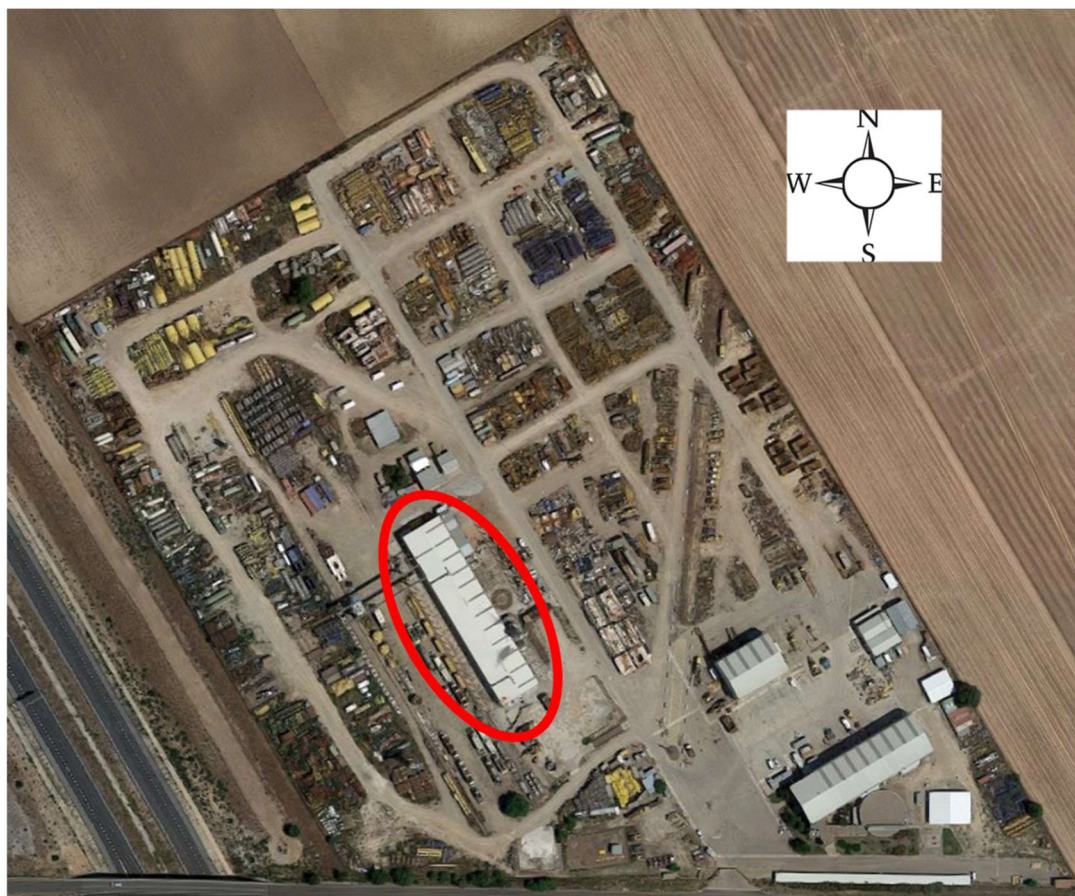


Figura 40. Vista aérea del Parque de Maquinaria en Seseña [74].

De las cubiertas disponibles, se escogerá la de máxima longitud. Esta elección se debe a que su superficie disponible es mayor y, además, la orientación de su cumbrera está prácticamente orientada respecto a la dirección Norte-Sur, en concreto a 30°. Este ángulo

se denomina **azimut**. Cuanto menor sea este ángulo, la nave estará más alineada con la dirección Norte-Sur, la cual es la más idónea para la colocación de las placas solares con el objetivo de maximizar la irradiación de luz solar a lo largo del día.

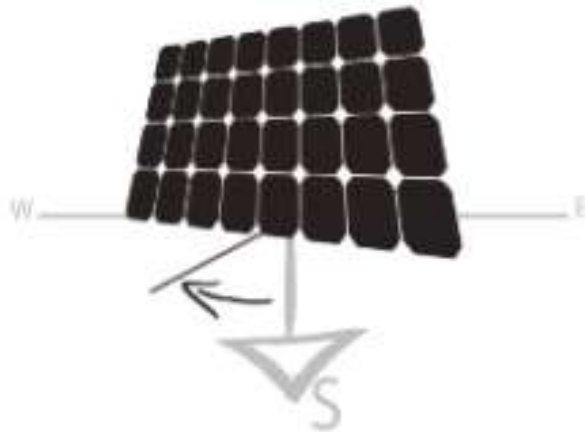


Figura 41. Ángulo azimut [75].

Las dimensiones de esta nave vistas en planta son 99 metros de largo por 21 metros de ancho. Debido a que la cubierta tiene un inclinación del 7%, la superficie calculada en verdadera magnitud es aproximadamente igual a la obtenida mediante la vista en planta, por lo que esta inclinación se despreciará.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de calcular la superficie disponible es la existencia de elementos como chimeneas, ventanas o claraboyas en la cubierta. En la cubierta de la nave industrial elegida no se encuentran elementos de este tipo por lo que se supondrá toda la superficie como útil para la colocación de los paneles solares.

$$\text{Área disponible} = 21m \times 99m = 2079 m^2$$

Para un mejor aprovechamiento de la luz solar, los paneles irán inclinados con respecto a la superficie donde se colocarán. Más adelante se tendrá en cuenta el espacio necesario entre paneles solares para que no se produzcan sombra entre ellos y baje el rendimiento de la instalación.

5.1 FACTORES A TENER EN CUENTA PARA EL DIMENSIONAMIENTO

Para dimensionar la instalación es necesario definir y estudiar una serie de factores que influirán en los resultados de energía obtenida.

En primer lugar, la **irradiación**. Este parámetro se define como la irradiancia acumulada durante un periodo de tiempo. A su vez, la **irradiancia** se define como la potencia contenida en la luz solar. La irradiancia depende de los efectos atmosféricos (destacan la absorción y dispersión), las variaciones atmosféricas (nubes, contaminación, humedad), y la posición del Sol definida por la latitud, estación del año y hora del día [1].

Para conocer la irradiación existente en nuestro complejo industrial, se hará uso de una herramienta de la Comisión Europea llamada “*PhotoVoltaic Geographical Information System*” (PVGIS). Esta herramienta es una base de datos destinada a la investigación de recursos solares, estudios de desempeño fotovoltaico y la difusión de conocimiento y datos sobre energía solar [76].

En primer lugar, hay que rellenar ciertos datos como la localización a evaluar, en nuestro caso de la nave industrial: Latitud = 40.11° y Longitud = -3.67° .

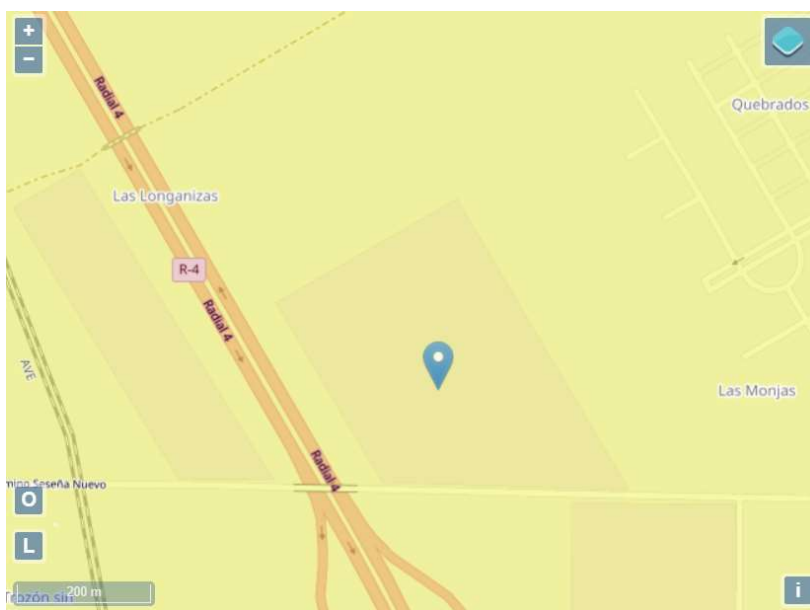


Figura 42. Localización de la nave industrial en el mapa de la herramienta PVGIS [75].

A continuación, se elegirán entre distintas opciones y se introducirán parámetros para realizar la simulación de nuestra instalación en la localización especificada.



Figura 43. Panel de variables de la herramienta PVGIS [75].

En primer lugar, se seleccionará la **base de datos de radiación solar** a utilizar. Para este proyecto, se utilizará PVGIS-SARAH ya que ofrece la base de datos sobre Europa con menor incertidumbre, basada en imágenes de satélite.

A continuación, se elegirá la **tecnología fotovoltaica**, cuyo rendimiento dependerá de la temperatura, la radiación solar disponible y de la distribución espectral de esta. Para nuestra instalación se utilizarán células solares de silicio cristalino ya que es la tecnología más extendida. Esto se debe a su razonable relación rendimiento-precio.

El siguiente parámetro a especificar será la **potencia fotovoltaica pico instalada** en kW_p que será la suma de todos los paneles solares que se instalen, y obtenida del fabricante del panel. Esta potencia instalada se calculará más adelante cuando se defina la demanda que desea satisfacer y se valore el espacio disponible. Sin embargo, para calcular en primera instancia los ángulos óptimos de inclinación de los paneles solares no nos influye la potencia instalada, por lo que se dejará el valor de 1 kW_p. Posteriormente, cuando se calcule la potencia total generada se introducirá la cantidad real de potencia de los paneles fotovoltaicos instalados.

Otro parámetro importante son las **pérdidas estimadas del sistema** que hacen que la potencia disponible para el consumo sea inferior a la potencia producida por los módulos fotovoltaicos. Existen varias causas como las pérdidas óhmicas en el cableado, las pérdidas en el rendimiento de los inversores y la suciedad sobre los módulos fotovoltaicos. En adición, el rendimiento de los módulos también tiende a disminuir con el paso del tiempo, reduciéndose así la potencia generada alrededor de un 0,5 % al año. Por tanto, un valor razonable y habitual que se utiliza para los cálculos se define en torno al 14 % de pérdidas [77] [78] [79].

Finalmente, en cuanto a las **opciones de montaje**, esta será libre. Esto se debe a que la instalación no estará integrada en el edificio, sino que los paneles estarán soportados por una estructura. El ángulo de azimut estará fijado a -30° determinado por la orientación del edificio y en la herramienta PVGIS se marcará la opción de optimizar la inclinación de las placas, con el objetivo de obtener el valor óptimo de este parámetro.

En resumen, esta herramienta nos ofrece numerosos resultados de la simulación, como la irradiación solar mensual, la producción de energía, e incluso la inclinación ideal para el máximo aprovechamiento de la energía solar a lo largo de todo el año:

Datos proporcionados:	
Localización [Lat/Lon]:	40.111, -3.668
Horizonte:	Calculado
Base de datos:	PVGIS-SARAH
Tecnología FV:	Silicio cristalino
FV instalada [kWp]:	1
Pérdidas sistema [%]:	14
Resultados de la simulación:	
Ángulo de inclinación [°]:	34 (opt)
Ángulo de azimut [°]:	-30
Producción anual FV [kWh]:	1602.76
Irradiación anual [kWh/m ²]:	2049.25
Variación interanual [kWh]:	62.97
Cambios en la producción debido a:	
Ángulo de incidencia [%]:	-2.66
Efectos espectrales [%]:	0.49
Temperatura y baja irradiancia [%]:	-7.02
Pérdidas totales [%]:	-21.79

Figura 44. Resultados de la simulación [75].

Dada la localización de nuestra nave y fijado el ángulo de azimut a -30° debido a la desviación de la nave industrial respecto la dirección Norte-Sur, tras la simulación se ha obtenido un **ángulo de inclinación óptimo** de 34° para los paneles solares. Para realizar este cálculo, la herramienta maximiza el total de la producción de energía a lo largo de todos los meses del año en función de su base de datos.

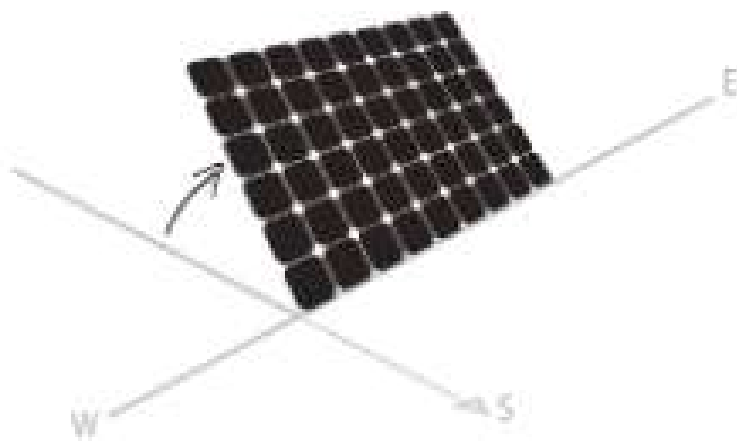


Figura 45. Representación del ángulo de inclinación [75].

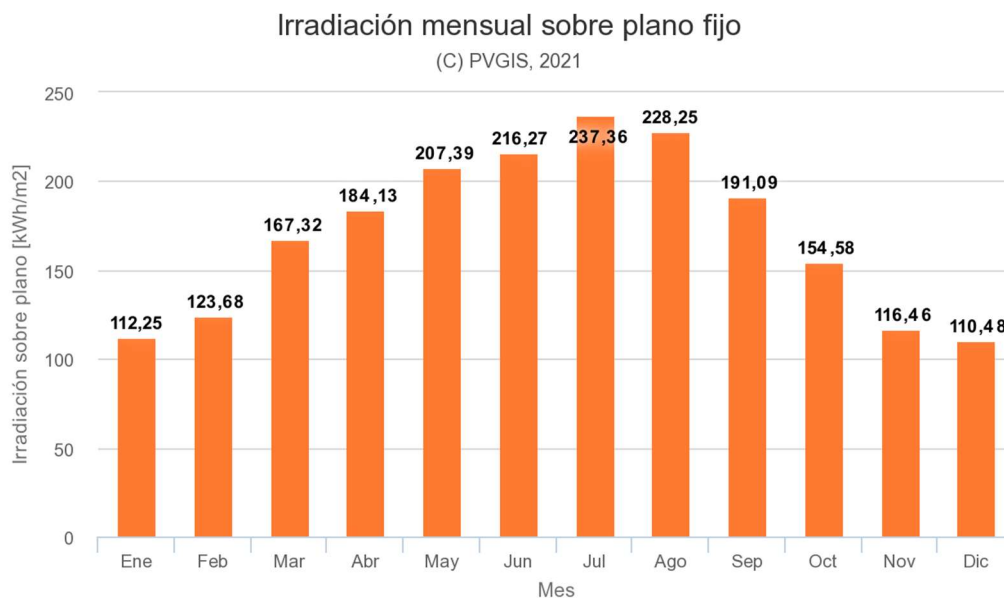


Figura 46. Irradiación mensual sobre plano fijo obtenido de la simulación [75].

Conocida la inclinación de los paneles solares, debemos de tener en cuenta este factor para calcular la separación entre los mismos, y que no se generen sombra entre ellos. Para

optimizar la mínima separación de los paneles, tendremos que partir de la situación más desfavorable donde se pueda producir sombra. Esto ocurre durante el solsticio de invierno (en el hemisferio norte), el 21 de diciembre, donde el ángulo de declinación es de -23.45° .

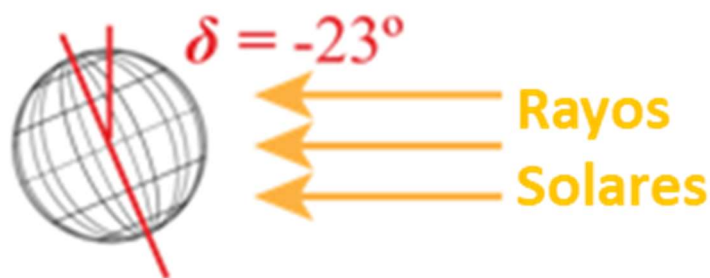


Figura 47. Incidencia de los rayos solares durante el solsticio de invierno (hemisferio norte) [80].

A continuación, para conocer la distancia mínima entre paneles será necesario realizar una serie de cálculos utilizando la latitud y los grados que el Sol se inclina (declinación), que tomará dicho valor de 23.45° .

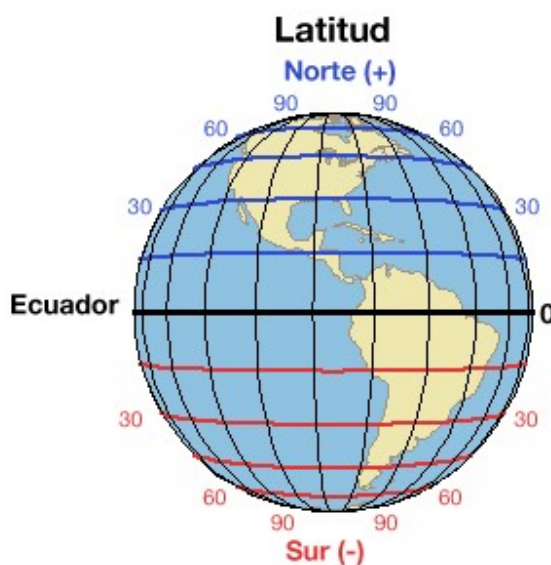


Figura 48. Ángulos de latitud [81].

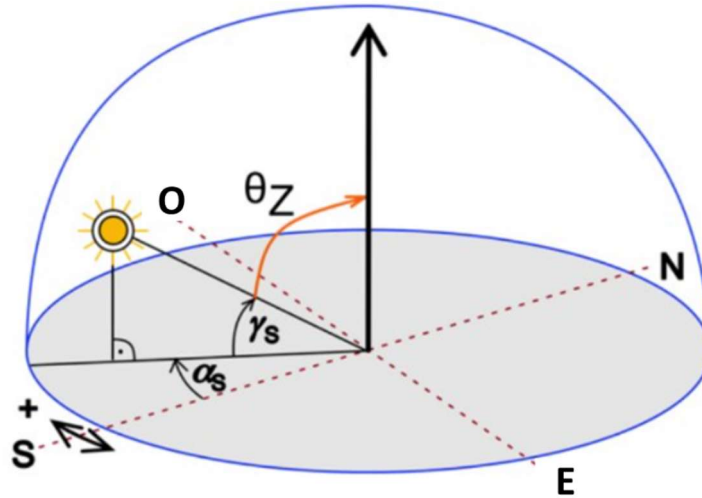


Figura 49. Representación incidencia del Sol [80].

Siendo θ_z el ángulo entre la incidencia solar y la normal de un panel solar horizontal, en el solsticio de invierno, este ángulo se calcula con la suma de la latitud de la ubicación y 23.45° de la declinación del planeta Tierra. En la siguiente figura se explica visualmente la obtención de este ángulo:

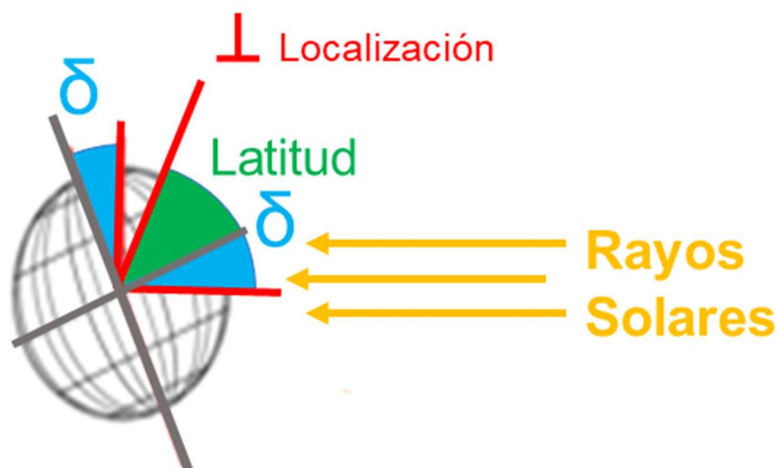


Figura 50. Obtención gráfica de la suma de ángulos de latitud y declinación.

Entonces:

$$\theta_z = \text{Latitud} + \text{Declinación} = 40.11^\circ + 23.45^\circ = 63.56^\circ$$

A continuación, el ángulo que nos interesa conocer es el formado por la sombra que queda tras los paneles, que vendrá determinado por el recién hallado θ_z .

$$\text{Ángulo de sombra crítica} = \gamma_s = 90^\circ - \theta_z = 90^\circ - 63.56^\circ = 26.44^\circ$$

Lo siguiente será hallar la distancia mínima entre los paneles mediante la siguiente expresión obtenida mediante el Teorema del Seno:

$$d_{min} = b \times \frac{\text{Seno}(\gamma_s + \beta)}{\text{Seno}(\gamma_s)}$$

Siendo b la longitud del panel, como indica la siguiente figura:

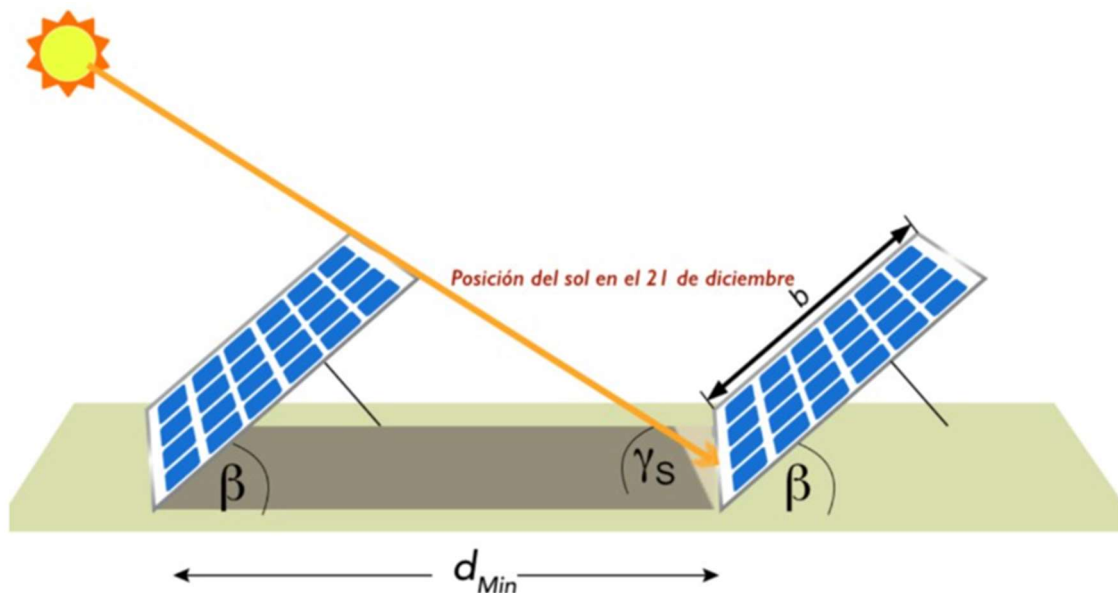


Figura 51. Representación distancia mínima entre paneles [82].

Los ángulos de sombra crítica y de inclinación óptima de los paneles ya los conocemos, son 26.44° y 34° , respectivamente. Por tanto, la única incógnita para calcular la distancia mínima entre paneles es la longitud del panel. Este parámetro se determinará en el siguiente apartado donde previamente se definirán la instalación y los equipos, a partir de los cuáles se estudiará la longitud óptima para nuestras necesidades teniendo en cuenta su disponibilidad en el mercado. Tras concretar la longitud, se obtendrá directamente la distancia mínima entre paneles [83].

A continuación, dividiendo la longitud total de la cubierta entre la **distancia mínima** entre paneles, se obtendrá el número máximo de filas de paneles que se podrá instalar y, por

último, mediante la ficha técnica de los paneles elegidos, se calculará la potencia máxima posible en la cubierta.

Este proceso es iterativo ya que con diferentes longitudes de paneles se obtendrán diferentes números de filas de paneles, variando a su vez la potencia instalada. Se tratará de maximizar teniendo en cuenta las necesidades de la instalación en cuanto a el consumo que se pretende cubrir.

Para visualizar el acabado final de la instalación se han llevado a cabo una serie de bocetos vistos desde planta y perfil:

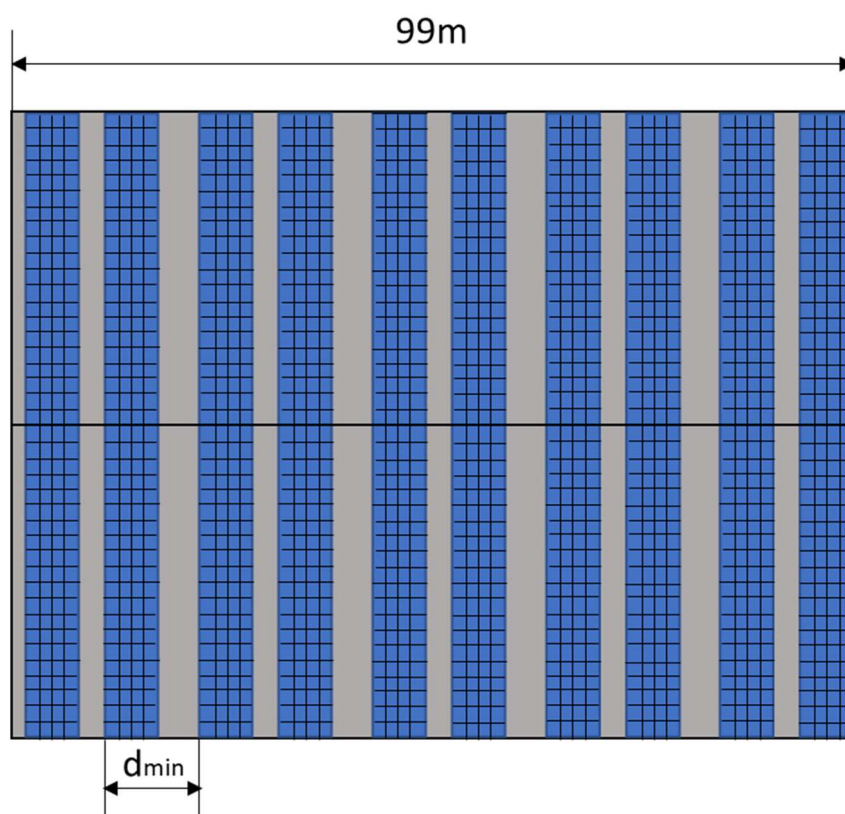


Figura 52. Boceto en planta de la instalación indicando la distancia mínima entre las columnas de paneles.

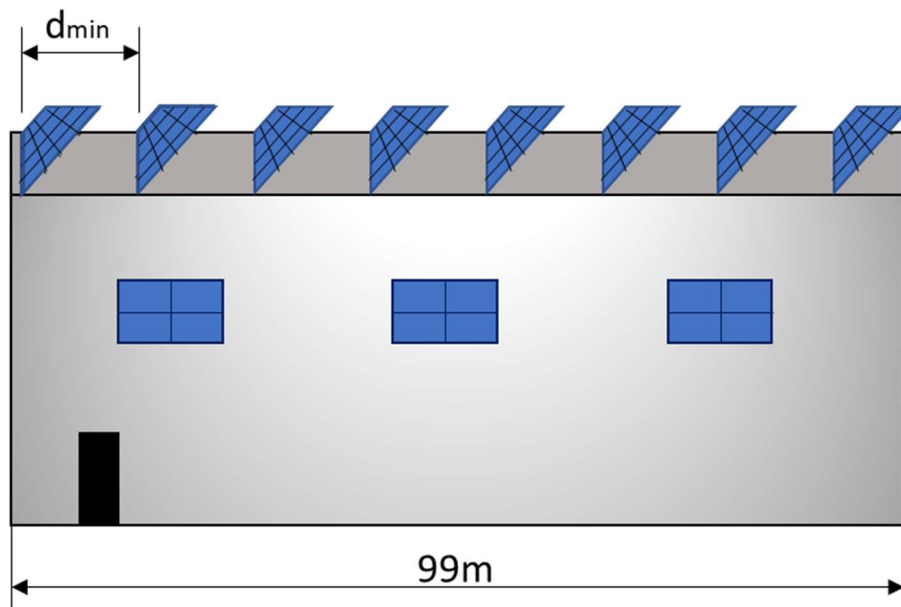


Figura 53. Boceto en perfil de la instalación indicando la distancia mínima entre los paneles.

5.2 CONSUMOS DE LA INSTALACIÓN

Para empezar a dimensionar la instalación es imprescindible estudiar los consumos que se quieren satisfacer y la potencia instalada de la que se dispone en el complejo industrial.

Para el estudio de viabilidad se utilizarán los datos del año 2019, ya que en 2020 no se ha desarrollado una actividad normal en el complejo industrial debido a la pandemia del COVID-19. Cabe destacar que, durante el proyecto, el sistema tarifario eléctrico español se modificó en junio de 2021, pero como ya se había iniciado el proyecto utilizando los datos de 2019, el estudio de viabilidad se llevará a cabo con las tarifas de 2019.

De las facturas emitidas por la compañía eléctrica en 2019 se han extraído los siguientes consumos mensuales:

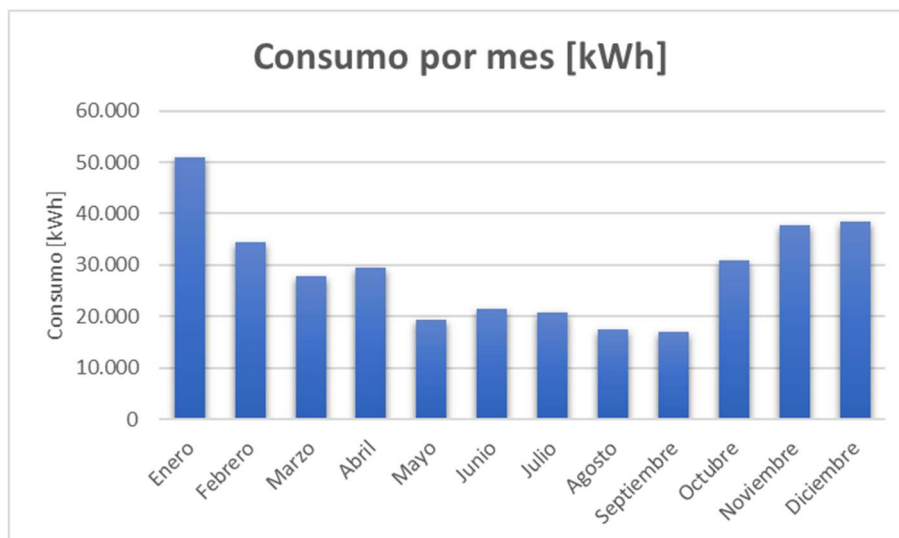


Figura 54. Consumos mensuales del complejo industrial en el año 2019.

Del consumo mensual se puede concluir que será interesante instalar una potencia capaz de suplir como mínimo el consumo mensual de todos los meses de verano, donde el consumo alcanza un mínimo. Así mismo, será interesante estudiar la posibilidad de sobredimensionar la instalación si el espacio disponible en la cubierta lo permitiese. De esta forma, además de suplir la totalidad del consumo mensual de los meses de verano, la instalación también será capaz de suplir una mayor parte de la demanda producida en los meses de invierno con esta potencia instalada extra. Esto último es muy importante ya que la producción de estos meses es menor debido a las condiciones meteorológicas, y tener más potencia instalada ayudaría a generar más electricidad.

En adición, la empresa dueña del parque de maquinaria prevé un aumento del consumo en los próximos años debido a que está aumentando y renovando la flota de vehículos de la compañía con vistas a electrificar el parque automovilístico. Por ello, será necesario instalar puntos de recarga dentro del recinto y será de utilidad sobredimensionar la instalación.

	Energía Consumida (kWh)
Enero	50886
Febrero	34387
Marzo	27774
Abril	29419
Mayo	19275
Junio	21569
Julio	20847
Agosto	17442
Septiembre	17019
Octubre	30898
Noviembre	37682
Diciembre	38524
TOTAL AÑO 2019	345722

Figura 55. Consumos mensuales y total del año 2019.

A parte de la energía total que se consume, es importante estudiar el consumo medio por franja horaria, es decir, la cantidad de energía que se va a consumir de media en cada hora. Estudiar este dato es muy importante debido a que con nuestra instalación queremos ser capaces suplir la demanda para no necesitar energía de la red, aunque sin sobredimensionar en exceso la instalación. Por ello habrá que encontrar un punto intermedio donde se satisfaga la mayor parte de la demanda durante cualquier hora, pero sin llegar a suplir toda la demanda en horas pico. El problema surge debido a que la generación no es constante a lo largo de todo el año, por lo que de igual manera que para el consumo mensual, se tendrá que instalar capacidad más que suficiente para suplir el consumo medio horario por día de la semana y por hora del día, para que la instalación sea realmente útil durante todo el año.

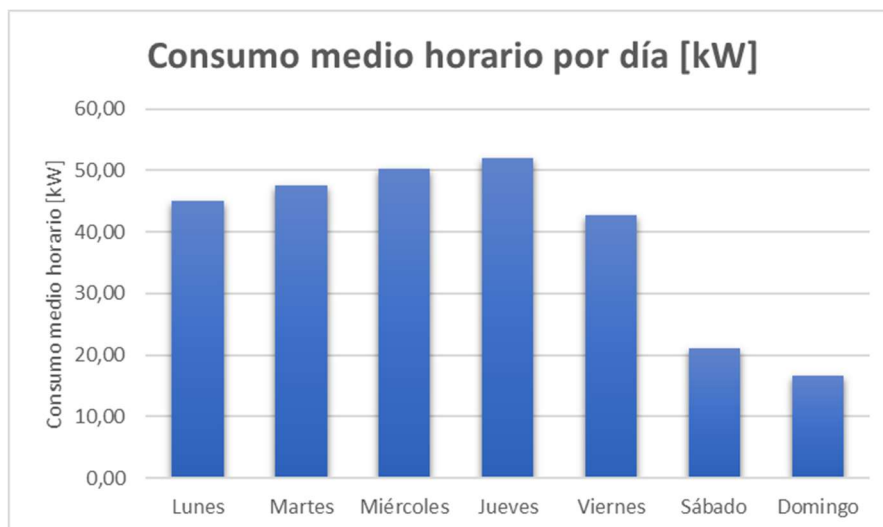


Figura 56. Consumo medio horario por día en 2019.

Se observa que los sábados y domingos hay una menor actividad ya que la planta está cerrada, de igual forma que ocurre con los meses de verano. Este consumo, a su vez, coincide con las horas nocturnas donde no se trabaja, ya que los horarios habituales de trabajo están comprendidos entre las 7:00 y las 17:30. Esto se puede ver en la gráfica siguiente del consumo medio horario.

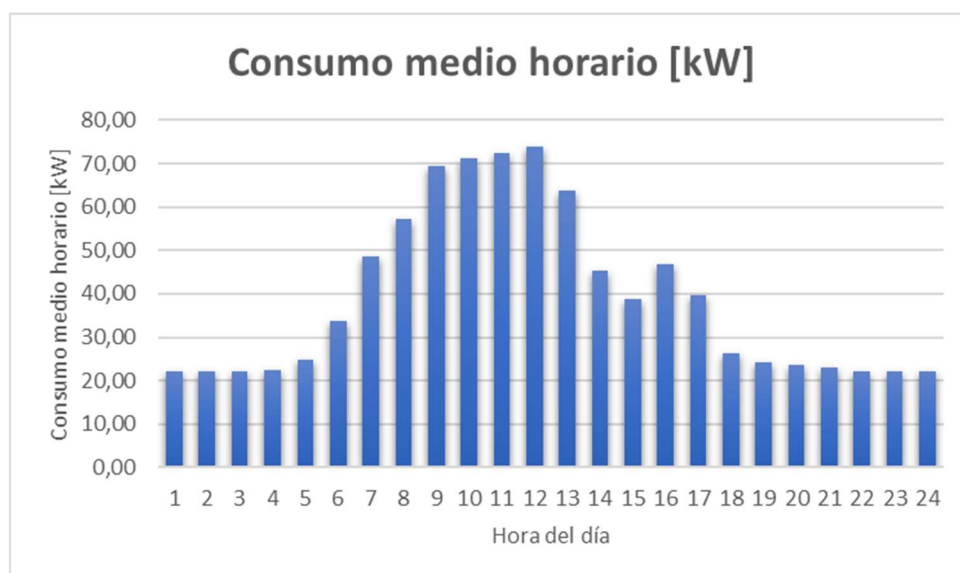


Figura 57. Consumo medio horario en 2019.

Por tanto, esta potencia base de aproximadamente 20 kW por hora está principalmente destinada a iluminación de todo el recinto y circuitos que requieren ser alimentados constantemente.

Finalmente, tras analizar las curvas de consumos se nos presentan dos opciones:

La primera opción sería implantar **un sistema conectado a la red sin excedentes y con baterías**. Para esta opción utilizaríamos toda la cubierta disponible para instalar paneles solares y generar energía. Si el consumo es menor que la energía que generamos en un determinado instante, acumulamos los excedentes en las baterías. Si ocurre lo contrario, nos apoyaremos de las baterías o en su defecto en la red para suplir nuestros consumos.

Por la noche y en días lluviosos o nublados, no seremos capaces de generar tanta energía, por lo que tendremos que utilizar o bien nuestras baterías, o bien recibir energía de la red. Una ventaja de este tipo de instalación es que puede utilizar la energía acumulada en las baterías en horas punta donde el precio de la electricidad es más alto, y recurrir a la energía de la red por las noches durante las horas valle donde el precio de la electricidad es menor. Otra de las ventajas de esta opción es que las instalaciones sin excedentes requieren menos exigencias, trámites y burocracia. Por otra parte, una de las principales desventajas es que las baterías deben de tener gran capacidad para poder satisfacer una demanda considerable, por lo que aumentaría en gran medida el coste de inversión si nuestro objetivo es cubrir con baterías toda la demanda de todas las horas de la noche. Además, requieren de más mantenimiento que se suma al elevado coste de inversión. Por tanto, se descartará esta opción.

La segunda opción es implantar una instalación **sin baterías y con o sin excedentes**, en función de la potencia instalada y lo que le interese a la empresa dueña del parque de maquinaria. Directamente generamos todo lo que seamos capaces. Si generamos más de lo que consumimos, volcamos la energía a la red y nos beneficiamos económicamente en el caso de ser con excedentes. Si no tuviese excedentes, simplemente perdemos esa energía producida de más. Por el contrario, si no generamos lo suficiente, típicamente por las noches, tendremos que pagar energía de la red. Una ventaja es que por las noches durante las horas valle, la electricidad es más barata.

Finalmente, se optará por esta segunda opción de instalación sin baterías y sin excedentes, dado que el objetivo de la empresa dueña del parque de maquinaria es ahorrar en gasto en electricidad, no generar en exceso y verter a la red beneficiándose de ello, por lo que prefiere ahorrarse los trámites y burocracia necesario para ello.

Llegados a este punto y tras definir la capacidad instalada de la instalación, habrá que fijarse si la instalación es mayor o menor que 100 kW. En función de esto, como se comentó en el apartado 4.10 de la Regulación en España del Autoconsumo, la instalación deberá realizar los trámites correspondientes a su condición de generación.

Como se comentó en el apartado 4.8.1 de Sistemas conectados a la red, un sistema conectado y sin baterías es, en resumen, el sistema más común, simple y menos costoso. Por estas razones, se optará a diseñar la instalación presentada en el párrafo anterior. También, debido a la gran capacidad de generación que tendrá la instalación durante los meses más soleados del año, de manera que podamos inyectar energía a la red a cambio de reducciones en la factura.

Capítulo 6. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE AUTOCONSUMO

En este apartado se tratarán todos los elementos que formarán parte de nuestra instalación fotovoltaica de autoconsumo. Se hará una comparativa entre distintos modelos de cada elemento teniendo en cuenta aspectos técnicos y económicos, y se llevará a cabo la elección de cada elemento.

6.1 *PANEL SOLAR*

Los paneles solares son el elemento principal de un sistema fotovoltaico y, para aplicaciones industriales donde se utilizan en grandes cantidades, representan un alto porcentaje del coste de toda la instalación. Para sistemas aislados, las baterías son el mayor porcentaje de la inversión debido a su alto precio y a la menor cantidad de placas solares para este tipo de instalaciones.

Explicada la importancia de estos elementos, es muy importante dimensionar la instalación adecuadamente seleccionando los paneles solares necesarios para cada necesidad. Para ello habrá que fijarse en las siguientes especificaciones que encontraremos en la ficha técnica.

6.1.1 POTENCIA NOMINAL

La potencia nominal de los módulos solares se mide en **STC (Standard Test Conditions)**. Estas condiciones de prueba estándar se miden en condiciones de laboratorio con una irradiancia de 1000 W por metro cuadrado de luz solar, con un espectro estándar (AM 1.5) y con una temperatura en la celda solar de 25°C. El valor medido será el valor nominal, que se mide en vatios-pico (W_p) [1] [84].

El espectro estándar AM 1.5 (*Air Mass*) representa la longitud de la trayectoria que toma la irradiancia a través de la atmósfera, normalizada a la longitud de trayectoria más corta

posible (L_0), que es la longitud de la trayectoria perpendicular a la superficie de la Tierra. Por tanto, AM 1.5 significa que cruzará 1,5 veces la longitud de la atmósfera, y esto se produce con un ángulo zenit de 48.2° [1] [84].

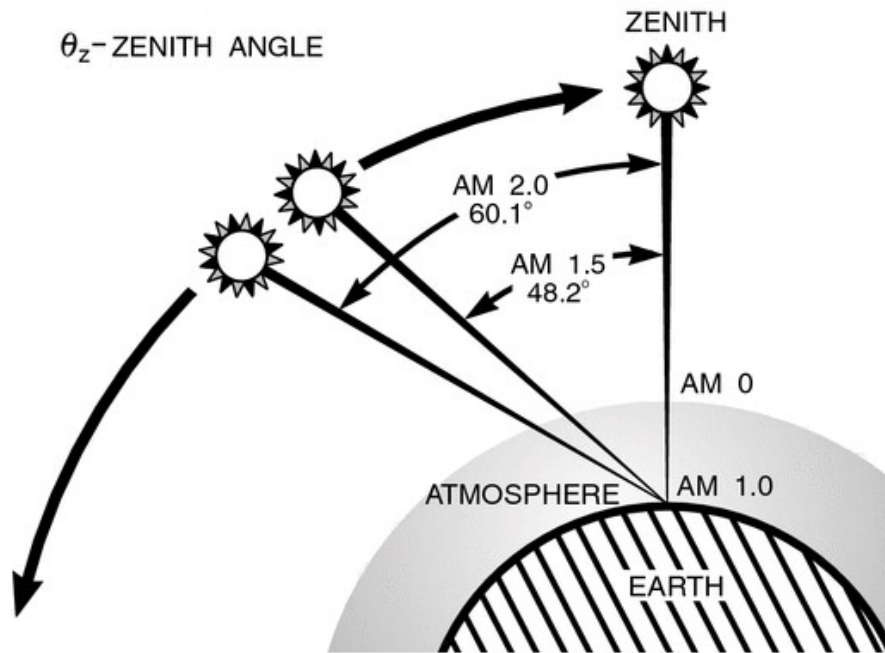


Figura 58. Diferentes AM utilizados para el estudio de energía solar [1].

Hay que tener en cuenta que los paneles solares están formados por muchas células solares. El comportamiento de la celda solar se puede describir simplificado como el modelo de un diodo.

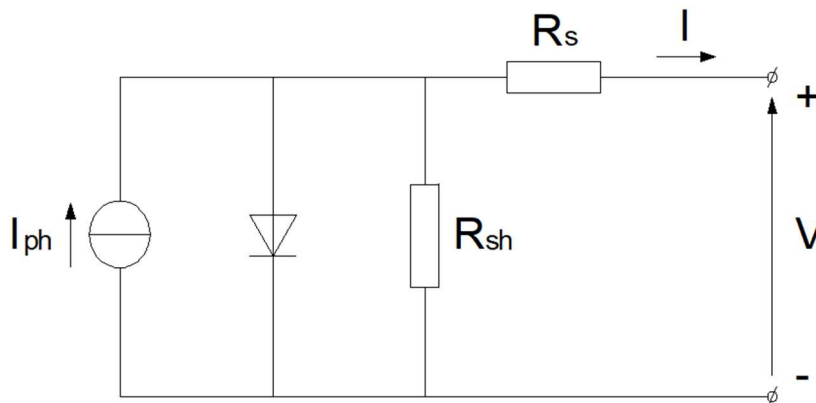


Figura 59. Modelo de la célula solar simplificado a un diodo [1].

Y su comportamiento viene representado en la siguiente gráfica de Intensidad-Voltaje.

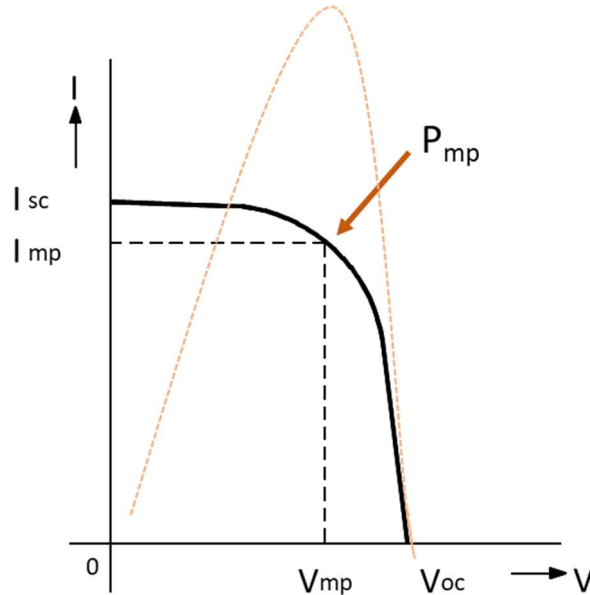


Figura 60. Curva I-V de las celdas solares [1].

El punto de máxima potencia no se consigue ni en cortocircuito ni en circuito abierto, donde la intensidad y tensión son máximas respectivamente, ya que no es posible tener ambas situaciones simultáneamente. Se consigue con intensidades menores que la de cortocircuito y con tensiones menores que la del circuito abierto. Esto se debe al factor de forma (**FF**, **Fill Factor**), que se define como el cociente entre la intensidad (I_{mp}) y voltaje (V_{mp}) a los cuales se consigue la máxima potencia, entre la máxima ideal, es decir, el producto de I_{sc} y V_{oc} .

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Figura 61. Ecuación del factor de forma.

Por tanto, en función de la irradiancia y otros parámetros, nuestra placa tendrá distintos puntos de operación.

El incremento de irradiancia contribuye al incremento de la corriente. Esto se debe a que, cuanta más irradiancia, llegarán más fotones a la célula solar y, consecuentemente,

generaremos más pares de electrón-hueco (“*electron-hole pairs*”) que con su movimiento producirán la corriente.

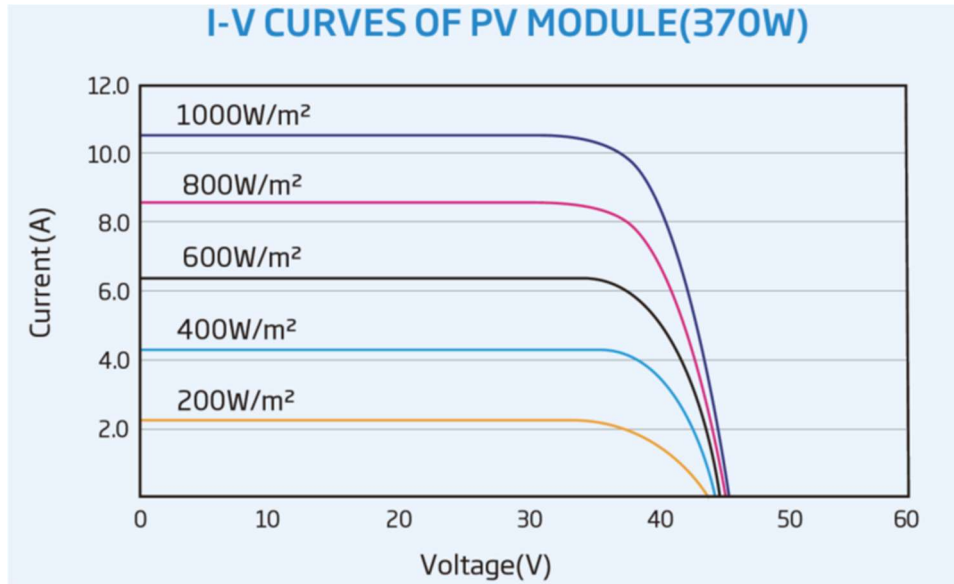


Figura 62. Curva I-V en función de diferentes irradiancias para un módulo de 370W [85].

Dado que la tensión a la que se someten las células solares la obtenemos de una fuente de tensión o batería externa y será aproximadamente constante, a mayor irradiancia se produce mayor intensidad y, finalmente, se produce más potencia.

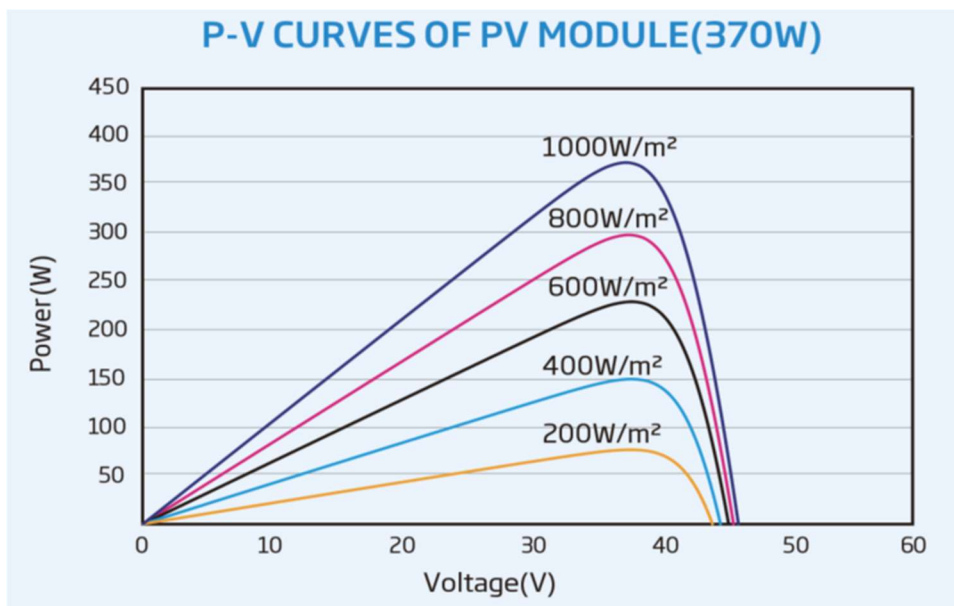


Figura 63. Curva de potencia en función de diferentes irradiancias para un módulo de 370W [85].

6.1.2 TOLERANCIA DE POTENCIA

La tolerancia de la potencia nos proporciona un rango de funcionamiento con respecto al valor nominal bajo STC. Este rango se debe a que no todas las celdas solares son idénticas, y por tanto lo mismo ocurre con los paneles solares ya que son conjuntos de celdas [86].

En el caso de los paneles solares de silicio, las celdas se fabrican por separado y después se encadenan entre ellas formando las tiras que irán alojadas en el panel solar, que a su vez irán conectadas por buses a la caja de conexión.

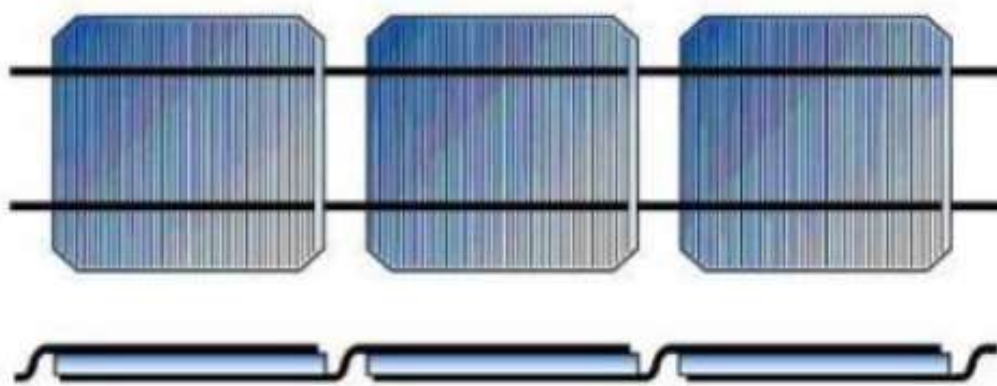


Figura 64. Conexión de las celdas fotovoltaicas [80].

Como las celdas están conectadas en serie, el sombreado o un pequeño defecto de una única celda reduce drásticamente el rendimiento de la cadena de celdas, a pesar de que existen mecanismos “by-pass” que mitigan parte de este efecto negativo. Por ello es imprescindible testear todas las celdas antes de montar las cadenas y colocar consecutivamente celdas que se comporten de manera similar, es decir, capaces de generar intensidades similares para no perjudicarse unas a otras.

6.1.3 COEFICIENTES DE TEMPERATURA

La temperatura es uno de los factores que más afecta al rendimiento de las celdas fotovoltaicas. Por una parte, las celdas fotovoltaicas incrementan su temperatura debido a la irradiación solar, ya que tienen una eficiencia menor del 100% por lo que disipan calor. A esto se suma el hecho de que las celdas están empaquetadas unas con otras por

lo que no están refrigeradas. Por otra parte, las células solares también se desprenden del calor de la transmisión de calor como la convección, conducción y radiación.

Por tanto, es fundamental fijarnos en los coeficientes de temperatura que indican las fichas técnicas de los paneles fotovoltaicos. Principalmente habrá tres coeficientes: uno para la intensidad de cortocircuito, otro para la tensión de vacío y otro para la potencia, siendo este último el más importante.

Para los paneles solares de silicio, los valores de los coeficientes de temperatura de encuentran en intervalos de manera habitual, dependiendo siempre del fabricante y del módulo:

Tabla 1. Coeficientes de temperatura para paneles solares de silicio [1].

Símbolo	Magnitud	Rango
α	I_{sc}	+0.03%/°C ↔ +0.1%/°C
β	V_{oc}	-0.33%/°C ↔ -0.40%/°C
γ	P_{mp}	-0.40%/°C ↔ -0.50%/°C

El efecto de estos coeficientes se puede observar en la siguiente expresión para la potencia donde se calcula la potencia ideal que se conseguiría en condiciones estándar de 25°C:

$$P_{mpp,25} = P_{mpp} \times \left(1 - \left(\frac{\gamma}{100} \right) \times (T_m(^{\circ}\text{C}) - 25) \right)$$

Donde T_m representa la temperatura a la que se encuentra la celda fotovoltaica.

En la siguiente figura se puede comprobar cómo afecta la temperatura tanto a la intensidad como a la tensión y, consecuentemente, a la potencia, en relación a los parámetros expuestos en la tabla anterior.

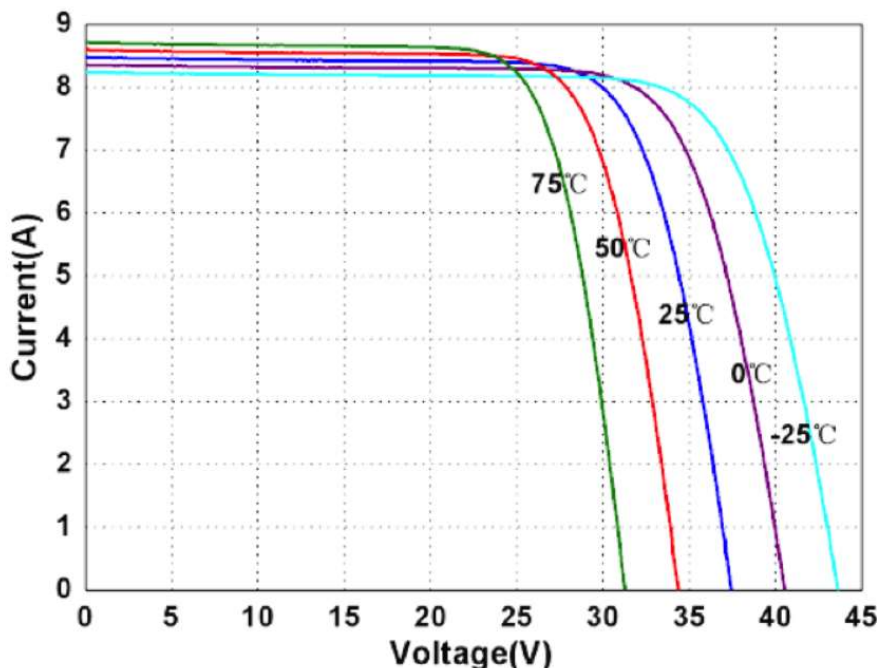


Figura 65. Corriente - Tensión en función de la temperatura [87].

Una mayor temperatura aumentará la intensidad ya que mayores temperaturas conllevan mayores concentraciones de energía, por lo que será más probable la creación de pares de electrón-hueco y se producirá más intensidad con su movimiento. Desafortunadamente, el aumento de temperatura producirá una disminución de los cuasi niveles de Fermi, por lo que los electrones absorbidos serán de menor energía provocando una disminución de la tensión. Y con ello una disminución neta de la potencia obtenida debido a los coeficientes de temperatura de intensidad y tensión [1].

6.1.4 FABRICANTE Y GARANTÍA

Los módulos fotovoltaicos generalmente están garantizados por separado para los materiales y la potencia de salida. El estándar para módulos es de 10 años en materiales y 25 años en potencia. De forma general, las garantías establecen que el módulo no perderá más del 15% al 20% de su eficiencia durante el período de garantía [65].



Figura 66. Comportamiento esperado de la potencia durante los 25 primeros años [88].

Y en relación con esta característica, más importante que la garantía es la estabilidad de la empresa detrás de la garantía. Si la empresa desaparece durante el período de garantía, lo más probable es que suponga el fin de la garantía, aunque algunos fabricantes ofrecen garantías no cancelables que están respaldadas por pólizas de seguro [65].

6.1.5 EFICIENCIA DE LA CELDA SOLAR

La eficiencia de la celda solar se refiere al porcentaje de irradiancia solar que las células solares son capaces de convertir en electricidad [1].

Existe un rango muy amplio de eficiencias, y su magnitud está relacionada proporcionalmente a su coste. Esto se debe a que las celdas con mayores eficiencias requieren más capas para captar más energía y películas anti-reflectantes y absorbentes, las cuales son complejas y difíciles de fabricar. Sin embargo, para ciertos fines y aplicaciones determinadas estas placas con mejores eficiencias son rentables [1].

Para este proyecto, se optará por módulos de silicio debido a que es la tecnología más extendida y asequible del mercado. Estos módulos fotovoltaicos de silicio cristalino estándar ofrecen entre un 15% y un 20% de eficiencia [1].

En la siguiente imagen se muestra la evolución de la eficiencia para todos los tipos de celdas solares a lo largo de los años.

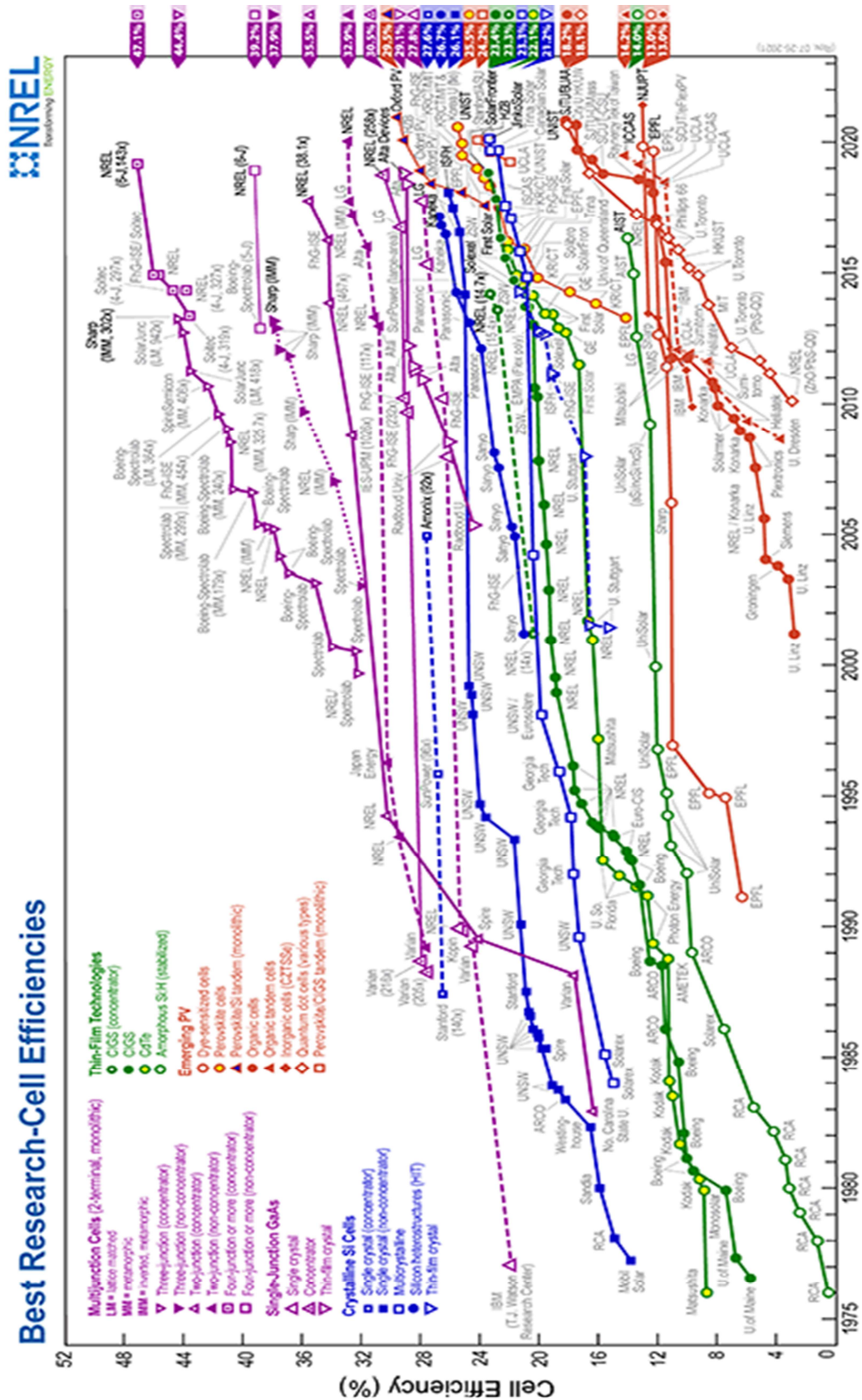


Figura 67. Eficiencias de los distintos tipos de celdas solares [89].

6.1.6 TIPO DE CÉLULA SOLAR

En la gráfica anterior de las eficiencias se muestran diferentes tipos de tecnología fotovoltaica con las que se obtienen distintos rendimientos.

En primer lugar, las **células cristalinas de silicio** son una de las tecnologías más antiguas y es la más instalada a día de hoy. A la par se encuentran las *thin film*, que son un tipo de placas solares más finas que a pesar de llevar tanto tiempo desarrollándose como las cristalinas de silicio, obtienen rendimientos algo menores.

Estos dos tipos de células solares son los más desarrollados e instalados. Sus diferencias radican en que las células cristalinas de silicio están compuestas de materiales más simples. Sin embargo, su proceso de fabricación es más complejo debido a que las capas requieren una mayor pureza para evitar la recombinación de los pares de electrón-hueco, y necesitan una mayor temperatura para formarse. Por su parte, las *thin film* están formadas de materiales más complejos, pero su proceso de fabricación es más sencillo ya que son células que no requieren tanta temperatura para su formación.

Como consecuencia de las diferencias entre los materiales y los procesos de formación de estos dos tipos de células solares, se obtienen diferencias en el **factor de absorción**. Este factor se define como la facilidad de un determinado material de absorber la energía en una menor longitud, y responde a la ley de Beer-Lambert. Esta ley rige cómo la intensidad decae exponencialmente en función del factor de absorción a lo largo de un semiconductor debido a que parte de su energía queda absorbida.

$$I(x) = I(x = 0) \cdot e^{-\alpha x}$$

Figura 68. Ley de Beer-Lambert

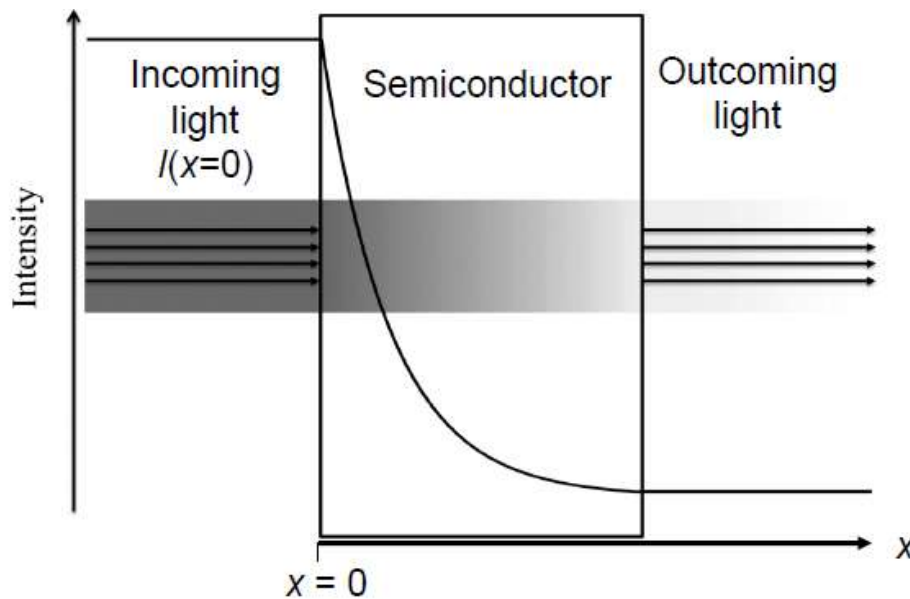


Figura 69. Representación gráfica de la ley de Beer-Lambert [80].

La principal ventaja de las células de silicio es que su absorción está comprendida en un rango más amplio de longitudes de onda. En cambio, las *thin film* tienen una absorción mayor que las de silicio, pero quedando comprendido para un rango menor de longitudes de onda. Dado que el espectro solar del sol es muy amplio, para placas solares destinadas a aplicaciones convencionales resulta adecuado captar un mayor rango de longitud de onda, a pesar de que su absorción no sea la mayor. Este problema se soluciona fácilmente aumentando el grosor de la célula fotovoltaica o mediante mecanismos de reflexión que aumenten la distancia que recorre la luz para ser absorbida lo máximo posible.

En la siguiente figura se muestra la absorción de las células de silicio cristalino (c-Si) en comparación con diferentes células solares de tipo *thin film*. A partir de una determinada energía o longitud de onda, la absorción de ciertas *thin-film* como Cd-Te y GaAs decaen drásticamente.

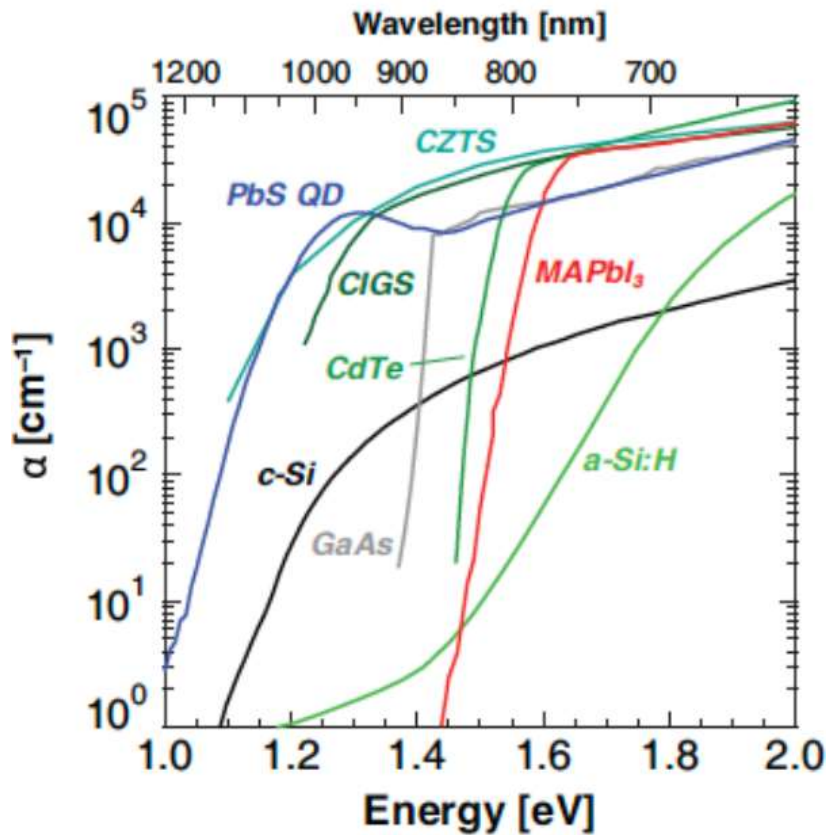


Figura 70. Coeficiente de absorción para células cristalinas de Silicio (c-Si) y thin film en función de la longitud de onda [90].

En relación con el coeficiente de absorción, es importante tener en cuenta también el límite de Shockley-Queisser (SQL, **Shockley-Queisser Limit**). Esta teoría, bajo una serie de hipótesis, expone que el máximo rendimiento posible que se puede obtener en una célula de silicio es del 33,7%. El porcentaje de energía que no se utiliza se pierde en fotones con menor energía de la necesaria para generar un par electrón-hueco, o tiene energía de más para crearlo y ese exceso de energía se pierde en forma de calor (termalización), además de otras pérdidas [80].

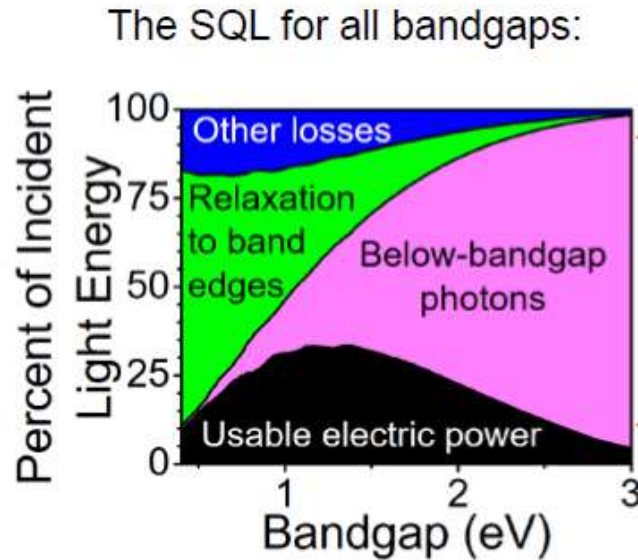


Figura 71. Distribución de la energía en función del band gap [80].

Este límite alcanza un máximo para longitudes de onda con una energía entre 1 y 1,5 eV. Por ello, la investigación en células solares se centra en materiales que tengan gran absorción en esta franja, siendo las células cristalinas de silicio una de las que mejor eficiencia alcanza, como se ve en la siguiente figura [80]:

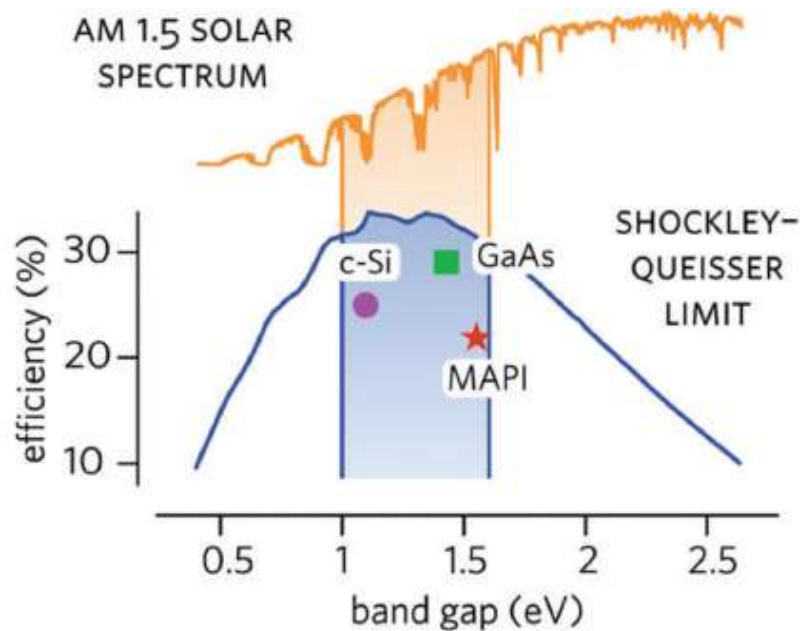


Figura 72. Eficiencia máxima posible según Shockley-Queisser en función del band gap [80].

Sin embargo, a pesar de que el límite de Shockley-Queisser estima que el máximo rendimiento posible para las células de silicio es de 33,7%, este valor queda lejos de lo logrado. En laboratorio con procedimientos y técnicas muy precisas se ha obtenido un rendimiento en torno al 26,1%, y de manera práctica en instalaciones se obtiene de aproximadamente un 20% [80].

También hay que mencionar que existen numerosos tipos de tecnología más, como las células multiunión y tecnologías emergentes como los perovskites.

Las **células multiunión** funcionan de manera que se estratifican distintas capas de absorbente en las cuales se produce la absorción de fotones con diferentes longitudes de onda. En primer lugar, se ponen las capas que captan longitudes de onda muy bajas, es decir, con mucha energía por lo que las longitudes de onda mayores traspasan esta primera capa y son absorbidas en las posteriores. También se utilizan en combinación con concentradores que focalizan un área mayor de irradiancia en la célula solar.

Los **perovskites** por su parte son muy útiles ya que permiten modificar su composición y crearlos específicamente para absorber una cierta longitud de onda, sin embargo, son compuestos no muy estables, por lo que todavía se está estudiando su comportamiento.

En conclusión, para este proyecto se optará por **módulos de silicio** debido a que es la tecnología más extendida y asequible del mercado. Ahora, la duda reside en elegir celdas monocristalinas o policristalinas.

La diferencia reside en el proceso de fabricación. Por una parte, las células de silicio monocristalino se obtienen a partir una sola estructura cristalina. Por otra parte, en las policristalinas la pasta de silicio no se cuida tanto durante su crecimiento, obteniendo diferentes capas más pequeñas de cristales de silicio. En cuanto a rendimiento, los monocristalinos son mejores debido a que la pureza de la lámina de silicio es más elevada, lo que repercute en el precio. A priori resulta sencillo distinguir ambos paneles fijándonos en el color del panel: los módulos monocristalinos tienen color oscuro y los módulos policristalinos son más azulados.

Por tanto, se optará por células **monocristalinas** con el objetivo de no renunciar a perder rendimiento de nuestra placa solar a pesar de que la inversión vaya a ser ligeramente mayor [2].



Figura 73. Panel monocristalino a la izquierda, y policristalino a la derecha [2].

6.1.7 Tensión y número de células

Para las instalaciones solares aisladas con baterías, los paneles habituales cuentan con 36 o 72 células, siendo capaces de suministrar electricidad a 12 o 24 V respectivamente.

Por otra parte, para las instalaciones de conexión a red como es nuestro caso, lo habitual es encontrar paneles de 60 células que funcionan con un voltaje distinto determinado por el regulador MPPT (*Maximum Power Point Tracker*).

6.1.8 Elección de los módulos fotovoltaicos

Tras analizar los diferentes tipos de paneles y células solares expuestos anteriormente, y dada toda la superficie disponible en la cubierta, finalmente se optará por instalar paneles solar ERA-Mono-PERC-400W. La potencia total a instalar será de 200 kWp y estará distribuida en un total de 50 filas de paneles a lo largo de los 99 metros de cubierta, con una cantidad de 10 paneles por fila, 5 en cada agua de la cubierta.

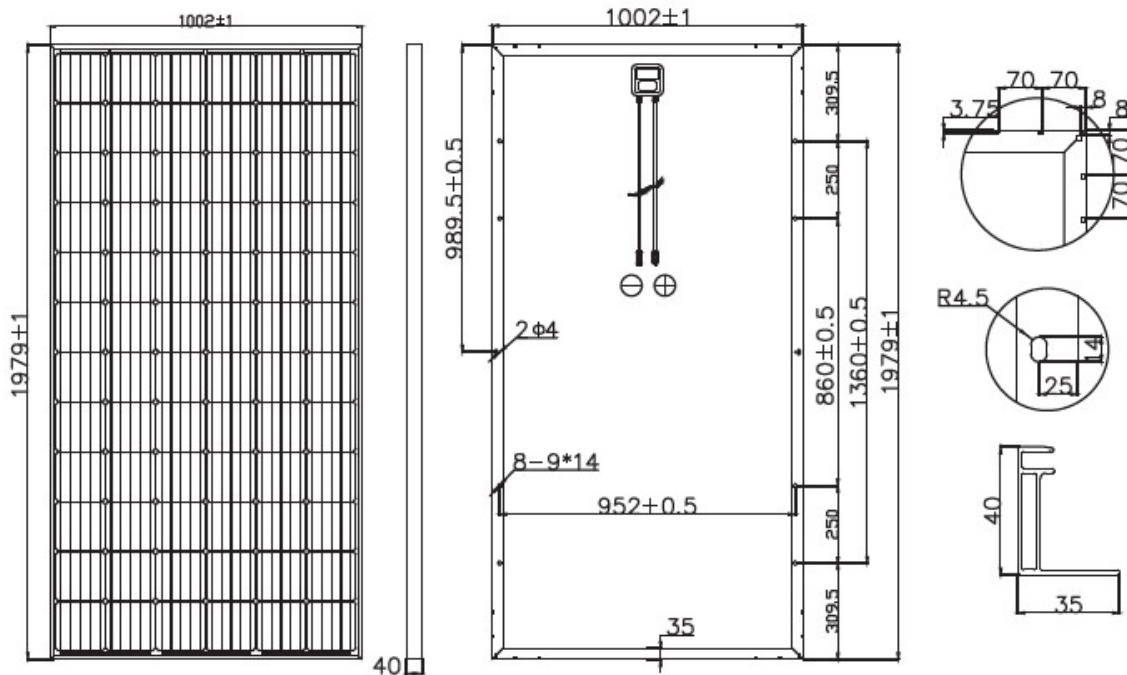


Figura 74. Dimensiones del panel solar ERA-Mono-PERC-400W.

Colocando el panel de manera horizontal, obtendremos una altura de 1 metro y una anchura de 1,98 metros. Conocida la longitud de la altura y sabiendo de cálculos anteriores que la inclinación óptima son 34° y que el ángulo de sombra crítica son 26,44°, se obtendrá la distancia mínima entre paneles. Cabe recordar que esta distancia mínima de separación tiene en cuenta el espacio ocupado por placa solar, es decir, la distancia entre el principio de una placa solar y el principio de la siguiente, no es la distancia entre placas solares.

$$d_{min} = b \times \frac{\text{Seno}(\gamma_s + \beta)}{\text{Seno}(\gamma_s)} = 1 \text{ m} \times \frac{\text{Seno}(26.44^\circ + 34^\circ)}{\text{Seno}(26.44^\circ)} = 1,95 \text{ metros}$$

Dado que el largo de la nave industrial son 99 metros, repartiendo la longitud entre el espacio que ocuparía cada placa solar:

$$N^\circ_{\text{filas placas solares}} = \frac{99 \text{ m}}{1,95 \text{ m}} = 50,68 \approx 50 \text{ filas de placas solares}$$

Ahora, habrá que calcular cuántos paneles solares caben en cada agua de la cubierta de la nave, la cual tiene una longitud total de 21 metros, y la semicubierta de 10,5 metros. Se hará

el cálculo por semicubierta, debido a que si se hiciese con la longitud de la cubierta entera se podría obtener un número impar de placas solares, y en la práctica deberá ser un número par. De esta forma la instalación será simétrica en ambas aguas de la cubierta, y no se complicará el bastidor poniendo una placa solar soportada en las dos aguas.

$$N^{\circ}_{\text{placas por fila por semicubierta}} = \frac{10,5 \text{ m}}{1,98 \text{ m}} = 5,3 \approx 5 \frac{\text{placas solares}}{\text{fila y semicubierta}}$$

$$N^{\circ}_{\text{placas solares totales por fila}} = 10 \frac{\text{placas solares}}{\text{fila}}$$

El panel elegido será de la marca ERA Solar de tipo monocristalino y de 400 Wp de potencia. Las principales características del panel elegido se encuentran a continuación. Para más información, se adjunta la hoja de especificaciones técnicas en el anexo.

SPECIFICATIONS		Junction Box	TÜV certified
Dimensions	1979 x 1002 x 40mm	Cable	4 mm ² solar cable 2 x 900 mm or Customized Length
Weight	22.5 kg		
Frame	Aluminium hollow-chamber frame on each side	Temperature Range	-40°C ... +85°C
Glass	Low-iron and tempered glass 3.2 mm	Load Capacity	5400 Pa(IEC 61215),40mm
Cells	72 pcs Mono PERC (158.75 x158.75 mm)	Application class	Class A
		Electrical protection class	Class II
		Fire safety class	Class C
Cell Embedding	EVA	Product warranty	10 years
Back-Foil	FEVE / PET / FEVE	Power Guarantee	10 years 90% 25 years 80%

Figura 75. Especificaciones del panel solar ERA-Mono-PERC-400W.

Cabe destacar que, de acuerdo a las indicaciones dadas, la cubierta de la instalación tiene suficiente capacidad portante para acomodar los 500 módulos fotovoltaicos, teniendo cada uno un peso de 22.5 kg, y la estructura del bastidor necesaria para su instalación.

Las siguientes características del panel solar relacionadas con la temperatura se utilizarán en un apartado posterior para dimensionar y justificar la elección del inversor.

CHARACTERISTICS	
Max. System Voltage	1000V/DC
Temperature-Coefficient I_{sc}	+0.02973%/°K
Temperature-Coefficient V_{oc}	-0.38038%/°K
Temperature-Coefficient P_{mpp}	-0.57402%/°K
NOCT***	45°C

Figura 76. Características del panel solar ERA-Mono-PERC-400W.

Las curvas de intensidad-tensión del modelo elegido se encuentran a continuación:

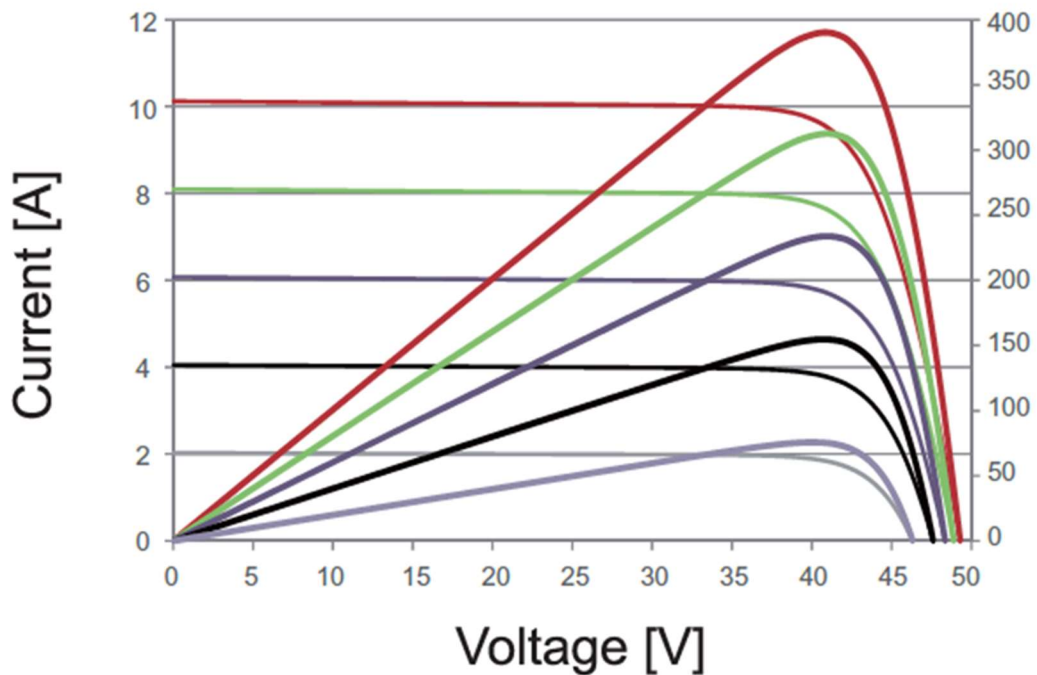


Figura 77. Gráfica Intensidad-Tensión y Potencia-Tensión para temperatura constante del módulo de 25°C e irradiancia variable (eje vertical derecho).

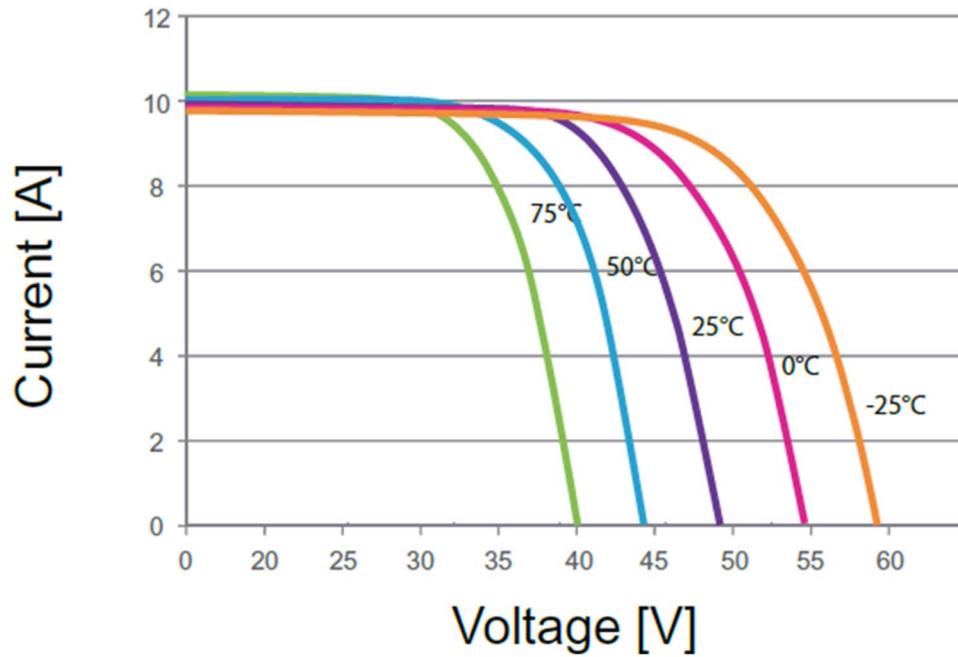


Figura 78. Gráfica Intensidad-Tensión a temperatura variable e irradiancia constante de 1000 W/m².

En la siguiente tabla se encuentran los valores de tensión en vacío, intensidad en cortocircuito y ambas en el punto de máxima potencia, además de la eficiencia del módulo.

ESPSC TYPE	380M	385M	390M	395M	400M
Power Class	380Wp	385Wp	390Wp	395Wp	400Wp
Max. Power Voltage (V_{mpp})* at STC**	40.5V	40.8V	41.1V	41.4V	41.7V
Max. Power Current (I_{mpp}) at STC	9.39A	9.44A	9.49A	9.55A	9.60A
Open Circuit Voltage (V_{oc}) at STC	48.9V	49.1V	49.3V	49.5V	49.8V
Short Circuit Current (I_{sc}) at STC	9.75A	9.92A	10.12A	10.23A	10.36A
Module Efficiency	19.16%	19.42%	19.67%	19.92%	20.17%

Figura 79. Tabla características panel solar ERA-Mono-PERC-400W.

Finalmente, instalando 500 paneles solares de 400 Wp de potencia cada uno, la energía total generada en un año se obtiene introduciendo todos los parámetros antes descritos en la herramienta de PVGIS.

Datos proporcionados:

Localización [Lat/Lon]:	40.111, -3.668
Horizonte:	Calculado
Base de datos:	PVGIS-SARAH
Tecnología FV:	Silicio cristalino
FV instalada [kWp]:	200
Pérdidas sistema [%]:	14

Resultados de la simulación:

Ángulo de inclinación [°]:	34 (opt)
Ángulo de azimut [°]:	-30
Producción anual FV [kWh]:	320551.51
Irradiación anual [kWh/m²]:	2049.25
Variación interanual [kWh]:	12594.48
Cambios en la producción debido a:	
Ángulo de incidencia [%]:	-2.66
Efectos espectrales [%]:	0.49
Temperatura y baja irradiancia [%]:	-7.02
Pérdidas totales [%]:	-21.79

Figura 80. Datos proporcionados y resultados de la simulación [76].

Y la producción de energía mensual esperada del sistema:

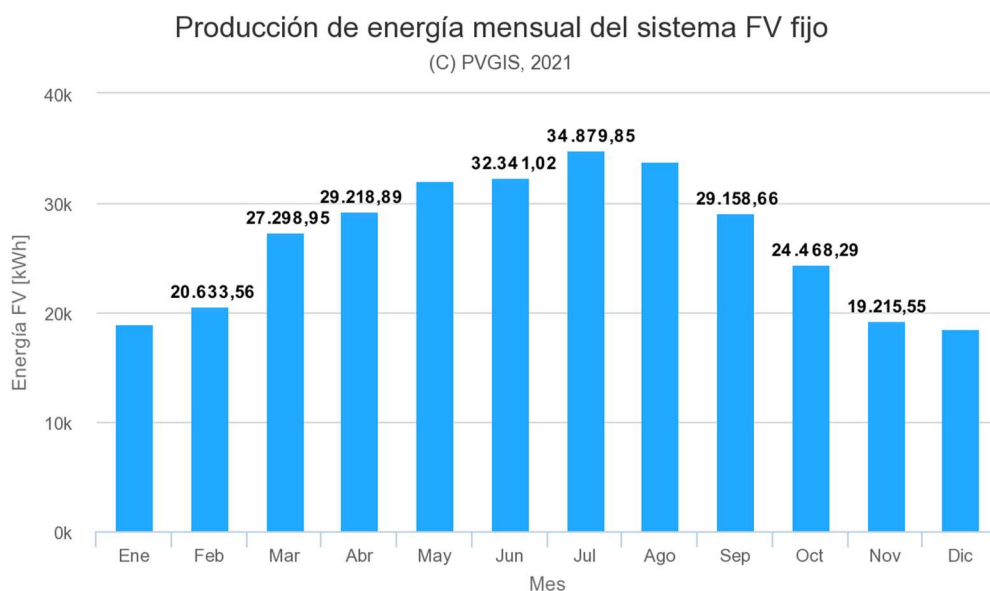


Figura 81. Producción mensual de energía esperada [76].

6.2 BATERÍAS

Hay muchos tipos, tamaños y precios de baterías. A menudo funcionan de manera distinta para diferentes sistemas fotovoltaicos y bajo diferentes condiciones de irradiación solar, temperatura y carga eléctrica. Normalmente, las baterías duran entre 5 y 8 años en promedio por lo que probablemente pasará por varios conjuntos durante la vida útil del sistema fotovoltaico.

Una práctica habitual es el uso de baterías de ciclo profundo, que están diseñadas para descargas profundas regulares de un sistema fotovoltaico. Por el contrario, las baterías de arranque, como las de los automóviles, están diseñadas para descargas rápidas para arrancar el motor, seguidas de una recarga inmediata mientras el motor está en funcionamiento. La descarga profunda de un ciclo de carga-recarga fotovoltaica acabaría rápidamente con la vida útil de la batería de un automóvil.

Los principales factores a considerar para elegir la batería de nuestra instalación son los siguientes:

6.2.1 TIPO

Existen varios tipos de estas baterías, siendo el tipo más utilizado el de plomo-ácido, gracias a su compromiso entre precio y durabilidad:

- En primer lugar, existen las baterías de plomo-ácido inundadas que tienden a ofrecer la mayor capacidad de almacenamiento, aunque requieren un mantenimiento regular para garantizar la longevidad. El término inundada se refiere a que las placas están inmersas en un baño de electrolito compuesto de un 65% de agua destilada y 35% de ácido sulfúrico. Esta tecnología se utiliza en una gran variedad de aplicaciones gracias a su excelente respuesta en climas extremos [91].
- En segundo lugar, las baterías de plomo-ácido selladas, conocidas como VRLA (Batería de ácido-plomo regulada por válvula). Estas tienen un precio mayor por capacidad de almacenamiento, pero requieren muy poco mantenimiento, incluso se denominan baterías libres de mantenimiento. Los dos tipos habituales de baterías selladas son las de esterilla de vidrio absorbido (AGM) y las baterías de celda de gel,

que mantienen el electrolito mezclado con el agua evitando que se evapore por lo que no se asienta en el fondo produciéndose una estratificación [92].

Para otros tipos de baterías de ciclo profundo, el níquel-hierro (NiFe) y el fosfato de litio-hierro (LiFeP) ofrecen una vida útil considerablemente mayor y, por lo tanto, una vida útil más prolongada y pueden representar el futuro de los sistemas de almacenamiento fuera de la red.

6.2.2 MANTENIMIENTO

Todas las baterías deben ser monitoreadas regularmente para asegurarse de que se carguen y descarguen correctamente, pero en términos de mantenimiento manual hay que realizar un mantenimiento en baterías de plomo-ácido inundadas.

6.2.3 TAMAÑO

El tamaño, la forma y el peso de la batería generalmente no son criterios importantes para los sistemas de energía domésticos o industriales, ya que las baterías residen permanentemente en un emplazamiento fijo y solo es necesario moverlas cuando se reemplazan. Simplemente hay que tener en cuenta que las baterías deben estar alojadas en un recinto ventilado y cubierto, y debe ser accesible en caso de tener que reemplazarla y realizar tareas de mantenimiento, y sea fácil de transportar debido a su peso.

6.2.4 CAPACIDAD

La capacidad de la batería se mide en amperios-hora (Ah). Las baterías estándar de ciclo profundo para sistemas fotovoltaicos pueden tener una capacidad individual que varía entre 100 y 500 Ah cada una. La capacidad de energía también se puede medir en Watios-Hora (Wh), para ello hay que multiplicar la capacidad en amperios-hora por el voltaje de la batería.

6.2.5 CICLO DE VIDA

Es una estimación de cuántas veces una batería puede completar ciclos individuales de descarga y recarga. En condiciones normales, las baterías de los sistemas fuera de la red completan un ciclo por día. Las clasificaciones de ciclo de vida de las baterías de ciclo

profundo pueden oscilar entre 500 y 3000 ciclos. Las baterías de ciclo profundo tienen una vida útil mayor si se descargan no más del 50% al 80% con cada ciclo, según el tipo de batería [1].

Las baterías de plomo-ácido son capaces de tolerar descargarse al 50%, mientras que las baterías de níquel-hierro pueden tolerar hasta un 80% de descarga. Por norma general, ninguna batería debe descargarse más del 80%, lo que acorta significativamente su vida útil. En relación con el ciclo de vida, los fabricantes suelen proporcionar datos sobre recomendaciones en cuanto a la profundidad de descarga denominada **DoD (Deep Of Discharge)** [1].

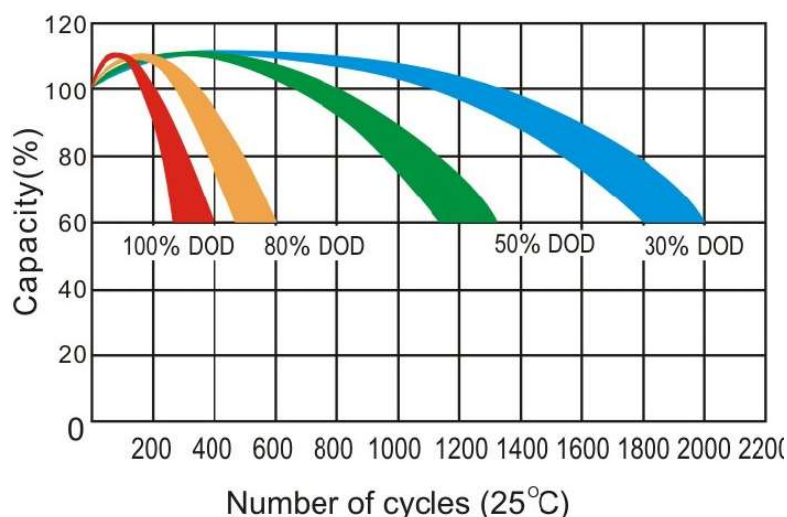


Figura 82. Relación entre la capacidad de la batería y el número de ciclos en función de la profundidad de descarga [93].

	Lead acid	NiMH	Li NMC/graphite	LiFePO4/graphite	Vanadium-redox-flow
Energy density (Wh/kg)	40	75	160	110	45
Power density (W/kg)	350	600	1300	4000	120
Cycle lifetime	600	900	2500	5000	12000
Calendar lifetime (years)	7	5	7	14	15
Efficiency (%)	85	75	93	94	80
Self-discharge (%) per month	8	20	3	3	5
Cost per kWh (€)	60–300	400–600	200–2000	200–2000	150–800

Figura 83. Comparativa entre diferentes tecnologías de baterías [1].

6.3 INVERSOR

En este apartado se describirá la función del inversor, los diferentes tipos, sus parámetros y se justificará su elección.

6.3.1 FUNCIONES DEL INVERSOR

La función del inversor es convertir la corriente continua generada por las placas fotovoltaicas en corriente alterna apta para el consumo en nuestras instalaciones. Su rendimiento depende de 3 acciones [1]:

1. La primera acción es la más importante y consiste en, a partir de la corriente continua, generar la onda senoidal de corriente alterna con la frecuencia apropiada.
2. La segunda es proporcionar el seguimiento del punto de máxima potencia obtenida (MPP, *Maximum-Power-Point*). Esto se consigue debido a que continuamente se perturba el voltaje buscando el óptimo de potencia, es decir, busca un balance entre tensión e intensidad de los circuitos de los paneles solares para maximizar la generación.

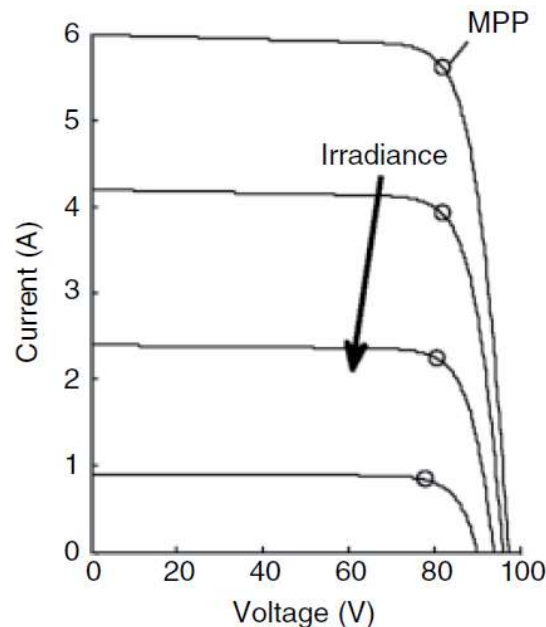


Figura 84. Punto de Máxima Potencia (MPP) en función de la intensidad y voltaje [1].

3. La tercera es monitorizar la conversión para que no se produzcan problemas de protección y se produzca de forma segura.

6.3.2 TIPOS DE INVERSORES

Por otra parte, existen varios tipos de inversores en función del tipo de instalación.

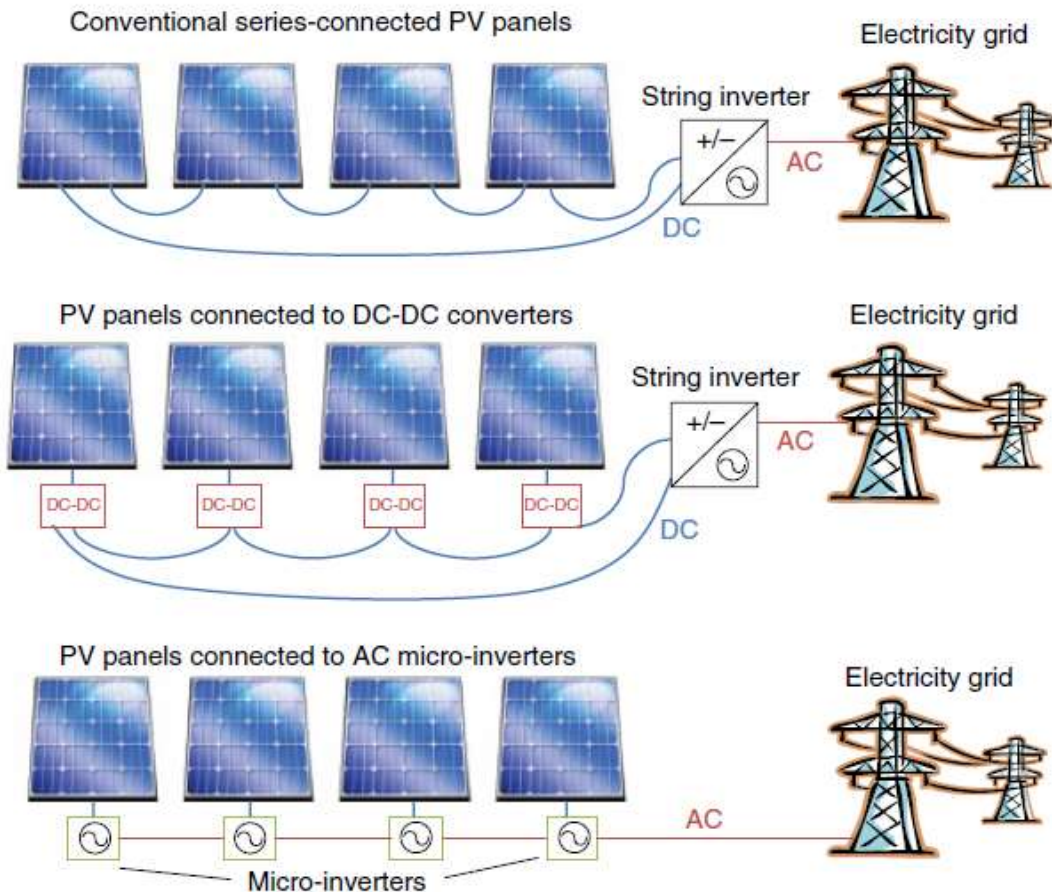


Figura 85. Diferentes configuraciones de inversores [1].

Lo habitual es encontrar módulos de paneles fotovoltaicos conectados entre sí **en serie** y, a continuación, un **inversor de cadena**. Esto se debe a que esta configuración es la que obtiene un mayor rendimiento en condiciones de operación normales. Sin embargo, al estar conectados en serie tienen una desventaja, y es que su rendimiento estará determinado por el módulo fotovoltaico limitante, es decir, el que menor rendimiento tenga. Esto se debe a que la corriente que circula por las diferentes matrices fotovoltaicas tiene que ser la misma, y el módulo que menos genere, es decir, el módulo con menor intensidad limitará la intensidad de la cadena de módulos. Este desajuste se produce, por ejemplo, cuando en un determinado momento un módulo fotovoltaico se encuentra sombreado. Otra desventaja es

que desde el inicio se debe saber a qué tensión va a estar sometido el inversor, no es recomendable agregar posteriormente más módulos fotovoltaicos a la instalación ya que su dimensionamiento no será el adecuado [1] [94].

Podría pensarse que al afectarse mutuamente el rendimiento de los paneles podría ser mejor conectarlos en paralelo, de manera que sean independientes unos de otros. Esto no es cierto debido a que aumentarían las pérdidas por resistencias del cableado disminuyendo el rendimiento. Al conectar las matrices fotovoltaicas en serie lo que conseguimos es aumentar la tensión y disminuir estas pérdidas [1] [94].

Otra configuración similar a la anterior es colocar **inversores DC-DC** en la salida de cada matriz fotovoltaica, todos ellos conectados en serie y, a continuación, un **inversor de cadena** para pasar de DC a AC. De esta manera, cada matriz fotovoltaica opera con su punto de máxima potencia y no se afecta de manera tan severa al rendimiento conjunto de todos los módulos, ya que no hay una matriz limitante. La desventaja de esta configuración es que aumenta la inversión y el gasto en gran medida, no siendo rentable si la disposición de los paneles está adecuadamente dimensionada y no se producen sombra entre ellos, evitándose los desajustes que disminuyen el rendimiento [1] [94].

La última variación que se discutirá será la colocación de **micro-inversores** conectados a continuación de cada una de las matrices fotovoltaicas. Una ventaja de este tipo de sistemas es la escalabilidad, se pueden ir agregando más paneles fotovoltaicos junto con su respectivo micro-inversor posteriormente, no como en los anteriores casos donde había que dimensionar el inversor de cadena en función de la cantidad de potencia que se espera generar. Otra ventaja es que, si uno de los paneles tiene un defecto o recibe sombra, esta bajada del rendimiento sólo afectará a uno de los micro-inversores, no al resto. Sin embargo, de manera general no consiguen la misma eficiencia que los inversores en cadena, ni es una tecnología asentada ya que no se conoce estadísticamente su fiabilidad a largo plazo aún [1] [94].

De manera general, para instalaciones fotovoltaicas pequeñas sí se recomienda utilizar micro-inversores. Sin embargo, para instalaciones más grandes se suele utilizar inversores

en cadena ya que económicamente poner muchos micro-inversores aumentaría mucho los costes y disminuiría la rentabilidad de la inversión. Por tanto, para nuestro proyecto se optará por la colocación de inversores de cadena únicamente [1] [94].

6.3.3 PARÁMETROS DEL INVERSOR

Conocida ya la potencia a instalar, es necesario dimensionar correctamente el inversor. Para ello, hay que tener en cuenta varios parámetros fundamentales: **tensiones**, **intensidades**, la **potencia máxima** y el **rendimiento**.

Por una parte, el dato de la **potencia máxima** indica cuánta potencia es capaz de convertir de corriente continua a alterna. Para determinar adecuadamente este valor hay que hacer un balance entre ese pico de potencia y la duración en la que se produce, y el precio del inversor dado que, a mayor potencia, mayor será el coste del inversor [80].

Por tanto, este límite de potencia provoca que, a pesar de que la matriz fotovoltaica esté generando una determinada potencia, no sea capaz de entregarla en su totalidad debido a este límite. Nuestra elección dependerá de si el pico de potencia generada se produce durante un único instante o, por el contrario, se alcanza este máximo durante un periodo prolongado. Si el pico de potencia fuese una curva plana donde se alcanzase durante un largo periodo de tiempo sí merece la pena invertir en un inversor que vaya a convertirnos toda la energía. De manera habitual, se recomienda un inversor con un porcentaje del 80 o 90% de la potencia de la instalación fotovoltaica [80].

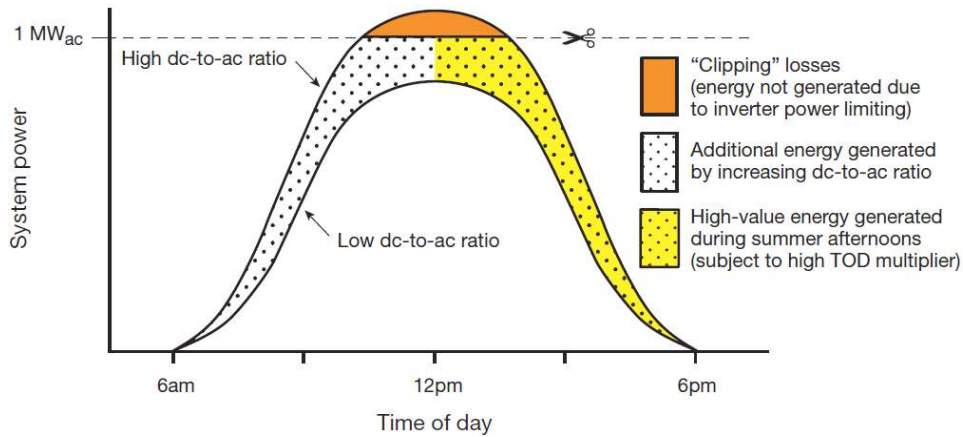


Figura 86. Potencia limitante del inversor [80].

Para estimar la potencia necesaria, se comprobará el pico de irradiancia en los meses de verano ya que es la época donde más irradiación absorberán las placas solares y más potencia se generarán. La siguiente figura muestra el perfil de irradiancia diaria durante el mes de julio para la orientación e inclinación de las placas solares a instalar.

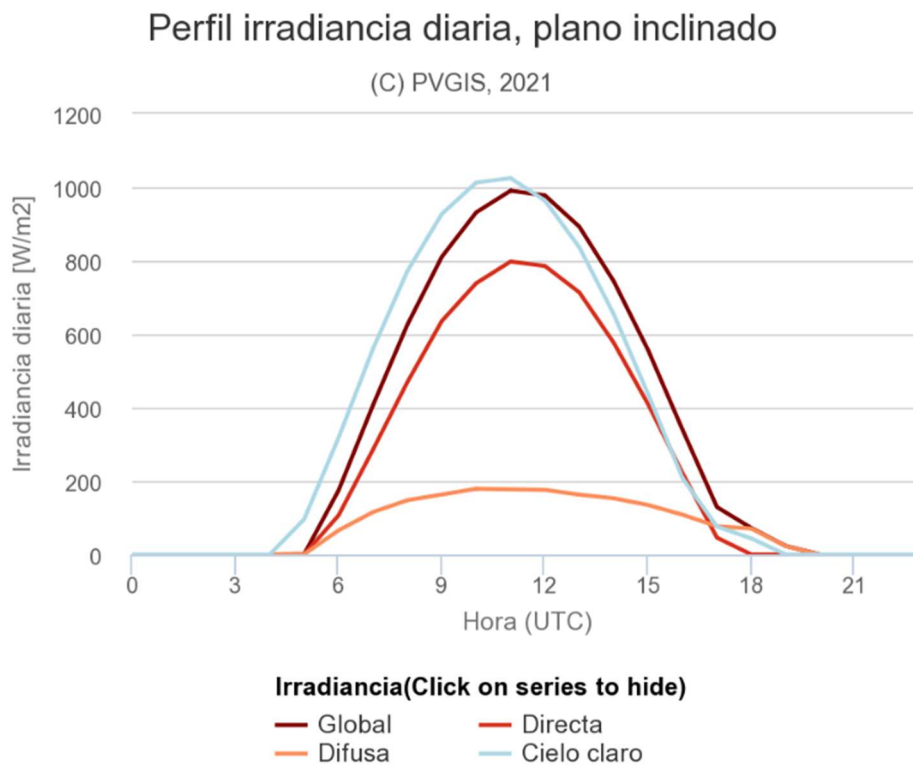


Figura 87. Perfil de irradiancia en julio [76].

En principio, no se observa un pico acentuado para una franja de tiempo muy breve. Como conclusión, se elegirá un inversor capaz de convertir la potencia máxima que generen las placas solares.

El segundo parámetro a estudiar del inversor es su **rendimiento**. Su valor depende de la cantidad de carga a la que va a estar sometido, por tanto, no es rentable sobredimensionarlo por dos motivos. En primer lugar, un inversor capaz de convertir más potencia es más caro. Y, en segundo lugar, si el inversor va a estar trabajando con cargas muy inferiores a su diseño, su rendimiento va a disminuir como se ve en la siguiente figura:

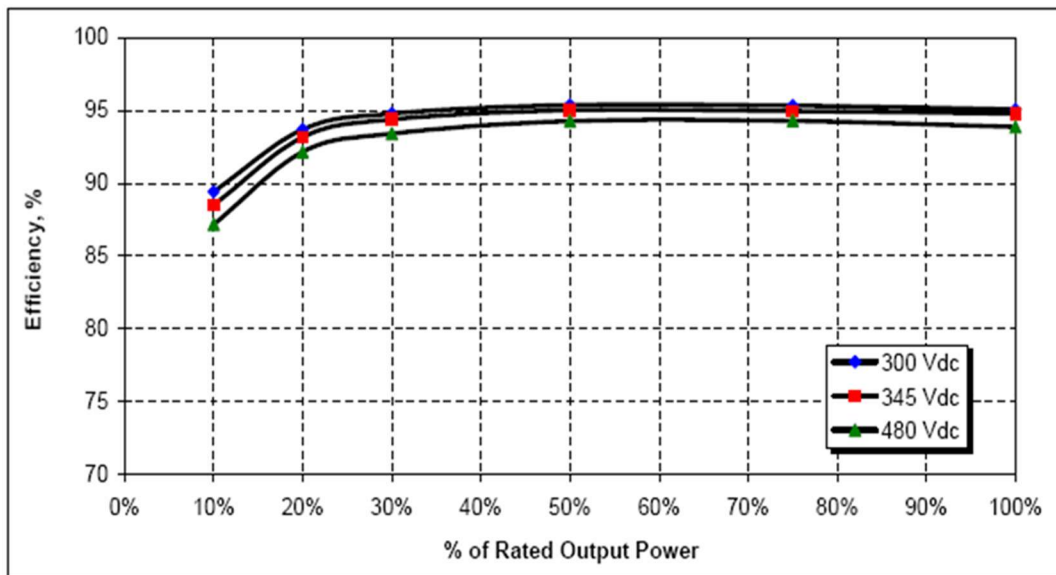


Figura 88. Ejemplo de eficiencia de un inversor en función de su carga [80].

Como se observa en la figura, únicamente a porcentajes de carga muy bajos, en torno al 20%, el rendimiento del inversor disminuye de forma acentuada. De todas formas, este rendimiento sigue siendo considerablemente alto por lo que no será un gran problema en el hipotético caso de que funcionase bajo potencias tan bajas. Por tanto, tras estudiar este segundo parámetro se propondrá el dimensionamiento del inversor para la máxima carga que pueda generar la instalación fotovoltaica.

6.3.4 DIMENSIONAMIENTO Y ELECCIÓN DEL INVERSOR

Para hallar el valor de potencia del inversor habrá que tener en cuenta los valores de tensiones e intensidades tanto máximas y mínimas que se produzcan en nuestra instalación. Además, habrá que estudiarlas bajo diferentes condiciones de temperaturas ya que influirá en su valor.

En primer lugar, hay que calcular tanto la tensión como la intensidad para el punto de máxima potencia (definido en la ficha técnica del panel solar) para el conjunto de la instalación. Para ello, en cuanto a la tensión, habrá que multiplicar la tensión individual del punto de máxima potencia por el número de paneles solares en serie. Para la intensidad se multiplicará la del punto de máxima potencia por el número de filas de paneles solares, o lo que es lo mismo, sumar las intensidades de las filas de paneles. Entonces:

$$V_{MPP_{INSTALACION}} = V_{MPP} \times N_{paneles\ serie} = 41,7\ V \times 10\ paneles = 417\ V$$

$$I_{MPP_{INSTALACION}} = I_{MPP} \times N_{filas\ paneles} = 9,6\ A \times 50\ filas = 480\ A$$

A continuación, hay que corregir estos valores totales con las temperaturas extremas que sufrirán los paneles en la cubierta. Se tomarán -10°C como referencia para el invierno y 50°C para verano. Para los cálculos se tomará una temperatura estándar de medida de 25°C .

La expresión de la temperatura de operación de la célula fotovoltaica se describe de la siguiente forma:

$$T_{célula} = T_{aire} + \frac{(T_{ONC} - 20)}{800} \times I$$

Siendo los parámetros:

- $T_{célula}$ es la temperatura de la célula fotovoltaica.
- T_{aire} es la temperatura ambiente del aire.
- T_{ONC} es la temperatura de operación nominal de la célula. Este dato viene dado por la ficha técnica del panel solar, en este caso es de 45°C y se define bajo una serie de condiciones:
 - Irradiancia en la célula de $800\ \frac{W}{m^2}$.

- Temperatura del aire de 20°C.
- Velocidad del aire de 1 m/s.
- El montaje del panel debe tener la parte trasera libre, es decir, no estar integrado en el edificio.
- I es la irradiancia, que depende de la época del año. Se usarán $1000 \frac{W}{m^2}$ para verano y $200 \frac{W}{m^2}$ para invierno.

Por tanto, la temperatura de la célula para verano e invierno:

$$T_{\text{célula VERANO}} = 25^{\circ}\text{C} + \frac{(50 - 20)^{\circ}\text{C}}{800 \frac{W}{m^2}} \times 1000 \frac{W}{m^2} = 81,25^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{célula INVIERNO}} = 25^{\circ}\text{C} + \frac{(-10 - 20)^{\circ}\text{C}}{800 \frac{W}{m^2}} \times 200 \frac{W}{m^2} = -3,75^{\circ}\text{C}$$

En primer lugar, se calculará la tensión en circuito abierto a la temperatura de operación de la célula tanto para verano como para invierno. La expresión de la tensión en circuito abierto en función de la temperatura es la siguiente:

$$V_{OC(T^a)} = V_{OC(25^{\circ}\text{C})} + \Delta V_{OC(T^a)} \times \Delta T$$

Donde:

- $V_{OC(25^{\circ}\text{C})}$ y $\Delta V_{OC(T^a)}$ son datos de la ficha técnica del panel solar.
- ΔT es la diferencia entre la temperatura de funcionamiento de la célula solar y la temperatura estándar de medida.

Por tanto:

$$V_{OC(T^a) \text{ VERANO}} = V_{OC(25^{\circ}\text{C})} + \Delta V_{OC(T^a)} \times \Delta T^a$$

$$V_{OC(T^a) \text{ VERANO}} = 49,8V + (-0,189) \frac{V}{^{\circ}\text{C}} \times (81,25 - 25)^{\circ}\text{C} = 39,15 V$$

$$V_{OC(T^a) \text{ INVIERNO}} = V_{OC(25^{\circ}\text{C})} + \Delta V_{OC(T^a)} \times \Delta T^a$$

$$V_{OC(T^a) \text{ INVIERNO}} = 49,8V + (-0,189) \frac{V}{^{\circ}\text{C}} \times (-3,75 - 25)^{\circ}\text{C} = 55,25 V$$

En segundo lugar, se calculará la intensidad en cortocircuito a la temperatura de operación de la célula tanto para verano como para invierno, nuevamente. La expresión de la intensidad en cortocircuito en función de la temperatura es la siguiente:

$$I_{CC}(T^a) = I_{CC(25^\circ\text{C})} + \Delta I_{CC(T^a)} \times \Delta T^a$$

Donde:

- $I_{CC(25^\circ\text{C})}$ y $\Delta I_{CC(T^a)}$ son datos de la ficha técnica del panel solar.
- ΔT es la diferencia entre la temperatura de funcionamiento de la célula solar y la temperatura estándar de medida.

Por tanto:

$$I_{CC}(T^a)_{\text{VERANO}} = I_{CC(25^\circ\text{C})} + \Delta I_{CC(T^a)} \times \Delta T^a$$

$$I_{CC}(T^a)_{\text{VERANO}} = 10,36\text{ A} + 0,0031 \frac{\text{A}}{^\circ\text{C}} \times (81,25 - 25)^\circ\text{C} = 10,53\text{ A}$$

$$I_{CC}(T^a)_{\text{INVIERNO}} = I_{CC(25^\circ\text{C})} + \Delta I_{CC(T^a)} \times \Delta T^a$$

$$I_{CC}(T^a)_{\text{INVIERNO}} = 10,36\text{ A} + 0,0031 \frac{\text{A}}{^\circ\text{C}} \times (-3,75 - 25)^\circ\text{C} = 10,27\text{ A}$$

Por último, se calculará cada uno de estos casos para toda la instalación, es decir, multiplicando las tensiones por el número de paneles solares en serie, y la intensidad por el número de filas de paneles solares.

$$V_{OC}(T^a)_{\text{VERANO TOTAL}} = V_{OC}(T^a)_{\text{VERANO}} \times N_{\text{paneles serie}} = 39,15\text{ V} \times 10\text{ paneles} = 391,45\text{ V}$$

$$V_{OC}(T^a)_{\text{INVIERNO TOT}} = V_{OC}(T^a)_{\text{INVIERNO}} \times N_{\text{paneles serie}} = 55,25\text{ V} \times 10\text{ paneles} = 552,5\text{ V}$$

$$I_{CC}(T^a)_{\text{VERANO TOTAL}} = I_{CC}(T^a)_{\text{VERANO}} \times N_{\text{filas paneles}} = 10,53\text{ A} \times 50\text{ filas} = 526,67\text{ A}$$

$$I_{CC}(T^a)_{\text{INVIERNO TOTAL}} = I_{CC}(T^a)_{\text{INVIERNO}} \times N_{\text{filas paneles}} = 10,27\text{ A} \times 50\text{ filas} = 513,57\text{ A}$$

En adición, hay que repetir el mismo procedimiento que se ha llevado a cabo con la tensión de circuito abierto y con la intensidad de cortocircuito, pero esta vez con la tensión en el

punto de máxima potencia. La ficha técnica del inversor ofrece este parámetro y restringe su elección.

Para ello se necesitará conocer ΔV_{MPP} que habitualmente no es dato de la ficha técnica del panel solar por lo que habrá que hacer la siguiente aproximación:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} = \frac{41,7 \text{ V}}{49,8 \text{ V}} = 0,84$$

Por lo que sus variaciones aproximadamente tendrán el mismo cociente:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} \approx \frac{\Delta V_{MPP}}{\Delta V_{OC}} \rightarrow \frac{\Delta V_{MPP}}{\Delta V_{OC}} = 0,84 \rightarrow \Delta V_{MPP} = 0,84 \times (-0,189) = -0,159 \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}}$$

Entonces, de la misma manera que antes:

$$V_{MPP(T^a) \text{ VERANO}} = V_{MPP(25^{\circ}\text{C})} + \Delta V_{MPP(T^a)} \times \Delta T^a$$

$$V_{MPP(T^a) \text{ VERANO}} = 41,7 \text{ V} + (-0,159) \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}} \times (81,25 - 25)^{\circ}\text{C} = 32,78 \text{ V}$$

$$V_{MPP(T^a) \text{ INVIERNO}} = V_{MPP(25^{\circ}\text{C})} + \Delta V_{MPP(T^a)} \times \Delta T^a$$

$$V_{MPP(T^a) \text{ INVIERNO}} = 41,7 \text{ V} + (-0,159) \frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}} \times (-3,75 - 25)^{\circ}\text{C} = 46,26 \text{ V}$$

Ahora, para el conjunto de placas solares:

$$V_{MPP(T^a) \text{ VERANO TOT}} = V_{MPP(T^a) \text{ VERANO}} \times N_{\text{paneles serie}} = 32,78 \text{ V} \times 10 \text{ paneles} = 327,8 \text{ V}$$

$$V_{MPP(T^a) \text{ INV TOT}} = V_{MPP(T^a) \text{ INVIERNO}} \times N_{\text{paneles serie}} = 46,26 \text{ V} \times 10 \text{ paneles} = 462,6 \text{ V}$$

Finalmente, los valores obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla que se utilizará para la elección del inversor:

Tabla 2. Resultados de tensión e intensidad necesarios para dimensionar el inversor.

	$V_{MPP} (T^a)$	$V_{OC} (T^a)$	$I_{CC} (T^a)$
Verano	327,8 V	391,45 V	526,67 A
Invierno	462,6 V	552,5 V	513,57 A

Obtenidos estos valores, se optará por colocar **5 inversores** de manera que se respeten los límites de tensiones y corrientes del modelo elegido, a la par que la potencia máxima no perjudique al rendimiento de la instalación. De esta manera, cada inversor se encargará de 10 filas de paneles solares, con 10 paneles cada fila, e irán alojados en el interior de la nave industrial sobre la que están colocados los paneles solares.

Finalmente, el modelo elegido será **Solis-50K**. Algunos de los parámetros en los que deberemos fijarnos se encuentran en la siguiente figura. La hoja de especificaciones se adjunta en los anexos.

Tabla de datos

Modelo	Solis-40K	Solis-50K	Solis-50K-HV	Solis-60K-HV	Solis-60K-4G	Solis-70K-HV-4G
Entrada (CC)						
Potencia de entrada máxima recomendada	48 kW	60 kW	60 kW	72 kW	72 kW	84 kW
Voltaje máxima de entrada	1100 V					
Voltaje de nominal	600 V	600 V	720 V	720 V	600 V	720 V
Voltaje de arranque	200 V					
Rango de voltaje MPPT	200-1000 V					
Corriente máxima de entrada	4*22 A	4*28.5 A	4*22 A	4*28.5 A		
Corriente máxima de cortocircuito	4*34.3 A	4*44.5 A	4*34.3 A	4*44.5 A		
Número de MPPT/Número máxima de cadenas de entrada	4/8	4/12	4/8	4/12		

Figura 89. Tabla de datos del inversor Solis-50K.

En primer lugar, se debe comprobar que el rango de tensiones MPPT está dentro del definido para el inversor. En nuestro caso, tanto en verano como invierno se encuentran dentro del amplio intervalo de 200 a 1000 V. En adición, cuando las placas solares funcionen con una tensión cercada a la de vacío también quedarán recogidas en el intervalo que el inversor es capaz de soportar. De igual forma sucede con el valor máximo voltaje de entrada, que en este modelo es de 1100 V.

A continuación, se debe comprobar la intensidad máxima de entrada, que para un único inversor es la siguiente:

$$I_{Máx\ CC\ 1\ INV} = 4\ MPPT \times 28,5\ A = 114\ A$$

Sin embargo, nuestras placas solares generan una intensidad de cortocircuito máxima de 526,67 A. Es por ello por lo que se necesitarán 5 inversores iguales, de manera que se distribuya la intensidad por ellos. De esta forma:

$$I_{Máx\ CC\ 5\ INV} = 5\ Inversores \times (4\ MPPT \times 28,5A) = 570A$$

Dicha intensidad que soportan los 5 inversores en conjunto es mayor que la máxima posible que podremos obtener de nuestras placas solares.

Finalmente, habrá que calcular la potencia total soportada por los 5 inversores, que será la siguiente:

$$P_{5\ INV} = 5 \times 60\ kW = 300\ kW$$

Que es mayor que la potencia total instalada de 200 kW, por lo tanto, es válida esta elección.

6.4 BASTIDOR

Los sistemas de sujeción de los paneles fotovoltaicos son las estructuras metálicas que sostienen los módulos, normalmente en un plano llano. Las opciones del sistema de fijación dependerán de la pendiente de la superficie donde se ancle y de su material. Los techos planos generalmente usan sistemas que están fijados con pesos, llamados lastre de anclaje, y no por tornillos u otros anclajes similares [65].

Se requieren especificaciones de estructura de montaje para la mayoría de los permisos de instalación fotovoltaica. Esto asegura que el sistema sea adecuado para las condiciones de su área: cargas de nieve, viento, condiciones del suelo (para montajes en el suelo) y, por supuesto, el propio peso de los módulos fotovoltaicos [65].

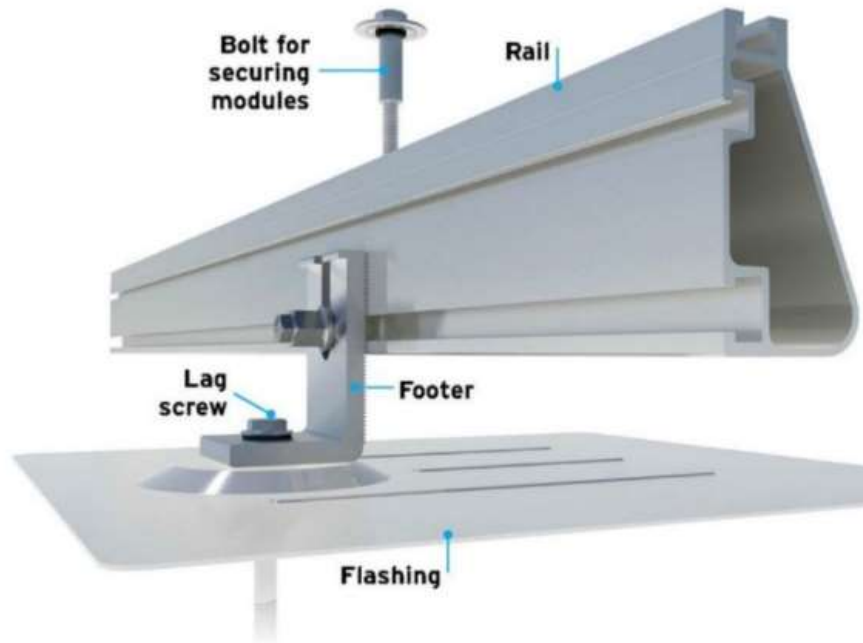


Figura 90. Unión entre la superficie y el bastidor [65].

A la hora de instalar el bastidor en la cubierta, será importante que los pies del bastidor formado por pletinas, juntas y tornillos se sellen con un agente protector para techos con el objetivo de evitar filtraciones.

6.4.1 DISEÑO DE SOPORTES PARA TEJADOS INCLINADOS

Si el bastidor ha de instalarse en un tejado inclinado se tienen dos opciones posibles: montar la matriz de paneles solares con o sin rieles.

- **Estructura con rieles:** El bastidor estándar para techos inclinados es un sistema de montaje empotrado con rieles horizontales que sostienen y aseguran los módulos, y se montan en el techo mediante medios de unión de alta resistencia. Los pies del bastidor están anclados en las vigas o cerchas del marco del techo con tornillos [65].

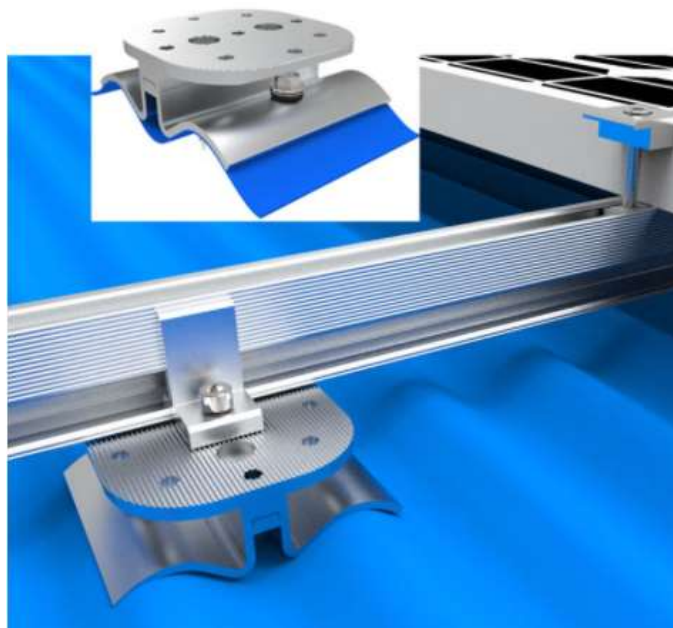


Figura 91. Fijación de los rieles del bastidor en techos metálicos corrugados.

En los techos de tejas, su instalación es más complicada y requiere de unas estructuras que se fijan por debajo de la teja.



Figura 92. Fijación de los rieles del bastidor en un techo con tejas.

En definitiva, hay una gran variedad de abrazaderas para adaptarse al tipo de superficie del techo. Un aspecto a tener en cuenta es que debido a que los módulos pierden eficiencia a temperaturas más altas, los montajes fotovoltaicos empotrados se elevan varios centímetros

por encima del techo para proporcionar un flujo de aire de enfriamiento debajo de los módulos.

- **Estructura sin rieles:** Este tipo de sistema de fijación de los paneles fotovoltaicos carece de guías sobre las que deslizar los paneles solares durante su colocación. Esta modalidad incluye anclajes especiales de manera que los módulos están sujetos a un anclaje en cada esquina y están alineados entre sí con soportes especiales o dispositivos de empalme que se atornillan a los marcos del módulo.

Las ventajas de este tipo de anclaje es que este sistema sin rieles utiliza menos material que los bastidores convencionales de estilo riel, lo que reduce los costes de material y transporte. Además, los sistemas sin rieles también se instalan más rápidamente, aunque es un sistema más complicado de instalar y requiere más tiempo y experiencia. Y, por último, tienen un aspecto algo más sencillo y discreto, ya que no hay rieles visibles en la parte inferior o en los extremos de la matriz [65].

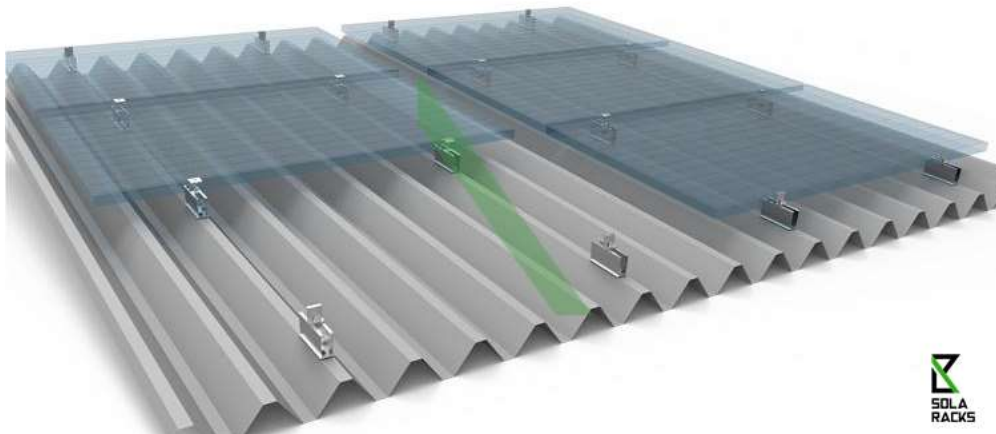


Figura 93. Montaje de la matriz solar sin rieles [95].

El lado negativo, es que es un montaje menos extendido y, por tanto, menos estandarizado. En algunos casos, los módulos necesitan un marco especial para trabajar con estanterías sin rieles. Instalar un sistema sin rieles puede ser complicado, la instalación requiere nivelar los anclajes en lugar de nivelar algunos rieles largos.

6.4.2 DISEÑO DE SOPORTES PARA SUELO

Las estructuras del soporte de montaje en el suelo, generalmente, se diseñan a medida para cada proyecto. A partir de la localización y los requisitos del sistema como el tamaño de la matriz, la inclinación, la orientación y el terreno, se diseña el bastidor.

Por norma general, la mayoría de las estructuras comienzan con postes verticales formados por un metal galvanizado estándar para proteger al material de la oxidación. Algunos sistemas utilizan vigas en forma de H o I para los postes debido a su comportamiento y su fácil accesibilidad al ser perfiles estandarizados.

Los rieles de la base, que se extienden a través de los postes verticales, también deben ser perfiles tratados químicamente galvanizados, de la misma forma que los postes verticales. Los rieles del módulo se extienden por los rieles de la base del bastidor y soportan los módulos. La ubicación, longitud y cantidad de los rieles difieren según la orientación del módulo.

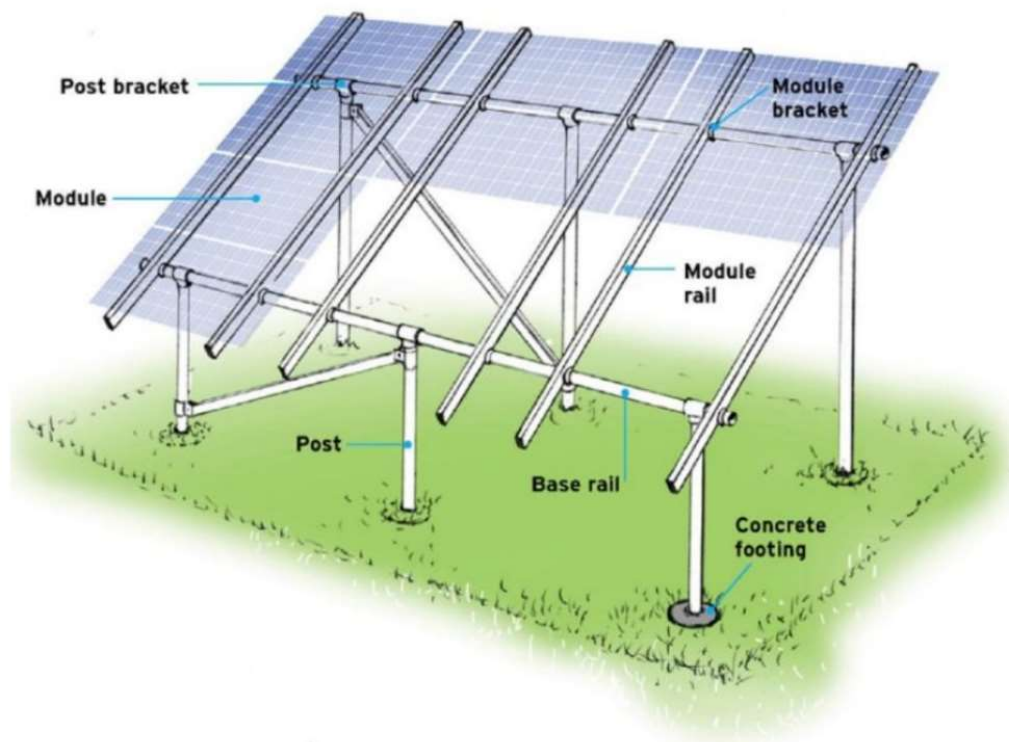


Figura 94. Estructura de panel solar instalado sobre el suelo [65].

6.4.3 ELECCIÓN DEL BASTIDOR

Tras analizar los diferentes tipos de sujeción, se optará por utilizar un bastidor inclinado regulable de 30 a 35° respecto de la horizontal. Esta elección se debe a que este tipo de

estructuras están normalizadas y es la opción más económica y adecuada para montar nuestras placas con la inclinación óptima calculada de 34°.



Figura 95. Placa solar instalada horizontalmente en el soporte [96].



Figura 96. Estructura regulable 30°-35° CH915 [97].

Capítulo 7. VIABILIDAD DEL PROYECTO

A continuación, se estudiará la viabilidad del proyecto para determinar si es rentable llevar el proyecto a cabo en un determinado plazo, y conocer de antemano los beneficios que se han de esperar. Este estudio minimizará el riesgo del proyecto y evaluará distintas alternativas [98].

Las variables a tener en cuenta para tomar la decisión de viabilidad de nuestro proyecto de autoconsumo son las siguientes:

- **Potencia pico instalada:** finalmente se instalarán 200 kWp de potencia distribuidos en 500 paneles solares de 400 W cada uno.
- **Coste de la energía.** Este valor depende del periodo en el que nos encontremos consumiendo energía. Para poder aproximar un valor medio razonable y simplificar los cálculos, haremos una media ponderada con los consumos de cada uno de los tramos tarifarios para todos los meses del año 2019 sacado de las facturas:

Tabla 3. Ponderación del consumo en cada franja tarifaria.

CONSUMOS [kWh]	Llano	Valle	Punta
Enero	28238	16884	5784
Febrero	18664	12191	3552
Marzo	14470	9684	3620
Abril	9933	9297	10189
Mayo	6648	7110	5517
Junio	6998	6528	8043
Julio	7638	5877	7332
Agosto	6152	5184	6106
Septiembre	6090	5767	5152
Octubre	12539	7252	11107
Noviembre	21553	11216	4106
Diciembre	20314	12443	4433
TOTAL	159237	109433	74941
PONDERACIÓN	0,46	0,32	0,22

Por tanto, el precio medio de la electricidad que se utilizará para los cálculos será el precio de la energía en cada tramo multiplicado por su factor de ponderación:

$$Precio_{electricidad} = 0,46 \times P_{Elect. Llano} + 0,32 \times P_{Elect. Valle} + 0,22 \times P_{Elect. Punta}$$

Siendo a finales del año 2019 el coste de la electricidad 0,08719 €/kWh para el periodo llano, 0,066566 €/kWh para periodo valle y 0,094341 €/kWh para periodo punta.

Energía facturada	P	4.106 kWh x	0,094341 €/kWh	387,36 €
	LL	21.553 kWh x	0,08719 €/kWh	1.879,21 €
	V	11.216 kWh x	0,066566 €/kWh	746,60 €
Total 36.875 kWh hasta 30/11/2019				3.013,17 €

Figura 97. Extracto de la factura de noviembre de 2019, con los precios de cada uno de los periodos.

Por tanto, el precio medio ponderado de la electricidad se calculará de la siguiente manera:

$$Precio_{Electricidad} = 0,46 \times \frac{0,08719 \text{ €}}{\text{kWh}} + 0,32 \times \frac{0,066566 \text{ €}}{\text{kWh}} + 0,22 \times \frac{0,094341 \text{ €}}{\text{kWh}}$$

$$Precio_{Medio Ponderado Parte Variable Factura Eléctrica} = 0,0821813 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Cabe destacar que, durante el proyecto, el sistema tarifario eléctrico español se modificó en junio de 2021, pero como ya se había iniciado el proyecto utilizando los datos de 2019, el estudio de viabilidad se ha realizado con las tarifas de dicho año.

- **Coste capital para la instalación de autoconsumo:** El coste total de las placas solares estará formado por el encargo de 19 pallets de 26 unidades cada uno, con un coste unitario del pallet de 3517,23 €. Hará falta comprar 6 placas más de manera individual a un precio de 144,95 € [99] [100]. Por tanto:

$$Coste_{Placas Solares} = 19 \text{ pallets} \times 3.517,23 \frac{\text{€}}{\text{pallet}} + 6 \text{ uds} \times 144,95 \frac{\text{€}}{\text{ud}} = 67.697,07 \text{ €}$$

Por otra parte, se instalarán 5 inversores con un precio unitario de 3566,32 € [101].

$$Coste_{Inversores} = 5 \text{ uds} \times 3.566,32 \frac{\text{€}}{\text{ud}} = 17.831,6 \text{ €}$$

Otra gran parte de la inversión inicial es la correspondiente a los bastidores de las placas solares. El precio del modelo elegido es de 100 € por panel solar [102]. Por tanto:

$$\text{Coste}_{\text{Bastidor}} = 500 \text{ uds} \times 100,00 \frac{\text{€}}{\text{ud}} = 50.000,00 \text{ €}$$

Se supondrá un coste de mano de obra por instalar todo de 20€/hora por operario, junto a un total de 500 horas de trabajo de operarios. Esta cantidad también incluye implícitamente el coste del material eléctrico, es decir, cableado y protecciones requeridas por la instalación.

$$\text{Coste}_{\text{Mano Obra Instalación}} = 20 \frac{\text{€}}{\text{h}} \times 500 \text{ h} = 10.000 \text{ €}$$

Por tanto, el coste total de la **inversión inicial** resulta:

$$\text{Coste}_{\text{Inversión Inicial}} = 67.697,07 + 17.831,6 + 50.000 + 10.000 = 145.528,67 \text{ €}$$

A modo de tabla resumen:

Tabla 4. Tabla resumen de los costes de la inversión inicial

Costes Inversión Inicial	
Placas solares	67.697,07 €
Inversores	17.831,60 €
Bastidor	50.000,00 €
Mano de obra	10.000,00 €
TOTAL	145.528,67 €

- **Gasto anual mantenimiento y operación:** Se estima un coste de 18 € la hora del operario que dedicará un total de 16 horas para realizar el mantenimiento de las placas solares. Este proceso se realizará 3 veces al año. Por tanto:

$$\text{Coste Mantenimiento Anual} = \frac{18 \text{ €}}{\text{hora}} \times 16 \text{ horas} \times 3 \frac{\text{veces}}{\text{año}} = 864 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- **Tasa interna de retorno (TIR) y valor actual neto (VAN):** estos indicadores se utilizarán para ver el retorno de la inversión. Para su cálculo se asumirá un IPC (Índice de Precio al Consumo) del 2,7% que es el actual en el mes de julio de 2021, y una subida anual de la electricidad del 5% [103].

En nuestro estudio de viabilidad, se asumirá como ingreso cada kWh autoconsumido, es decir, que no compramos a la compañía eléctrica. Sin embargo, dado que no toda la energía generada será útil, debido a que en los meses de verano tendremos excedentes, se estimará que el porcentaje de energía utilizada respecto de la generada se encuentra al 60% [104].

Con todo esto se obtiene un Valor Actual Neto (VAN) de 237.518,72 € con una tasa de descuento del 3,5%, y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 13,07% bajo un horizonte de 25 años. El periodo de recuperación de la inversión será 8 años, a partir de ahí se generarán ingresos.

RESULTADO FINANCIERO

VAN	237.518,72 €
TIR	13,07%
Pay-Back (años)	8

Figura 98. Resultado financiero.

La evolución del cash-flow de la inversión se encuentra a continuación, pero se desglosa y se amplía en el Anexo I.

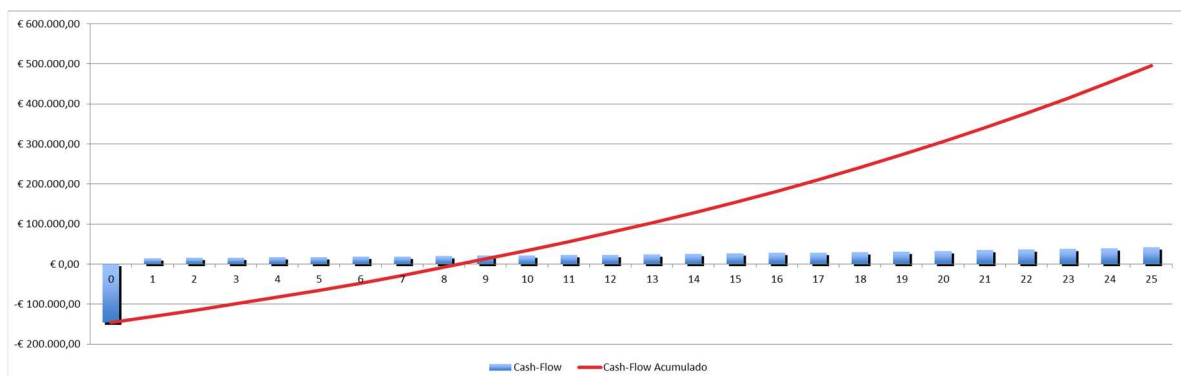


Figura 99. Evolución del cash-flow de la inversión a lo largo de los 25 años.

- **Emisiones ahorradas (kg CO₂):** De las facturas de la compañía comercializadora se obtiene que el factor de emisiones de la electricidad para 2019 fue de (0,27 kg CO₂/kWh).

Dado que previamente se asumió un aprovechamiento del 60% de la energía total producida que eran 320.551 kWh, esto supone una utilización de 192.331 kWh.

Por tanto:

$$Emisiones\ ahorradas = 192.331\ kWh \times 0.27 \frac{kg\ CO_2}{kWh} = 51.929,37\ kg\ CO_2$$

Como conclusión, merece la pena invertir en esta instalación de autoconsumo dado que se recuperará la inversión a los 8 años y, a partir de ese momento, generará ahorro a la empresa del parque de maquinaria.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Reinders, P. Verlinden, W. van Sark y A. Freundlich, Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications, John Wiley & Sons, Ltd, 2016.
- [2] Efimarket «¿Monocristalino o policristalino?¿Necesitas ayuda para elegir placas solares?,» 20 Abril 2016. <https://www.efimarket.com/blog/monocristalino-o-policristalinonecesitas-ayuda-para-elegir-placas-solares/>.
- [3] Acciona - Business as unusual «Acciona Cambio Climático» 2020. <https://www.acciona.com/es/cambio-climatico/>.
- [4] Acciona «Cómo evitar el Cambio Climático MUY RÁPIDO» <https://www.youtube.com/watch?v=3X-Z0kMfh4M>.
- [5] «The Greenhouse Effect - Cool Australia» <https://www.coolaustralia.org/the-greenhouse-effect-secondary/>.
- [6] «The keeling curve - UC San Diego» Scripps Institution of Oceanography <https://sioweb.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>.
- [7] «Compresión de los mapas de riesgo - High Bond» https://help.highbond.com/helpdocs/highbond/es/Content/strategy/visualizing_risk/s/understanding_risk_heatmaps.html.
- [8] «World Economic Forum - The Global Risks Report 2020» 2020. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf.

- [9] Redacción BBC News «BBC» 21 Enero 2020.
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-51173489>.
- [10] «Naciones Unidas» <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>.
- [11] Iberdrola «Acuerdos Internacionales sobre el Cambio Climático - Iberdrola»
<https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/acuerdos-internacionales-sobre-el-cambio-climatico>.
- [12] Iberdrola «Estado de información no financiera. Informe de Sostenibilidad.»
https://www.iberdrola.com/wcorp/gc/prod/es_ES/corporativos/docs/IB_Informe_Sostenibilidad.pdf.
- [13] P. Alfaro «Caminando hacia la descarbonización - KPMG» KPMG Tendencias, 10 Diciembre 2019. <https://www.tendencias.kpmg.es/claves-decada-2020-2030/descarbonizacion-transicion-energetica/>.
- [14] Naciones Unidas «Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna» <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
- [15] N. Unidas «Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019» 2019.
https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf.
- [16] Naciones Unidas «ODS 7» 2 Agosto 2021.
<https://onuhabitat.org.mx/index.php/ods-7-el-objetivo-del-mes>.
- [17] Naciones Unidas «Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles»
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>.

- [18] Naciones Unidas «Department of Economic and Social Affairs - Statistics Division»
<https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/goal-11/>.
- [19] Naciones Unidas «Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles»
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>.
- [20] Naciones Unidas «Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos»
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>.
- [21] Acciona «Energías Renovables»
<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>.
- [22] EALDE Business School «Todas las ventajas de la especialización en energías renovables»
<https://www.ealde.es/especializacion-energias-renovables/>.
- [23] Entrepreneur «La transición energética como una lucha por el cambio climático»
<https://www.entrepreneur.com/article/372960>.
- [24] Sostenibilidad Para Todos «Energías Renovables»
<https://www.sostenibilidad.com/energias-renovables/aprendesostenibilidad-energias-renovables/>.
- [25] R. Roca «El periódico de la energía - La energía en el mundo en 2050: 50% renovables, 50% combustibles fósiles» 11 09 2018.
<https://elperiodicodelaenergia.com/la-energia-en-el-mundo-en-2050-50-renovables-y-nuclear-50-combustibles-fosiles/>.
- [26] IRENA «International Renewable Energy Agency»
<https://www.irena.org/Statistics>.

- [27] IRENA «Trends in Renewable Energy - IRENA»
<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>.
- [28] IRENA «Trends in Renewable Energy - IRENA»
<https://public.tableau.com/views/IRENARETimeSeries/Charts?:embed=y&:showVizHome=no&publish=yes&:toolbar=no>.
- [29] Acciona Sostenibilidad «Sostenibilidad para todos»
<https://www.sostenibilidad.com/energias-renovables/>.
- [30] International Energy Agency «International Energy Agency - IEA»
<https://www.iea.org/>.
- [31] International Energy Agency «Global Energy Review 2020 - IEA»
<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/renewables>.
- [32] Deloitte «La eólica en la economía española» 2015.
https://www.aeeolica.org/uploads/Estudio_La_eolica_en_la_economia_espanola_2012_2015.pdf.
- [33] IRENA «Global trends dashboards» <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Global-Trends>.
- [34] IRENA «Solar Costs - IRENA» <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Solar-Costs>.
- [35] IRENA «Wind Costs - IRENA» <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Wind-Costs>.

- [36] Acciona «Energía Solar Fotovoltaica» <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>.
- [37] Acciona Sostenibilidad «Tipos de paneles solares» <https://www.sostenibilidad.com/energias-renovables/tipos-de-paneles-solares/>.
- [38] Autosolar «Qué diferencia existe entre los paneles solares térmicos y los paneles fotovoltaicos» <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-diferencia-existe-entre-los-paneles-solares-termicos-y-los-paneles-fotovoltaicos>.
- [39] KDS Energía e Ingeniería «Paneles Solares KDS Energía» <https://www.facebook.com/PanelesSolaresKDS/posts/conoce-las-partes-que-componen-un-panel-solar-cada-una-es-imprescindible-para-su/1859390450796883/>.
- [40] J. Francisco «Eficiencia Energética y Utopía Wordpress» 31 Enero 2015. <https://juanfrancisco207.wordpress.com/2015/01/31/conceptos-de-energia-solar-termica/>.
- [41] Suelo Solar «Captadores Térmicos» https://suelosolar.com/guiasolares/colectores_solares.asp?de=acs.
- [42] Acciona «Energía Eólica» <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/>.
- [43] Greenalia «Líneas de negocio: Eólica. Una apuesta de futuro» <https://www.greenalia.es/lineas-de-negocio/eolica/>.
- [44] Acciona «Aerogeneradores» <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/>.

- [45] M. Cortés «Parques eólicos»
<https://www.goconqr.com/flashcard/9061916/parques-e-licos>.
- [46] Red Eléctrica España «Las energías renovables en el sistema eléctrico español 2019» 30 06 2020. <https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/informe-de-energias-renovables/informe-2019>.
- [47] Red Eléctrica España «Las energías renovables en el sistema eléctrico español 2019»
https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/Renovables-2019.pdf.
- [48] FuturEnergy «Las energías renovables en el sistema eléctrico español 2019»
<https://futureenergyweb.es/las-energias-renovables-en-el-sistema-electrico-espanol-2019/>.
- [49] FuturEnergy «Las Eenergías Renovables en el Sistema Eléctrico Español 2019 Report»
https://futureenergyweb.es/wp-content/uploads/2020/09/FuturENERGY_Jul-Sep20_17-19_ree.pdf.
- [50] 360 Energy «El cambio hacia un nuevo modelo energético»
<http://www.360energy.com.ar/energia-nueva/>.
- [51] PV Magazine «Ya hay 583,5 GW de energía fotovoltaica operativa en todo el mundo»
<https://www.pv-magazine.es/2020/04/07/ya-hay-5835-gw-de-energia-fotovoltaica-operativa-en-todo-el-mundo/>.
- [52] IRENA «Solar Energy» <https://www.irena.org/solar>.
- [53] International Renewable Energy Agency IRENA «El futuro de la energía solar fotovoltaica. Despliegue, inversión, tecnología, integración en la red y aspectos socioeconómicos. Resumen ejecutivo.» <https://www.irena.org/>

- /media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_summary_2019_ES.pdf?la=en&hash=DE82F7DC53286F720D8E534A2142C2B8D510FB0B.
- [54] J. A. Roca «El periódico de la energía - China duplicará las instalaciones solares hasta 85GW al año, reduciendo los costos a la mitad» 26 Noviembre 2020. <https://elperiodicodelaenergia.com/china-duplicara-las-instalaciones-solares-hasta-85gw-al-ano-reduciendo-los-costos-a-la-mitad/>.
- [55] Iberdrola - Líneas de Negocio - Proyectos Emblemáticos «Francisco Pizarro, el mayor proyecto fotovoltaico de Europa» <https://www.iberdrola.com/conocenos/lineas-negocio/proyectos-emblematicos/planta-fotovoltaica-francisco-pizarro>.
- [56] Eiffage Energía «Iberdrola pone en funcionamiento el mayor parque fotovoltaico de Europa» 9 Abril 2020. <https://www.energia.eiffage.es/2020/04/09/iberdrola-pone-en-funcionamiento-el-mayor-parque-fotovoltaico-de-europa-construido-por-eiffage-energia/>.
- [57] Lucera «Conoce la regulación de la energía solar en España» <https://lucera.es/blog/conoce-la-regulacion-de-la-energia-solar-en-espana>.
- [58] Iberdrola - Autoconsumo Fovovoltaico «El auge del autoconsumo fotovoltaico, un aliado contra el cambio climático» <https://www.iberdrola.com/innovacion/autoconsumo-fotovoltaico>.
- [59] M. Hilcu «Otovo - Autoconsumo fotovoltaico: Guía completa» 2021. <https://www.otovo.es/blog/autoconsumo/autoconsumo-fotovoltaico-todo-lo-que-tenes-que-saber/>.

- [60] O. Planas «Energía Solar - ¿Qué es el silicio?» 10 Junio 2019. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/silicio>.
- [61] Prosumidores - Academia de las renovables «Sistemas de aprovechamiento de energía solar FV» <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/12/M%C3%B3dulo-2-Sistemas-de-aprovechamiento-de-energ%C3%ADa-solar-fv.pdf>.
- [62] Ineldec «Partes panel solar» <https://ineldec.com/wp-content/uploads/2020/08/Partes-de-Panel-Solar.jpg>.
- [63] AutoSolar «Autoconsumo fotovoltaico» <https://autosolar.es/blog/energia-solar-fotovoltaica/autoconsumo-fotovoltaico>.
- [64] Grupo Active «La Energía solar fotovoltaica, es la inversión más rentable y segura» <http://www.grupo-active.com/energia-solar-fotovoltaica.html>.
- [65] Taypro Private Limited «PVWiki - Free solar photovoltaic education for all».
- [66] Inycia «Instalaciones de autoconsumo fotovoltaicas para Negocios y Hogares» <https://inycia.com/cubiertas/>.
- [67] A. -. S. Eléctricos «Evolución de los precios de los paneles solares en los últimos años» 14 Septiembre 2020. <https://somoselectricos.com/evolucion-precios-paneles-solares/>.
- [68] Inarquia «La UE Exige Explicaciones a España por los Obstáculos al Autoconsumo Eléctrico» <https://inarquia.es/autoconsumo-electrico-ue-exige-espana/>.
- [69] La Sexta «Bruselas envía una dura carta a España exigiendo explicaciones por las trabas del Gobierno al autoconsumo eléctrico»

- https://www.lasexta.com/noticias/nacional/bruselas-envia-dura-carta-espana-exigiendo-explicaciones-trabas-gobierno-autoconsumo-electrico_2017032058d05bef0cf201b3e540da52.html.
- [70] G. Ojeda «Selectra - ¿Qué es impuesto al sol? Derogación, explicación e historia» <https://selectra.es/autoconsumo/info/normativa/impuesto-sol>.
- [71] Inarquia «¿Qué es el llamado Impuesto al Sol?» <https://inarquia.es/que-es-el-llamado-impuesto-al-sol/>.
- [72] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía «Guía profesional de tramitación del autoconsumo» 2020. <https://www.idae.es/publicaciones/guia-profesional-de-tramitacion-del-autoconsumo>.
- [73] Energya VM «La compensación de los excedentes de autoconsumo» <https://www.energyavm.es/la-compensacion-de-los-excedentes-de-autoconsumo/>.
- [74] Google Maps «Google Maps» <https://www.google.es/maps/@40.1109681,-3.670129,486m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4>.
- [75] Photovoltaics Geographical Information System (PVGIS) «PV Performance Tool» https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#PVP.
- [76] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) «Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)» <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>.
- [77] D. C. J. a. S. R. Kurtz, Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review, 2012.

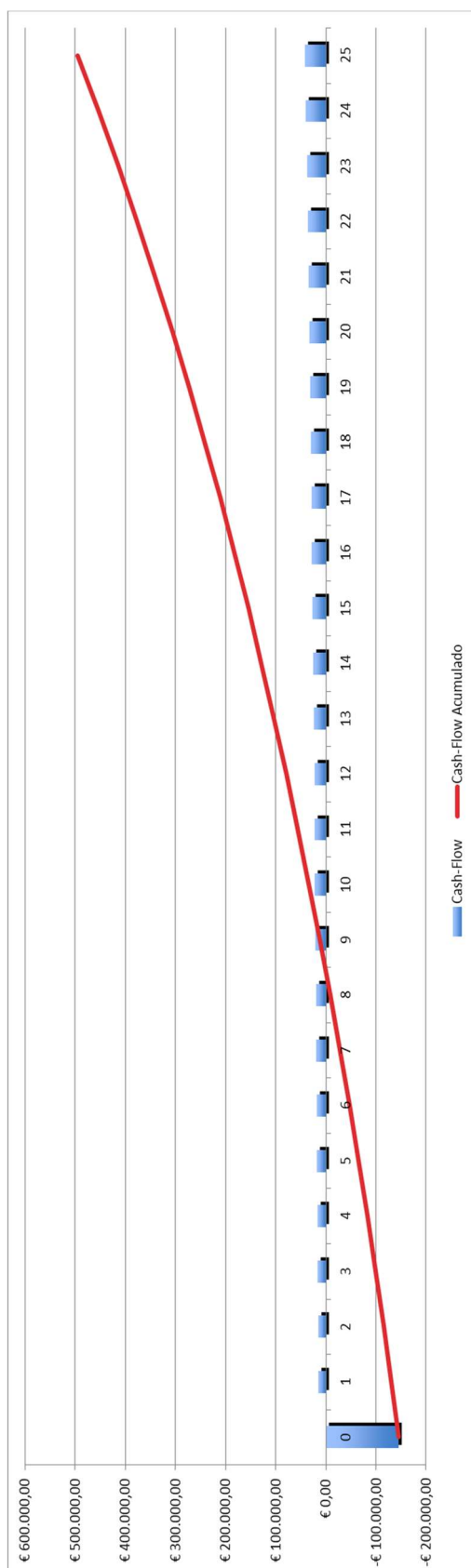
- [78] J. M. Carrillo «Yearly Sankey diagram for the simulated PV system Energy losses»
https://www.researchgate.net/figure/Yearly-Sankey-diagram-for-the-simulated-PV-system-Energy-losses-are-indicated-as_fig4_307607593.
- [79] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) «Data sources and calculation methods» <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods>.
- [80] University of Twente «Solar Energy Slides».
- [81] «Pinterest - Latitudes Planeta Tierra»
<https://www.pinterest.es/pin/798614946402853120/>.
- [82] E. G. Vásquez «Centro de Capacitación Eléctrica y Energías Alternas (CCEEA) - La importancia de hacer un buen cálculo de sombras»
<https://ccee.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/calculo-de-sombra-con-el-metodo-del-solsticio-de-invierno>.
- [83] Monsolar «Calcular la separación entre filas de placas solares para evitar sombras»
<https://www.monsolar.com/blog/calcular-la-separacion-entre-filas-de-placas-solares-para-evitar-sombras/>.
- [84] CED GreenTech «What is the difference between Solar STC and Solar PTC?»
<https://www.cedgreentech.com/question/what-difference-between-solar-stc-and-solar-ptc>.
- [85] TrinaSolar
[https://static.trinasolar.com/sites/default/files/US_Datasheet_DE06X.05\(II\)_NA_2021_PA3.pdf](https://static.trinasolar.com/sites/default/files/US_Datasheet_DE06X.05(II)_NA_2021_PA3.pdf).
- [86] Efitrón «Comprar una placa solar» <https://efitron.com/blog/comprar-una-placa-solar/>.

- [87] TecnoSol «Características eléctricas de los paneles solares»
<https://tecnosolab.com/noticias/caracteristicas-electricas-de-los-paneles-solares/>.
- [88] TrinaSolar «MULTI-BUSBAR MONO PERC MODULE»
[https://static.trinasolar.com/sites/default/files/US_Datasheet_DE06X.05\(II\)_NA_2021_PA3.pdf](https://static.trinasolar.com/sites/default/files/US_Datasheet_DE06X.05(II)_NA_2021_PA3.pdf).
- [89] National Renewable Energy Laboratory (NREL) «Best Research-Cell Efficiency Char,» <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [90] J. Jean y . P. R. Brown, Emerging photovoltaic technologies, Bristol, 2020.
- [91] Exide «Battery Energy Storage Solutions»
<https://www.exide.com/es/es/technology/inundada>.
- [92] Syscom Blog «Baterías de Plomo - Ácido»
<https://www.syscomblog.com/2017/10/baterias-de-plomo-acido.html>.
- [93] Ineldec - Ingeniería Eléctrica «Baterías Solares De GEL 200Ah Para Paneles Solares AGM» <https://ineldec.com/producto/baterias-solares-para-paneles-de-gel-200ah-agm/>.
- [94] SotySolar «¿Qué inversor solar elegir para tu instalación de placas solares?» 2 Abril 2021. <https://sotysolar.es/blog/que-son-los-inversores-fotovoltaicos>.
- [95] SolaRacks «Montaje en chapa sin rieles – Surf»
<https://www.solaracks.com/es/product/montaje-en-chapa-sin-rieles-surf/>.
- [96] TeknoSolar «Estructura Inclínada Soporte Placas Solares en Horizontal 11H»
<https://www.teknosolar.com/estructura-inclinada-soporte-placas-solares-hasta-72-celulas-che915xl/>.

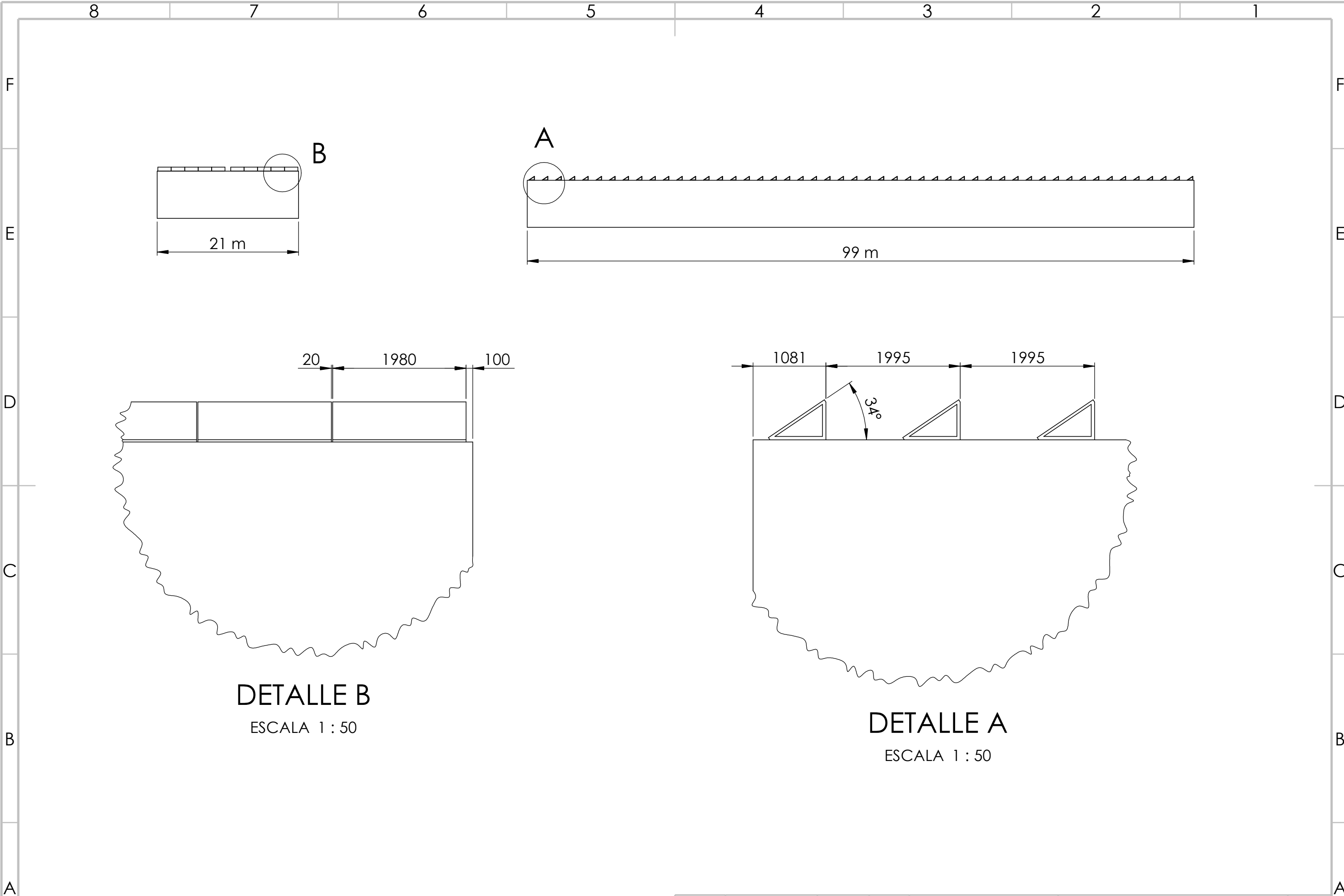
- [97] Solar Graus «SOPORTE PARED 30°-35° 1 PANEL SOLAR HORIZONTAL CH915» <https://solargraus.com/inicio/231-soporte-pared-30-35-1-panel-solar-ch915.html>.
- [98] Anna Pérez «OBS Business School - Estudio de viabilidad de un proyecto: estructura e importancia» <https://www.obsbusiness.school/blog/estudio-de-viabilidad-de-un-proyecto-estructura-e-importancia>.
- [99] AutoSolar «Pallet Paneles Solares 400W Perc Mono ERA» <https://autosolar.es/panel-solar-24-voltios/pallet-paneles-solares-400w-perc-mono-era>.
- [100] AutoSolar «Panel Solar 400W PERC Monocristalino ERA» <https://autosolar.es/panel-solar-24-voltios/panel-solar-400w-perc-monocristalino-era>.
- [101] Social Energy «Inversor SOLIS-50K-DC» <https://tiendasocialenergy.es/tienda/inversores/inversor-solis-50k-dc/>.
- [102] Solar Graus «SOPORTE PARED 30°-35° 1 PANEL SOLAR HORIZONTAL CH915» <https://solargraus.com/inicio/231-soporte-pared-30-35-1-panel-solar-ch915.html>.
- [103] Instituto Nacional Estadística - INE, «Índice de precios de consumo (IPC). Indicador adelantado.» https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176802&menu=ultiDatos&idp=1254735976607.
- [104] SolarTradex «Análisis económico de un proyecto de autoconsumo solar.» <https://solartradex.com/blog/analisis-economico-de-un-proyecto-de-autoconsumo-solar/>.

ANEXO I: ANÁLISIS DE VIABILIDAD

RESUMEN ANUAL												
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Producción electricidad (kWh)	-	192.331	191.369	190.412	189.460	188.513	187.570	186.632	185.699	184.771	183.847	182.928
Entradas (€)												
Autoconsumo	-	15.805,98	16.513,30	17.252,27	18.024,31	18.830,89	19.673,58	20.553,97	21.473,76	22.434,71	23.438,66	24.487,54
Subvenciones	-	15.805,98	16.513,30	17.252,27	18.024,31	18.830,89	19.673,58	20.553,97	21.473,76	22.434,71	23.438,66	24.487,54
Total	-	15.805,98	16.513,30	17.252,27	18.024,31	18.830,89	19.673,58	20.553,97	21.473,76	22.434,71	23.438,66	24.487,54
Salidas (€)												
Capital propio	145.528,67											
Punto de conexión	-											
Tasas / Impuestos	-	864,00	889,92	916,62	944,12	972,44	1.001,61	1.031,66	1.062,61	1.094,49	1.127,32	1.161,14
Mantenimiento	-											
Seguro	-											
Préstamo	-											
Reserva reparaciones	145,53	149,89	149,89	463,17	477,07	491,38	506,12	521,31	536,95	553,05	569,65	585,79
Total	- 145.528,67	- 1.009,53	- 1.039,81	- 1.379,79	- 1.421,19	- 1.463,82	- 1.507,74	- 1.552,97	- 1.599,56	- 1.647,54	- 1.696,97	- 2.530,19
Resultados (€)												
Cash-Flow	-	145.528,67	14.796,45	15.872,47	16.603,12	17.367,07	18.165,84	19.001,00	19.874,20	20.787,17	21.741,69	22.737,26
Cash-Flow Acumulado	- 145.528,67	- 130.732,22	- 115.258,74	- 99.386,26	- 82.783,14	- 65.416,07	- 47.250,23	- 28.249,23	- 8.375,03	12.412,13	34.153,83	79.088,44
Producción electricidad (kWh)												
Año	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Producción electricidad (kWh)	181.103	180.197	179.296	178.400	177.508	176.620	175.737	174.859	173.984	173.114	172.249	171.388
Entradas (€)												
Autoconsumo	26.728,21	27.924,30	29.173,91	30.479,45	31.843,40	33.268,40	34.757,16	36.312,54	37.937,52	39.635,23	41.408,91	43.261,95
Subvenciones												
Total	26.728,21	27.924,30	29.173,91	30.479,45	31.843,40	33.268,40	34.757,16	36.312,54	37.937,52	39.635,23	41.408,91	43.261,95
Salidas (€)												
Capital propio												
Punto de conexión												
Tasas / Impuestos												
Mantenimiento	1.231,86	1.268,81	1.306,88	1.346,08	1.386,47	1.428,06	1.470,90	1.515,03	1.560,48	1.607,29	1.655,51	1.705,18
Seguro												
Préstamo												
Reserva reparaciones	1.452,42	1.495,99	1.540,87	1.587,10	1.634,71	1.683,75	1.734,27	1.786,30	1.839,88	1.895,08	1.951,93	2.010,49
Total	- 2.684,28	- 2.764,81	- 2.847,75	- 2.933,18	- 3.021,18	- 3.111,81	- 3.205,17	- 3.301,32	- 3.400,36	- 3.502,38	- 3.607,45	- 3.715,67
Resultados (€)												
Cash-Flow	24.043,94	25.159,50	26.326,16	27.546,26	28.822,22	30.156,58	31.551,99	33.011,21	34.537,16	36.132,85	37.801,46	39.546,28
Cash-Flow Acumulado	103.132,38	128.291,87	154.618,04	182.164,30	210.986,52	241.143,10	272.695,09	305.706,30	340.243,46	376.376,32	414.177,77	453.724,06



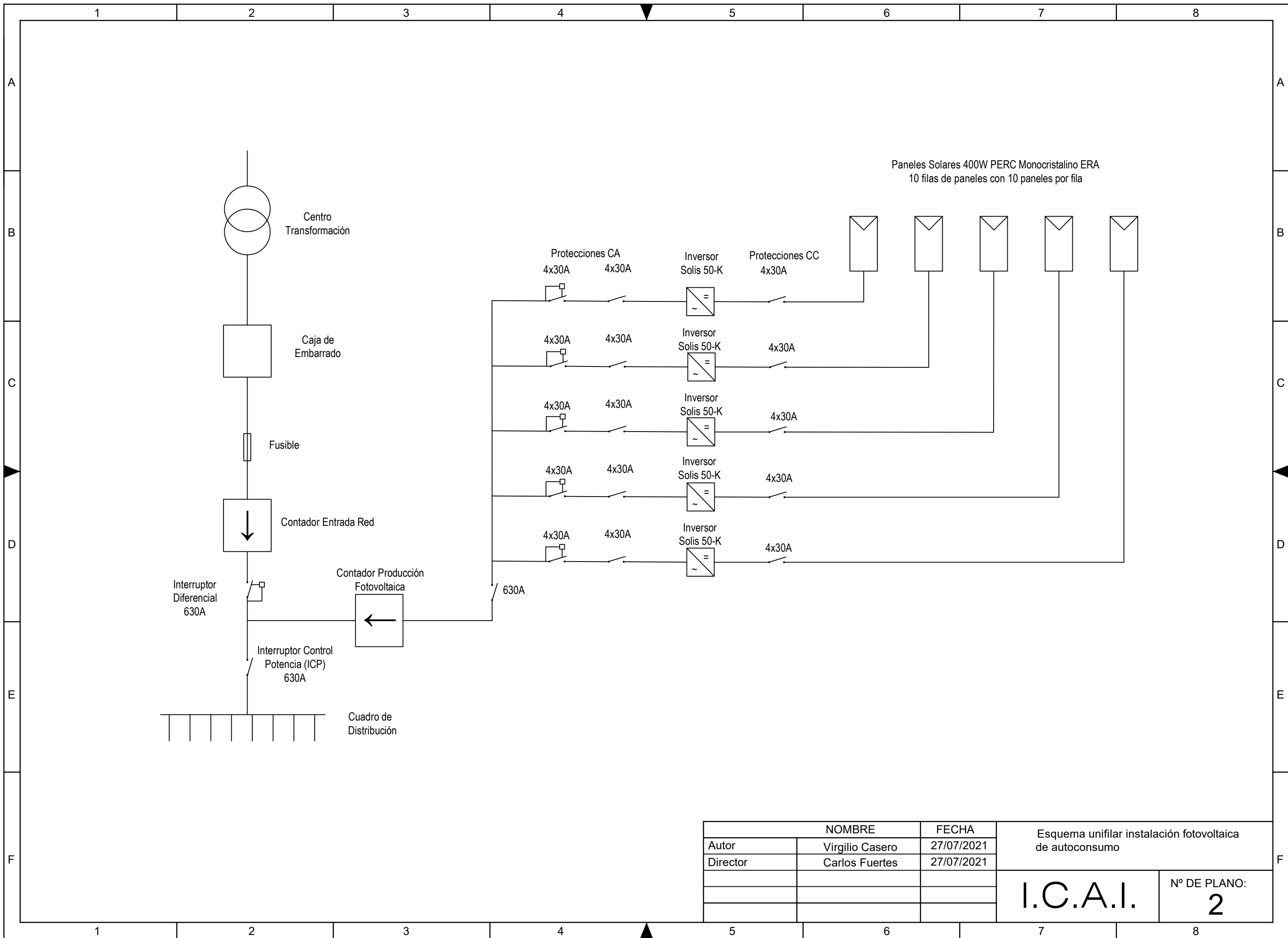
ANEXO II: PLANOS



DETALLE B
ESCALA 1 : 50

DETALLE A
ESCALA 1 : 50

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	Descripción: Disposición de las placas solares en la cubierta de la nave industrial.	Placas Solares	A3
Autor	Virgilio Casero	VCL	21/07/2021			
Director	Carlos Fuertes	CFK	21/07/2021			
				Unidades: mm	ESCALA 1:500	HOJA 1 DE 1



NOMBRE		FECHA	Esquema unifilar instalación fotovoltaica de autoconsumo	
Autor	Virgilio Casero	27/07/2021		
Director	Carlos Fuertes	27/07/2021		
			I.C.A.I.	Nº DE PLANO: 2

ANEXO III: FICHAS TÉCNICAS

ESPSC

Monocrystalline Solar Module



High-quality

With 72 cells and 5 bypass diodes in power classes from 380 to 400 Wp for grid connected systems.



Reliable

The high quality level of ERA SOLAR guarantees long life-time and high earnings.



Solid

An Aluminium hollow-chamber frame on each side combined with low-iron and tempered solar glass ensures high load capacity resistance.



Performance guarantee

ERA SOLAR grants a power guarantee of 90% of nominal power output up to 10 years and 80% up to 25 years.



WATTS
POSITIVE
TOLERANCE



YEARS
PRODUCT
WARRANTY



YEARS
PERFORMANCE
GUARANTEE 90%



YEARS
PERFORMANCE
GUARANTEE 80%



Solis-(40-70)K

Inversores Solis trifásicos



360 grados

Características:

- ▶ 99% de eficiencia máxima
- ▶ Rango de voltaje ultra amplio, voltaje de arranque ultra bajo
- ▶ 4 entradas MPPT, cada corriente nominal de 22/28.5A, compatible con módulos de alta potencia
- ▶ THDi <3% baja distorsión armónica
- ▶ Antirresonancia, compatible con más de 6 MW en paralelo en un transformador
- ▶ Solución perfecta de monitoreo de sitios comerciales
- ▶ Ventilador redundante inteligente



Modelo:

400V: Solis-40K Solis-50K Solis-60K-4G
480V: Solis-50K-HV Solis-60K-HV Solis-70K-HV-4G

Tabla de datos

Modelo	Solis-40K	Solis-50K	Solis-50K-HV	Solis-60K-HV	Solis-60K-4G	Solis-70K-HV-4G
Entrada (CC)						
Potencia de entrada máxima recomendada	48 kW	60 kW	60 kW	72 kW	72 kW	84 kW
Voltaje máxima de entrada	1100 V					
Voltaje de nominal	600 V	600 V	720 V	720 V	600 V	720 V
Voltaje de arranque	200 V					
Rango de voltaje MPPT	200-1000 V					
Corriente máxima de entrada	4*22 A	4*28.5 A	4*22 A	4*28.5 A		
Corriente máxima de cortocircuito	4*34.3 A	4*44.5 A	4*34.3 A	4*44.5 A		
Número de MPPT/Número máxima de cadenas de entrada	4/8	4/12	4/8	4/12		
Salida (CA)						
Potencia nominal de salida	40 kW	50 kW	50 kW	60 kW	60 kW	70 kW
Potencia máxima de salida aparente	44 kVA	55 kVA	55 kVA	66 kVA	66 kVA	77 kVA
Potencia máxima de salida	44 kW	55 kW	55 kW	66 kW	66 kW	77 kW
Voltaje nominal de la red	3/N/PE, 220 V / 380 V, 230 V / 400 V		3/PE, 480 V		3/N/PE, 220 V / 380 V, 230 V / 400 V	3/PE, 480 V
Frecuencia nominal de la red	50 Hz / 60 Hz					
Corriente nominal de salida de red	58 A / 60.8 A	72.2 A / 76 A	60.2 A	72.2 A	86.6 A / 91.2 A	84.2 A
Corriente máxima de salida	66.9 A	83.3 A	66.2 A	80 A	100 A	92.6 A
Factor de potencia	>0.99 (0.8 que lleva a 0.8 de retraso)					
THDi	<3%					
Eficiencia						
Eficiencia máxima	98.8%		99.0%			
Eficiencia EU	98.4%		98.5%			
Protección						
Protección contra polaridad inversa DC				Sí		
Protección contra cortocircuito				Sí		
Protección de sobrecorriente de salida				Sí		
Protección contra sobretensiones				Sí		
Monitoreo de red				Sí		
Detección Anti-isla				Sí		
Protección de temperatura				Sí		
Monitoreo de cadenas				Sí		
Función anti-PID				Opcional		
AFCI integrado (Protección de circuito de falla de arco CC)				Opcional		
Interruptor de CC integrado				Opcional		
Datos generales						
Dimensiones (longitud*ancho*altura)	630*700*357 mm					
Peso	61 kg	63 kg	61 kg	63 kg		
Topología	Sin Transformador					
Consumo propio (noche)	<1 W					
Rango de temperatura de funcionamiento	-25 ~ +60°C					
Humedad relativa	0-100%					
Nivel de protección	IP65					
Enfriamiento	Convección natural	Ventilador redundante inteligente	Convección natural	Ventilador redundante inteligente		
Altitud máxima de funcionamiento	4000 m					
Estándar de conexión de red	G98 or G99, VDE-AR-N 4105 / VDE V 0124, EN 50549-1, VDE 0126 / UTE C 15 / VFR:2019, RD 1699 / RD 244 / UNE 206006 / UNE 206007-1, CEI 0-21, C10/11, NRS 097-2-1, EIFS 2018.2, IEC 62116, IEC 61727, IEC60068, IEC 61683, EN 50530					
Estándar de seguridad / EMC	IEC/EN 62109-1/-2, IEC/EN 61000-6-2/-4					
Características						
Conexión de CC	Conector MC4					
Conexión de CA	Terminal OT					
Pantalla	LCD					
Comunicación	RS485, Opcional: Wi-Fi, GPRS					

Soportes universales

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- ✓ Disposición de los módulos: horizontal
- ✓ Capacidad 1 MFV
- ✓ Soporte válido para módulos de hasta 72 células
- ✓ Instalación recomendada: fachada
- ✓ Perfilería: Aluminio EN AW 600 5.T6
- ✓ Tornillería: Acero Inoxidable

» Incluye presor lateral universal



Ref.

WH915

