



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

Investigación y desarrollo de la optimización de la tecnología agrovoltaica en la zona de Almería

Research and development of the optimization of agrovoltaic technology in the Almería area

Autor/es

**Beatriz Muñoz Vidal**

Director/es

**Sergio Espatolero Callao**

Ponente/s

**Luis Ignacio Díez Pinilla**

Titulación del autor

**Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura / Universidad de Zaragoza  
2021-2022

## Investigación y desarrollo de la optimización de la tecnología agrovoltaica en la zona de Almería.

### RESUMEN

La expansión de las energías renovables tiene como objetivo satisfacer la demanda mundial de energía reemplazando los combustibles fósiles. Sin embargo, requiere grandes extensiones de terreno. Al mismo tiempo, la seguridad alimentaria se ve amenazada por los impactos del cambio climático y el crecimiento de la población mundial. Esto ha llevado a una creciente competencia por los limitados recursos de la tierra. En este contexto, la combinación de energía fotovoltaica y producción vegetal, denominada sistema agrovoltaico, se ha sugerido como una oportunidad para la combinación sinérgica de energía renovable y producción de alimentos. Aunque esta tecnología ya se ha aplicado en varios proyectos comerciales, apenas se ha investigado su viabilidad e impacto en la producción de cultivos.

El presente proyecto ofrece una descripción del estado actual del arte y las oportunidades potenciales para la aplicación de sistemas agrovoltaicos. Además, se discute las posibles alteraciones microclimáticas e impactos resultantes de combinar este tipo de tecnología con la producción de cultivos.

Durante el desarrollo de la memoria se llegará a la conclusión de que la producción de alimentos debajo de la fotovoltaica puede conducir a una disminución de los rendimientos de los cultivos, ya que se espera que la radiación solar se reduzca en aproximadamente un tercio debajo de los paneles. Sin embargo, también se comprobará que, a través de la producción combinada de energía y cultivos, la tecnología agrovoltaica puede aumentar la productividad de la tierra hasta en un 70%. Dados los impactos del cambio climático y las condiciones en climas áridos, es probable que se obtengan beneficios potenciales para la producción de cultivos a través de sombra adicional y mejoras observadas en la productividad del agua.

Como tal, los sistemas agrovoltaicos pueden ser un enfoque técnico valioso para una agricultura más sostenibles, ayudando a satisfacer las necesidades actuales y futuras de producción de energía y alimentos y, al mismo tiempo, ahorrando recursos de la tierra.

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación presentado a la convocatoria de “Proyectos de colaboración público-privada 2021” en el que participan empresas privadas del sector fotovoltaico como IASOL y ENDEF, una empresa del sector de las tecnologías de la información, ACCURO, así como los centros de investigación TECNOVA, LEITAT y FUNDITEC.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Descripción de los conocimientos y desarrollos actuales en el campo o campos específicos cubiertos por el proyecto, con indicación de las dificultades y desafíos.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2. Situación actual de la tecnología agrovoltaica en España.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3. Situación actual de la tecnología agrovoltaica en Europa.....</b>	<b>8</b>
<b>2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA AGROVOLTAICA .....</b>	<b>10</b>
<b>3. TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS EN INVERNADEROS .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Tipos de invernaderos .....</b>	<b>13</b>
<b>4. CULTIVO A ESTUDIAR Y CARACTERÍSTICAS DEL EMPLAZAMIENTO DONDE SE DESARROLLA EL PROYECTO .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1. Características del cultivo y requerimientos de radiación.....</b>	<b>16</b>
<b>4.2. Condiciones climatológicas de la zona de Almería .....</b>	<b>17</b>
<b>4.3. Situación campaña hortofrutícola 2020/2021 en Almería.....</b>	<b>18</b>
<b>4.4. Invernadero objeto de estudio .....</b>	<b>21</b>
<b>5. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN AGROVOLTAICA.....</b>	<b>25</b>
<b>5.1. Dimensionado del generador fotovoltaico de 13,91 kWp.....</b>	<b>26</b>
<b>5.2. Características técnicas de los equipos utilizados.....</b>	<b>28</b>
5.2.1. Inversor de conexión a red.....	28
5.2.2. Módulos fotovoltaicos .....	29
5.2.3. Estructura de soporte .....	30
<b>6. ANÁLISIS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DE LA INSTALACIÓN AGROVOLTAICA.....</b>	<b>32</b>
<b>6.1. Rendimiento del sistema.....</b>	<b>34</b>
<b>6.2. Análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> y contaminantes gaseosos que dejan de emitirse a la atmósfera. ....</b>	<b>34</b>
<b>7. ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DEL CULTIVO CON LA TECNOLOGÍA AGROVOLTAICA.....</b>	<b>36</b>
<b>7.1. Indicadores de rendimiento (KPI).....</b>	<b>39</b>
<b>7.2. Producción del cultivo .....</b>	<b>40</b>
<b>8. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO .....</b>	<b>42</b>
<b>8.1. Viabilidad económica del proyecto .....</b>	<b>42</b>
8.1.1. Conceptos básicos de economía .....	43

8.1.2. Parámetros principales en un análisis de viabilidad de un proyecto de autoconsumo.....	45
<b>8.2. Evaluación de la rentabilidad .....</b>	<b>46</b>
<b>9. ANÁLISIS SOCIAL DEL PROYECTO.....</b>	<b>49</b>
<b>10. CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de fuentes de energía renovables como medio para satisfacer la demanda mundial de energía y al mismo tiempo reemplazar los combustibles fósiles como uno de los principales impulsores del cambio climático se ha convertido en uno de los principales desafíos sociales de nuestro tiempo.

En este contexto, los sistemas fotovoltaicos ofrecen un gran potencial y se consideran incluso más eficientes en la captura de energía solar que la fotosíntesis. Esto, y el hecho de que la instalación de estos sistemas en áreas abiertas es la opción de menor costo, también ha llevado al establecimiento de sistemas fotovoltaicos en tierras agrícolas. Sin embargo, esto puede dar lugar a un conflicto de uso de la tierra entre la producción de energía y alimentos, y puede ser motivo de gran preocupación, especialmente en regiones con una superficie limitada o una población densa. La instalación extensiva de instalaciones fotovoltaicas montadas en el suelo a gran escala ha provocado una disminución de la aceptación social en algunas regiones y una mayor preocupación por la pérdida de tierra cultivable para una producción de energía fotovoltaica más rentable. En vista de este conflicto, el desarrollo de sistemas agrovoltaicos puede verse como una forma de combinar la producción fotovoltaica y de alimentos en la misma área de tierra.

Como lo demuestran varios estudios [1][2], la tecnología agrovoltaica puede aumentar la productividad de la tierra. Por lo tanto, ofrece un gran potencial como un sistema de energía renovable coproductivo y eficiente en el uso de los recursos en regiones con poblaciones densas o áreas de tierra limitadas, como regiones montañosas e islas. Sin embargo, se anticipa su mayor potencial en regiones semiáridas y áridas, donde se pueden esperar varios efectos secundarios sinérgicos.

En la zona de Almería, el cultivo de pimientos a menudo sufre los efectos adversos de la alta radiación solar y las pérdidas de agua concomitantes. Se ha demostrado que la eficiencia del uso del agua aumenta debajo de los paneles en las instalaciones fotovoltaicas, y se han observado resultados similares en los sistemas agrovoltaicos [1]. Estos hallazgos se están volviendo aún más relevantes, ya que se espera que la demanda de agua para riego aumente en las condiciones climáticas futuras prospectivas debido al cambio climático. Además de mejorar la productividad del agua, los cultivos cultivados en climas áridos también pueden beneficiarse directamente de la reducción de la radiación solar a través de los paneles fotovoltaicos. Además de sus impactos en la producción de cultivos, la implementación de agrovoltaica mejora la rentabilidad de la agricultura al generar ingresos adicionales a través de la producción de energía y puede mejorar aún más la electrificación rural fuera de la red como parte de la energía descentralizada.

Por lo tanto, la agrovoltaica puede ser un componente importante de los futuros sistemas de producción de energía renovable, al mismo tiempo que garantiza la producción de alimentos y la viabilidad económica de la agricultura. Sin embargo, el impacto de esta tecnología en el desarrollo y el rendimiento de los cultivos es inevitable, pero hasta ahora solo se ha investigado científicamente para una pequeña cantidad de especies de cultivos, como la lechuga, el pepino y el trigo duro. Esto muestra la necesidad de más investigación.

### **1.1. Descripción de los conocimientos y desarrollos actuales en el campo o campos específicos cubiertos por el proyecto, con indicación de las dificultades y desafíos.**

El desarrollo de un concepto de invernadero fotovoltaico adaptado a las necesidades específicas de diferentes cultivos ofrece una vía única para aumentar la competitividad de las explotaciones agrarias, garantizando la producción energética para autoconsumo o su distribución entre comunidades energéticas.

En 2021, España contaba con una superficie agraria en invernadero de en torno a 70.000 hectáreas, de las cuales más de un 90% se encontraban en las regiones de Andalucía, Murcia y Canarias.

Andalucía representa la comunidad autónoma de España con mayor extensión de invernaderos (alrededor de 56.000 hectárea), por lo que la sinergia entre invernadero y fotovoltaica contribuiría decisivamente a la reducción de la presión sobre los recursos de suelo disponibles para instalaciones fotovoltaicas en una región con gran potencial para ambos tipos de uso del suelo, gracias a la alta radiación solar en la misma.

Hacer viable la hibridación entre invernadero y fotovoltaica supondría un gran hito a la hora de optimizar y maximizar los recursos de suelo disponible a nivel mundial, ya que el problema principal que se encuentra a la hora de instalar plantas fotovoltaicas es la limitación de la superficie, por lo que, si hubiera una tecnología que fuera capaz de hibridar cultivos agrícolas mientras que se genera energía, se generaría un gran efecto tractor tanto al sector energético como al agrícola.

Este proyecto se centra en investigar cómo se podría producir energía eléctrica junto a cultivos de una manera más eficiente y óptima, persiguiendo el abaratamiento de esta tecnología hasta el punto de hacerla competitiva, hecho que actualmente aún está lejos de producirse por la inmadurez de los avances tecnológicos en el sector. Es decir, combinar la producción de energía en cultivos de invernaderos a un coste competitivo es la principal necesidad a resolver en el proyecto desde el punto de vista agrovoltáico.

### **1.2. Situación actual de la tecnología agrovoltáica en España**

La producción compatible de energía y alimentos de forma sostenible es una de las preocupaciones de la sociedad actual, debido a cuestiones como la crisis energética mundial por el agotamiento de energías fósiles y el cambio climático, siendo uno de los retos de la agricultura actual la búsqueda e implementación de fuentes de energía limpias y renovables [3]. La generación de energía eléctrica a través de fotovoltaica es una de las opciones más viables, especialmente en los países mediterráneos, sin embargo, la competencia entre cultivos y placas fotovoltaicas por el recurso del Sol es la principal problemática encontrada.

En los últimos años, se han llevado a cabo algunos proyectos comerciales tanto a nivel nacional como internacional utilizando esta técnica. En España, la multinacional Enel (matriz de Endesa), ha puesto en marcha cinco proyectos piloto de agrovoltáica sobre suelo. La finalidad es que en cada uno de estos proyectos se prueben cultivos diferentes para ver cómo evolucionan a la hora de compatibilizar el uso del suelo destinado hasta ahora a huertos solares, incluyendo alternativas de cultivos tradicionales en las zonas de implantación como plantas aromáticas, algunas hortícolas al aire libre,

praderas o apicultura. El proyecto más significativo es el de Carmona. Allí Endesa cuenta con las plantas solares de “Los Naranjos” y “Las Corcheras”. Estas dos plantas generan energía para aproximadamente 30.000 hogares de Carmona con una producción de 100MW en sus 200 hectáreas. En ese espacio Endesa ha decidido combinar la producción de energía fotovoltaica con uno de sus proyectos de agrovoltaica [4].

En el caso de “Las Corcheras”, se han reservado 95 hectáreas a la agricultura y 200 m<sup>2</sup> a la apicultura, una actividad de gran tradición en la zona. Además, se han sembrado plantas aromáticas tales como la salvia, romero, lavanda, cilantro y orégano. Este cultivo permitirá después a las abejas que se ubicarán entre los paneles desarrollar su función polinizadora, creando una miel sostenible y con marca solar [5].

Ambos proyectos cuentan con un total de 258.120 paneles fotovoltaicos bifaciales, lo que permite captar la radiación solar por ambos lados, optimizando su utilización [6].

Otros de los proyectos que está llevando a cabo Enel son las centrales fotovoltaicas de Totana y Valdecaballeros, en las cuales se probarán diferentes cultivos, entre ellos alcachofas, brócolis, calabacines, berenjenas, hierbas medicinales y aromáticas, etc. En Totana en particular se sembraron hierbas y leguminosas que pueden mejorar el hábitat ornitológico [7].

### **1.3. Situación actual de la tecnología agrovoltaica en Europa**

#### Francia

En Francia la apuesta por la agrovoltaica está siendo fuerte, con unas subastas específicas a la innovación donde la agrovoltaica se está llevando la mayoría de los proyectos. De un total de 146,2 MW de capacidad fotovoltaica que se subastaron en 47 proyectos, 31 proyectos (80 MW) fueron para instalaciones agrovoltaicas. El precio que se adjudicó fue alto (81,5 €/MWh).

Además, las empresas solares francesas Sun’Agro, REM Tec, Kilowattsol y Altergie Développement et Râcines anunciaron el mes de junio de 2021 la creación de France Agrivoltaisme, el primer organismo comercial del mundo para el sector agrovoltaico [8]. Esta asociación pretende promover la agrovoltaica dando prioridad a las soluciones con un fuerte impacto agrícola, representar al sector ante los diferentes actores (administraciones públicas, organizaciones profesionales, etc.), estudiar y defender los derechos e intereses de sus miembros, y desarrollar información y formación en agrovoltaica [9].

#### Países Bajos

La compañía alemana BayWa r.e. y su filial holandesa GroenLeven, están desarrollando cinco proyectos piloto de energía agrovoltaica en los Países Bajos, donde están probando cinco tipos diferentes de cultivos: arándanos, grosellas rojas, frambuesas, fresas y moras [10].

El mayor de los proyectos, una planta solar de 2,67 MW ubicada en una superficie de 3,2 hectáreas dedicada al cultivo de frambuesas se encuentra en el municipio holandés de Zevenaar, cerca de la ciudad de Arnhem, en la frontera entre



Holanda y Alemania. Este proyecto ha sido galardonado con el premio “The smarter E AWARD” en la categoría Outstanding Project (Proyecto Excepcional) [11].

En este proyecto los módulos solares, semitransparentes, dejan pasar la luz y protegen los frutos del sol directo, la lluvia y el granizo. Todo el subsistema para el aprovechamiento agrícola está integrado en el sistema de montaje fotovoltaico elevado. Se ha demostrado que el rendimiento de la cosecha ha aumentado un 6,5%, generando a la vez ingresos por la electricidad fotovoltaica. Además, la instalación agrovoltaica permite prescindir de los plásticos con los que se suelen cubrir estos cultivos, minimiza el uso de pesticidas y aumenta la eficiencia del agua de riego [11].



*Figura 1. Sistema de montaje fotovoltaico elevado del proyecto agrovoltaico “Fruitvoltaic” de BayWa r.e. [11].*

### Italia

El Gobierno italiano anunció el pasado mes de abril de 2021 que se iban a invertir 1.100 millones de euros en el apoyo a la agrovoltaica como parte de su plan de recuperación post-Covid de 220.000 millones de euros [12].

El plan prevé el despliegue de sistemas agrovoltaicos con una capacidad total de 2 GW, lo que bastaría, según las estimaciones del Gobierno dirigido por Mario Draghi, para generar unos 2.500 GWh al año [12].

La inversión tendrá como objetivo “la implantación de sistemas híbridos de producción agrícola-energética que no comprometan el uso de las tierras dedicadas a la agricultura, sino que contribuyan a la sostenibilidad medioambiental y económica de las explotaciones”. El plan incluye apoyo financiero para las actividades de seguimiento, según el borrador del documento del plan [12].

La inversión pretende hacer más competitivo el sector agrícola reduciendo los costes de suministro de energía “que actualmente se estiman en más del 20% de los costes variables” [12].

## 2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA AGROVOLTAICA

La agrovoltaica conlleva una serie de ventajas a tener en cuenta, como por ejemplo permitir la interacción de la actividad del sector agrícola con la combinación de placas fotovoltaicas y, por ende, mantener una gran mitigación frente al cambio climático a la vez que se genera una fuente de ingresos para el campo. También puede ser una solución para aquellos sistemas agrarios que se encuentran aislados y que no dispongan de conexión a red cercana. Sin embargo, presenta una serie de limitaciones que frenan su implantación.

La integración segura de las energías renovables es uno de los grandes desafíos que existen hoy en día para la correcta operación del sistema eléctrico. Esta integración supone grandes retos y una elevada complejidad en nuestro sistema debido, entre otras particularidades, a la limitada capacidad de conexión y a la morfología de la curva de demanda peninsular. El refuerzo de los puntos de conexión puede permitir suavizar las limitaciones requeridas en aquellas zonas donde la producción de energía de origen renovable es elevada.

Sin embargo, la construcción de macroplantas solares puede provocar un impacto en el territorio en el que se instalen, provocando la pérdida de biodiversidad. Es importante, a la hora de realizar el estudio de una planta fotovoltaica, situar dicha instalación en lugares que no se invada terrenos bajo protección medioambiental, y que tampoco amenacen ecosistemas naturales ni especies protegidas. Es por ello que la implementación de sistemas agrovoltaicos puede ser la solución a dicho problema, gracias a que suponen una hibridación de espacios entre generación eléctrica y cultivos agrícolas.

La principal desventaja de esta tecnología es que los proyectos agrovoltaicos siguen siendo considerablemente más caros que las plantas fotovoltaicas convencionales montadas en suelo. Los mayores costes pueden deberse a las limitaciones de diseño; pero el uso de componentes especiales como los módulos (los cuales deben permitir el paso de la luz), los sistemas de montaje y los seguidores puede también aumentar significativamente el coste del proyecto, especialmente si por ejemplo los módulos deben estar elevados para que la maquinaria agrícola pueda operar debajo. Este estudio se marca como objetivo minimizar y paliar estas desventajas para conseguir una optimización de la tecnología agrovoltaica tal que el desarrollo final del proyecto y su validación suponga un alto impacto en el sector que permita abaratar los costes de este tipo de instalaciones.

Aunque aún queda una gran labor de investigación por delante, hasta hoy en día se ha podido verificar que los sistemas agrovoltaicos pueden representar una forma de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y respaldar ampliamente la seguridad alimentaria, energética y de agua de un país. Algunos de los beneficios más representativos que aporta esta tecnología son:

- Protección contra altas temperaturas y condiciones climáticas extremas.

Cuando las plantas alcanzan el llamado punto de saturación de luz, la luz deja de ser beneficiosa para el cultivo, lo que aumenta la demanda de agua y puede causar daños y obstaculizar el crecimiento del cultivo. Los paneles solares se pueden ajustar para permitir la cantidad óptima de luz solar.

- Reducción de la evaporación y aumento de la humedad del suelo.

La sombra proporcionada por los paneles solares conduce a una reducción en la evaporación del agua y puede lograr ahorros de hasta un 29% [13]. En consecuencia, ayuda a mantener la humedad del suelo, manteniendo un nivel de agua óptimo para las plantas.

- Mejora del ecosistema.

La integración de la agrovoltaica contribuye al desarrollo sostenible y a la protección y mejora de la biodiversidad y del ecosistema al prohibir el uso de herbicidas, fomentar el uso de colmenas y ganadería dentro del perímetro del terreno y la instalación de un cerco perimetral con vegetación, entre otros.

- Mayor producción y eficiencia de electricidad

La existencia de cultivos bajo los paneles solares ayuda a reducir la temperatura de estos, aumentando su productividad hasta en un +10%, según un estudio realizado por *Oregon State University* [14].

### 3. TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS EN INVERNADEROS

El sector de la fotovoltaica ha estado convencionalmente dominado por las celdas de unión de silicio cristalino, acaparando más del 95% de la producción comercial actual [15]. El buen posicionamiento de esta tecnología a nivel mundial se debe principalmente al alto rendimiento y durabilidad conseguidos, así como a una progresiva reducción del coste de producción fruto de una mejora continuada del proceso de fabricación [16].

Sin embargo, la industria solar fotovoltaica ha visto surgir en los últimos años el desarrollo de nuevas tecnologías que, como punto común, se basan en el uso de materiales baratos, que presentan procesos de fabricación más simples y, con una reducida demanda energética [17]. Estas nuevas tecnologías se denominan de capa fina (o *thin film* en inglés) debido al uso mínimo que hacen de material activo (<200 micras de espesor) para la conversión eficiente de radiación solar en electricidad [18]. Las tecnologías fotovoltaicas de capa fina pueden ofrecer características adicionales, tales como flexibilidad, ligereza y semitransparencia, convirtiéndose así en alternativas muy atractivas para su integración en numerosas aplicaciones. Entre ellas destaca la tecnología basada en el uso de polímeros semiconductores como material activo, conocida como OPV (del inglés, organic photovoltaics), por presentar una de las mejores proyecciones en el mercado de la fotovoltaica según el informe de la IEA publicado en 2020. Estudios recientes muestran el interés que la optimización de sistemas de generación fotovoltaica integrada en cubierta de invernaderos podría ofrecer en la agricultura intensiva para aumentar y mejorar la calidad de los cultivos de forma sostenible [19][20]. Es aquí donde los dispositivos OPV semitransparentes siguen siendo una alternativa muy prometedora para aplicaciones con gran demanda lumínica, por la posibilidad que presentan de sintonizar espectralmente sus propiedades de absorción en el espectro visible a través del uso de diferentes polímeros semiconductores.



Figura 2. Ejemplo de invernadero con fotovoltaica rígida integrada en cubierta (izquierda), e imágenes de dispositivos OPV con semitransparencia fabricados sobre diferentes sustratos (derecha) [21].

La irradiancia interna del invernadero es clave para la gestión de los cultivos y de la energía del sistema en global. La misma suele ser menor que la irradiancia exterior porque los materiales de la cubierta reflejan o dispersan la luz solar parcial a las áreas exteriores. Por esta razón, para cultivos que demandan mucha luz, como los tomates, la estructura del techo del invernadero está diseñada para entregar la mayor cantidad de luz solar posible a las plantas. En la región interecuatorial, la radiación penetra

profundamente en el dosel de la planta, aumentando así la fotosíntesis total. En el lado opuesto, la iluminación suplementaria se utiliza en regiones de latitudes altas [22].

Se demostró que el entorno de luz interna del invernadero varía mucho según el posicionamiento relativo de los módulos fotovoltaicos y el porcentaje total de superficie cubierta. Por otro lado, la sombra realizada por los paneles fotovoltaicos afecta a la temperatura, disminuyéndola debido al filtrado parcial de la luz solar infrarroja (IR). También se han reportado disminución de las temperaturas de debajo de los paneles fotovoltaicos, mientras que el área descubierta restante no se ve afectada o solo se ve ligeramente afectada por las sombras fotovoltaicas. Entonces la gestión de sombras es un tema clave, dependiendo de la geolocalización del invernadero y de las especies específicas de plantas y cultivos [22].

### 3.1. Tipos de invernaderos

Las tipologías de invernadero existentes a nivel nacional se pueden clasificar desde el punto de vista estructural en dos grupos fundamentales:

- Invernaderos tradicionales

Invernaderos tipo Almería o “Raspa y Amagado” e Invernadero Canario. Este primer grupo de invernaderos es el más representativo de las dos zonas donde se implantará este proyecto.

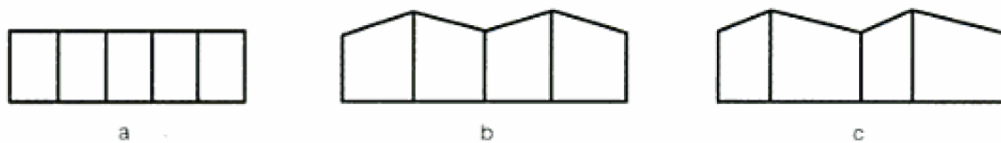


Figura 3. Variantes de los invernaderos tipos "Almería". (a) Plano o parral; (b) Raspa y amagado; (c) Asimétrico.

- “Planos” o “parral” [23].

Está compuesto por dos elementos básicos: una estructura vertical y otra horizontal. La estructura vertical está constituida por soportes rígidos que se pueden diferenciar según sean perimetrales o interiores.

La estructura horizontal (plana) flexible está constituida por dos mallas de alambre galvanizado superpuestas, tejidas manualmente de forma simultánea a la construcción del invernadero, además de formar parte de la estructura del invernadero, sirven para sostener y sujetar la lámina plástica.

Poseen la cubierta horizontal, lo que obliga a perforar el plástico para evitar el colapso de la estructura cuando llueve. Estas perforaciones hacen que este subtipo sea poco hermético.

- “Raspa y Amagado” [23].

Apareció para evitar el colapso de las estructuras planas por acumulación de lluvia. Este invernadero posee una altura que oscila entre 3 y 4,2 m, formando lo que se conoce como “raspa”. En la parte más baja,

conocida como “amagado”, se unen las mallas de la cubierta con enganches que soportan a su vez el canal de desagüe a alambres y estos se sujetan al suelo mediante cabillas de acero. La altura del amagado oscila entre 2 y 2,8 m y la de las bandas de 2 a 2,5 m.

La separación entre las raspas y los amagados suele ser de 2x4 m, utilizándose también separaciones como 2,5x4, 2x6 ó 2x8 m. El ángulo de la cubierta oscila entre 6° y 20°; cuanto mayor es éste, mejor intercepta la radiación solar, pero requiere mayor solidez estructural debido a los esfuerzos que le provoca la acción del viento.

- Asimétrico [23].

Difiere del anterior en que las vertientes de la cubierta tienen distinta inclinación, con objeto de aumentar su capacidad de captación de energía solar. La altura de la cubierta varía entre 3 y 5 m, y su altura mínima de 2,3 a 3m. La altura de las bandas oscila entre 2,15 y 3 m. La separación de los apoyos interiores suele ser de 2x4 m.

En todos los casos la cubierta suele ser de polietileno de baja densidad, aditivado para aumentar su termicidad, resistencia a la radiación ultravioleta, etc.; pero en algunos casos, como por ejemplo para el cultivo de pimientos, se utiliza una malla permeable de polietileno de alta densidad entre las dos mallas de alambre [23].

- Invernaderos industriales

Estructuras de invernadero “Multitúnel”, en sus diferentes variantes, y “Venlo” o multicapilla. Estos invernaderos son menos representativos en la geografía nacional por su mayor coste de instalación. Son estructuras compuestas por perfiles de acero galvanizado con una mayor resistencia estructural, estanqueidad y los cuales permiten mayores alturas e integración tecnológica.

- Invernaderos tipo “Multitúnel” [23].

Se caracteriza por la forma semicilíndrica de su cubierta y por su estructura totalmente metálica. Tiene una mayor capacidad para el control de los factores ambientales ya que es más hermético. Es de mayor coste que los anteriores.

Están constituidos en su totalidad por tubos de acero galvanizado, en su mayor parte de sección cilíndrica, con diámetros entre 25 y 60 mm y espesores de 1,5 a 3 mm. La unión entre las diferentes piezas se realiza mediante tornillos y bridas o abrazaderas.

Muchos de los invernaderos de este tipo se construyen con cubierta rígida de policarbonato ondulado en el perímetro, presentando mayor resistencia al viento en los laterales y frontales, donde los esfuerzos son mayores.

- Invernaderos tipo “Venlo” [23].

Son invernaderos de cristal, conformados por una estructura metálica y una cumbrera en forma de capilla múltiple con una inclinación de 22° en la mayoría de los casos.

Disponen de ventilación cenital mediante pequeñas ventanas de 2 o 3 vidrios que giran sobre un eje situado en cumbrera. Normalmente las aberturas se presentan de forma discontinua a ambos lados del techo en zonas frías, en zonas calidas es posible disponer de ventanas rectangulares continuas a lo largo de la cumbrera.

La demanda energética de los invernaderos depende del nivel de integración tecnológica del mismo, del clima y de los cultivos. De manera generalizada, los invernaderos mediterráneos, gracias a la benignidad del clima y a la escasa incorporación de equipos de control activo del clima como calefacción o refrigeración, presentan una demanda energética media-baja, con respecto a otras zonas de cultivo tradicional como Holanda, Francia o Canadá.

No obstante, los invernaderos se caracterizan por un bajo consumo energético y escasa potencia demandada, debido a la baja integración tecnológica, donde los mayores consumos se deben a los sistemas de aplicación de agua y fertilizantes a través del sistema de riego (fertirrigación) y control de clima.



## 4. CULTIVO A ESTUDIAR Y CARACTERÍSTICAS DEL EMPLAZAMIENTO DONDE SE DESARROLLA EL PROYECTO

### 4.1. Características del cultivo y requerimientos de radiación

El pimiento pertenece a la familia de las solanáceas cuyo nombre científico es *Capsicum annuum* L. Es una planta herbácea, perenne, con ciclo de cultivo anual de porte variable entre los 0,5 metros (en determinadas variedades de cultivo al aire libre) y más de 2 metros (gran parte de los híbridos cultivados en invernadero) [24].

Las altas temperaturas y la intensidad de la luz durante el verano tienen un efecto negativo en el crecimiento y rendimiento de las plantas. La carga excesiva de luz y calor en las hojas es el resultado de una alta radiación solar que limita severamente la productividad del cultivo. Las reducciones en el rendimiento del cultivo se observan con frecuencia en condiciones mediterráneas con altos niveles de radiación solar y baja humedad del aire. El sombreado es un método popular para mejorar el microclima de las plantas en el verano al disminuir la temperatura de las hojas y la tasa de transpiración de las hojas, aliviando así el estrés por calor.

#### La importancia de la media sombra

En el pimiento la media sombra modifica el ambiente para minimizar desórdenes fisiológicos en la planta y el asoleado de frutos que inciden en la productividad del cultivo [25].



*Figura 4. Pimiento producido bajo media sombra del 30 y 50% [25].*

La humedad del suelo y los nutrientes son factores de vital importancia para la planta como lo son la luz, la temperatura y la humedad relativa. Alta luminosidad y temperatura con una baja humedad relativa y de suelo inducen a un estrés hídrico que además de producir desórdenes fisiológicos de la planta genera la caída de fruto y otras fisiopatías [25].

De esta manera, el ambiente incide en el funcionamiento interno de la planta, donde los valores fuera de los intervalos normales afectan a la producción final del cultivo. Producciones de pimiento en el ciclo estival protegidos con media sombra del 30 y 50% aumentan los rendimientos y la calidad de los frutos con relación al pimiento sin cobertura [25].

El umbral térmico a partir del cual se genera daño por asoleado de fruto es entre 40 y 42°C, para un buen desarrollo vegetativo de la planta entre 20 y 25°C, y una radiación fotosintética activa mínima para que no se afecte al rendimiento de 600



$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Radiaciones excesivas como las que se producen en el ciclo estival aumentan desfavorablemente la temperatura foliar y de fruto [25].



*Figura 5. Pimiento con quemaduras tras haber estado expuesto a demasiado calor y demasiada luz [26].*

#### **4.2. Condiciones climatológicas de la zona de Almería**

Para los cálculos de producción se toman los valores de radiación solar de Almería, que aparece en la base de datos de PVGIS. Esta fuente de datos se apoya en observaciones de estaciones meteorológicas por todo el mundo. En la Tabla 1 se muestra los datos de radiación de PVGIS.

*Tabla 1. Datos de radiación para Almería.*

<b>Mes</b>	<b>H<sub>k</sub></b>	<b>H (30)</b>
<b>Enero</b>	2786,13	3596,13
<b>Febrero</b>	4171,43	5031,79
<b>Marzo</b>	4358,39	4835,81
<b>Abril</b>	5527,67	5788
<b>Mayo</b>	7321,61	7408,71
<b>Junio</b>	7978,33	7936
<b>Julio</b>	7662,90	7696,45
<b>Agosto</b>	6861,29	7117,42
<b>Septiembre</b>	5337,33	5805
<b>Octubre</b>	4272,26	4996,77
<b>Noviembre</b>	2657	3666,33
<b>Diciembre</b>	2740,65	3665,81

Donde  $H_k$  es el valor de irradiación sobre plano horizontal en  $Wh/m^2/día$ , y  $H(30)$  es el valor de irradiación sobre el plano definido, en este caso de  $13^\circ$  de inclinación, en  $Wh/m^2/día$ .

La base de datos PVGIS nos proporciona los datos de irradiación horaria (de todos los días del año) sobre superficie horizontal  $G_{dm}(0)$  en  $Wh/m^2$ , así como los datos de radiación horaria sobre la superficie del módulo ( $Wh/m^2$ ). Con dichos datos se obtienen el valor mensual y anual medio de irradiación diaria sobre el plano del generador  $G_{dm}(\alpha, \beta)$  en  $Wh/(m^2 \cdot día)$ , siendo el parámetro  $\alpha$  el azimut y  $\beta$  la inclinación del generador. La orientación del plano del generador óptima para una latitud de  $36^\circ$ , es un ángulo de azimut cero orientado al sur, y una inclinación aproximada de  $25^\circ$ . En este caso, la instalación mantiene un ángulo de inclinación y orientación, en función de la cubierta y el sistema de sujeción, siendo solidaria a la vertiente (coplanares). La producción de energía se ha calculado con el programa PVSYST (ver Anexo 1: Resultados de simulación de PVSYST).

### 4.3. Situación campaña hortofrutícola 2020/2021 en Almería.

Según los datos publicados por la Junta de Andalucía, la superficie invernada de la provincia de Almería se ha incrementado en un  $+1,6\%$ , lo que representa un total de 32.554 hectáreas. Como viene siendo habitual, este crecimiento se ha concentrado principalmente en el Levante de la provincia donde hay más superficie disponible [27].

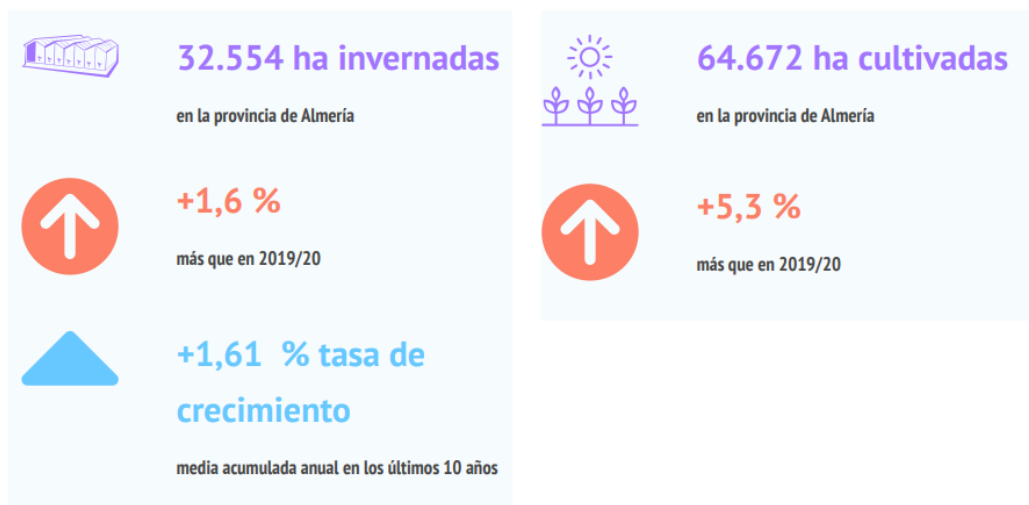
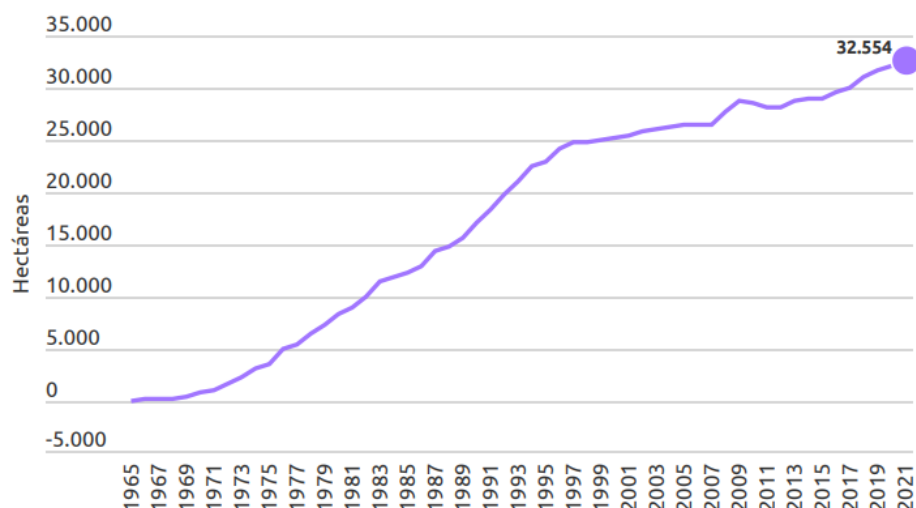


Figura 6. Hectáreas invernadas y cultivadas en la provincia de Almería [27].

El aumento de la superficie invernada se ha correspondido con un incremento de la superficie cultivada, que ha alcanzado las 64.672 hectáreas en la provincia de Almería. Esta cifra representa un  $+5,3\%$  más con respecto a la campaña anterior. Este crecimiento se debe a un aumento generalizado de la superficie destinada a las principales especies cultivadas, salvo para berenjena, tomate y pepino [27].

Es destacable el aumento de la superficie en melón y sandía, probablemente por el buen resultado económico de la producción de estas frutas en la campaña pasada. También resaltar que las hectáreas de tomate continúan descendiendo, aunque a un ritmo menor que en anteriores campañas [27].



Gráfica 1. Evolución de la superficie invernada en la provincia de Almería [27].

Tabla 2. Superficie cultivada por productos en Almería con respecto a la campaña anterior [27].

	Campaña 2019/20 (ha)	Campaña 2020/21 (ha)	Var. (%)
Berenjena	2.392	2.277	-4,8
Calabacín	7.611	8.061	5,9
Judía verde	190	219	15,3
Melón	2.852	3.205	12,4
Pepino	5.350	5.280	-1,3
Pimiento	11.995	12.310	2,6
Sandía	10.671	12.575	17,8
Tomate	8.653	8.423	-2,7
<b>Total invernadero</b>	<b>49.714</b>	<b>52.350</b>	<b>5,3</b>

La producción total de frutas y hortalizas en Almería ha sido ligeramente superior a la de la campaña anterior. En concreto se ha estimado un incremento de las toneladas producidas del +0,7% (3.747.348 toneladas) [27].

Respecto a la producción de las hortalizas cultivadas bajo plástico, esta ha sido similar al total, habiéndose calculado un ligero aumento del +0,6% (3.509.459 toneladas) [27].

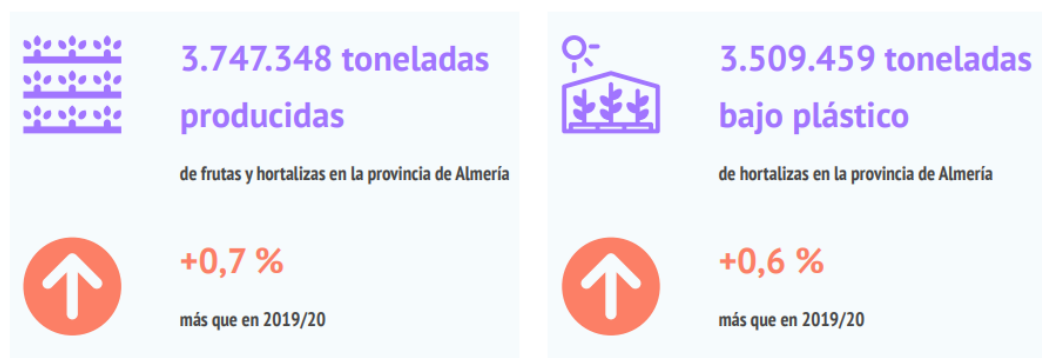


Figura 7. Toneladas de hortalizas cultivadas y producidas en invernadero en la provincia de Almería [27].

En cuanto a la producción, los productos con mayor crecimiento son la sandía, con un +17,5%, y el melón, +16,2%. Los volúmenes obtenidos son acordes con el aumento en superficie que han experimentado ambos cultivos en este periodo. Con respecto a la campaña anterior, los que han presentado un balance productivo menor son: tomate (-7,3%), berenjena (-6,1%) y pepino (-4,9%). El resto de los productos han incrementado su producción de forma más modesta [27].

Tabla 3. Producción de cultivos en Almería con respecto a la campaña anterior [27].

	<b>Campaña 2019/20 (ha)</b>	<b>Campaña 2020/21 (ha)</b>	<b>Var. (%)</b>
Berenjena	215.394	202.212	-6,1
Calabacín	482.391	489.144	1,4
Judía verde	3.452	3.842	11,3
Melón	114.209	132.734	16,2
Pepino	537.899	511.542	-4,9
Pimiento	845.727	852.493	0,8
Sandía	492.109	578.129	17,5
Tomate	797.329	739.363	-7,3
<b>Total invernadero</b>	<b>3.488.510</b>	<b>3.509.459</b>	<b>0,6</b>

El tomate siempre había sido la principal hortaliza cultivada en Almería. Sin embargo, en las últimas 5 campañas, el tomate ha disminuido su producción en un 23%. Los principales motivos de esta regresión de la producción son [27]:

- La competencia creciente en el mercado, siendo el tomate la hortaliza con mayor presión por parte de otros orígenes de producción.
- El incremento de especialidades de tomate, con menores rendimientos por hectárea.
- El incremento de los costes, especialmente el correspondiente a la mano de obra a partir de 2019.
- La disponibilidad de agua de mejor calidad procedente de desaladora en zonas de producción tradicionalmente destinadas a tomate y que ahora permite una mayor diversificación de cultivos.

- La libre elección de cultivos por parte del agricultor para optar por otras hortalizas.

Respecto a los productos que han presentado una mayor evolución positiva se encuentran el melón, el pimiento, la sandía y la lechuga; todos ellos con un incremento de la superficie destinada a su cultivo en las últimas campañas. Concretamente, el pimiento ha crecido hasta convertirse en la principal hortaliza cultivada, superando el tomate [27]. Esa es la razón por la cual se decidió elegir esta hortaliza sobre la que realizar el proyecto.

#### 4.4. Invernadero objeto de estudio

Para la realización del proyecto se ha contado con un invernadero “tipo Almería” o “raspa y amagado”. Éste se encuentra localizado en la Fundación Finca Experimental UAL-ANECOOP, ubicada en el paraje “Los Goterones” de la localidad de Retamar (Término Municipal de Almería). La extensión de la finca es de 14 hectáreas de las que actualmente están invernadas 8, con invernaderos de diferentes características.



**ANECOOP**

A21	4.400 m <sup>2</sup>	SIN SUELO - HORTÍCOLAS
A22	4.400 m <sup>2</sup>	SIN SUELO - HORTÍCOLAS
A23	4.400 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
A24	4.320 m <sup>2</sup>	SUELO ACOLCHADO - FRUTALES
A25	4.312 m <sup>2</sup>	SUELO ACOLCHADO - FRUTALES
A26	1.000 m <sup>2</sup>	SUELO ACOLCHADO - FRUTALES



**UNIVERSIDAD**

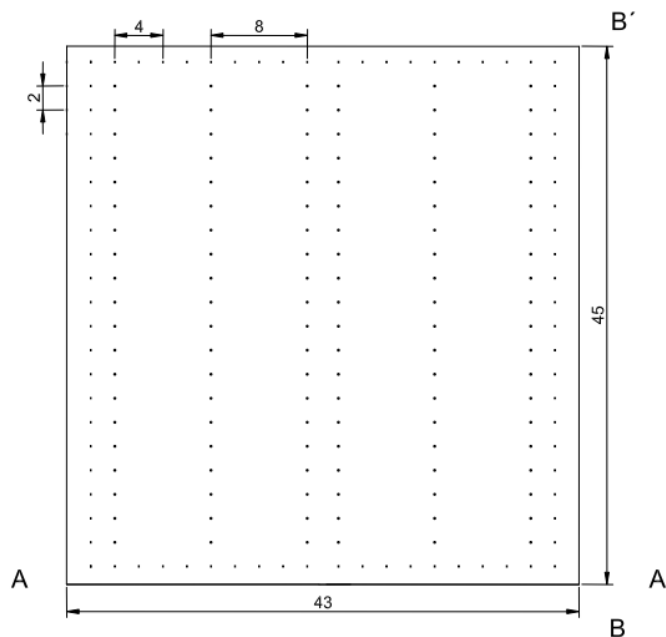
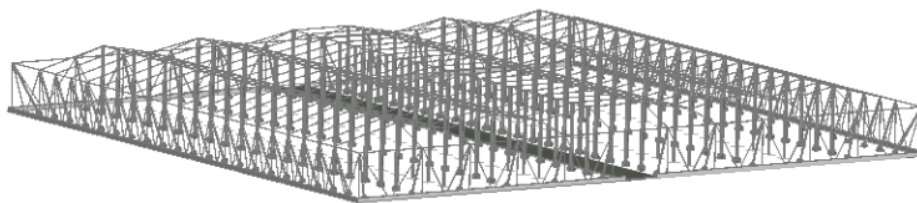
U1	1.800 m <sup>2</sup>	SIN SUELO - HORTÍCOLAS
U2	1.800 m <sup>2</sup>	SIN SUELO - HORTÍCOLAS
U3	1.800 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
U4	1.800 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
U5	1.800 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
U6	1.800 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
U7	1.917 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
U8	1.917 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
U9	1.080 m <sup>2</sup>	SIN SUELO - HORTÍCOLAS
U10	1.440 m <sup>2</sup>	MIXTO - HORTÍCOLAS
U11	1.080 m <sup>2</sup>	SIN SUELO - HORTÍCOLAS
U12	810 m <sup>2</sup>	SIN SUELO - HORTÍCOLAS
U13	1.478 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
U14	1.765 m <sup>2</sup>	SUELO - HORTÍCOLAS
U15	1.133 m <sup>2</sup>	SUELO - HORTÍCOLAS
U16	340 m <sup>2</sup>	SEMILLERO
U17	917 m <sup>2</sup>	SUELO - HORTÍCOLAS
U19	1.024 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
UP	480 m <sup>2</sup>	MESAS DE CULTIVO
Uo	480 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - HORTÍCOLAS
Uu	480 m <sup>2</sup>	SUELO ARENADO - FRUTALES
Ui	480 m <sup>2</sup>	MESAS DE CULTIVO



- SERVICIOS CENTRALES
- ASEOS
- INGENIERÍA RURAL
- CABEZALES DE RIEGO

Figura 8. Panorámica y distribución en planta de la Finca Experimental UAL-ANECOOP [28].

El invernadero utilizado es el módulo U8, orientado noroeste-sureste, con una superficie de 2115 m<sup>2</sup>, construido por 5 raspas de 8,6 metros por 45 metros de largo. Como hemos dicho, su estructura es “raspa y amagado” y sus dimensiones y distribución quedan detalladas en la Figura 9 que representan una vista en perspectiva, planta, alzado y perfil del invernadero [23].



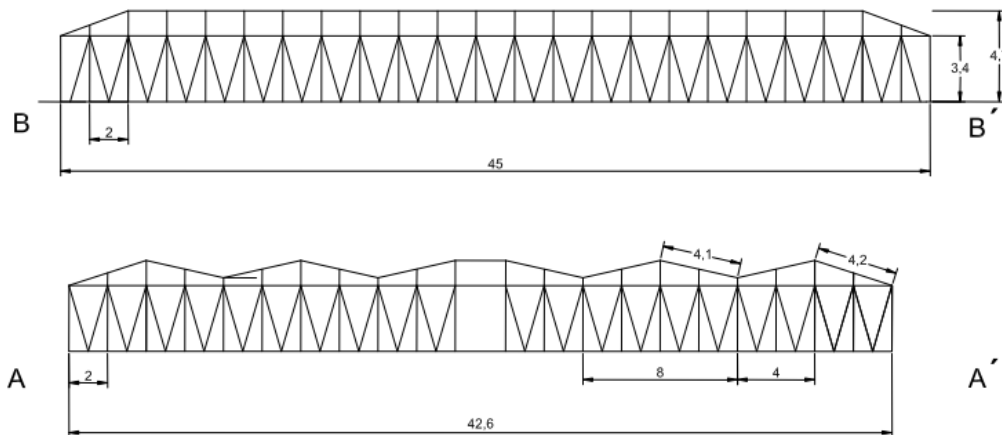


Figura 9. Perspectiva, planta, perfil y alzado del invernadero. Todas las cotas en metros. (Sin escala) [23].

Como referencia se va a tomar el siguiente consumo eléctrico demandado por parte del invernadero, el cual se encuentra en torno a los 30.000 kWh anuales, según el IDAE [29]. Para obtener este valor, se ha partido de un consumo definido por los siguientes equipos:

- 20 motores de 0,4 kW cada uno → Potencia total igual a 8 kW
- 5 ventiladores de 0,25 kW cada uno → Potencia total igual a 1,25 kW
- 1 ordenador de 0,07 kW → Potencia total igual a 0,07 kW

Para los meses de verano (junio – septiembre), se ha considerado que los equipos de ventilación funcionan durante 10 horas al día, todos los días del mes. Sin embargo, durante el resto de los meses del año (octubre – mayo), estos equipos funcionan durante 8 horas al día, todos los días del mes. Por otro lado, el equipo de control (ordenador) se considera que funcionará las 24 horas del día los 365 días del año.

Tabla 4. Consumo eléctrico demandando durante los meses de verano en función de las horas y días que están los equipos en funcionamiento. Elaboración propia.

**JUNIO - SEPTIEMBRE**

	Componentes	Potencia total (kW)	Horas al día de funcionamiento	Días en funcionamiento	Consumo (kWh)
<b>Ventilación</b>	20 motores (0,4 kW)	8	10	30	2400
	5 ventiladores (0,25 kW)	1,25	10	30	375
<b>Control</b>	1 PC	0,07	24	30	50,4
<b>CONSUMO TOTAL</b>					<b>2825,4</b>

**JULIO - AGOSTO**

	Componentes	Potencia total (kW)	Horas al día de funcionamiento	Días en funcionamiento	Consumo (kWh)
<b>Ventilación</b>	20 motores (0,4 kW)	8	10	31	2480
	5 ventiladores (0,25 kW)	1,25	10	31	387,5
<b>Control</b>	1 PC	0,07	24	31	52,08
<b>CONSUMO TOTAL</b>					<b>2919,58</b>

Tabla 5. Consumo eléctrico demandado durante el resto de los meses del año en función de las horas y días que están los equipos en funcionamiento. Elaboración propia.

**ENERO - MARZO - MAYO - OCTUBRE - DICIEMBRE**

	Componentes	Potencia total (kW)	Horas al día de funcionamiento	Días en funcionamiento	Consumo (kWh)
<b>Ventilación</b>	20 motores (0,4 kW)	8	8	31	1984
	5 ventiladores (0,25 kW)	1,25	8	31	310
<b>Control</b>	1 PC	0,07	24	31	52,08
<b>CONSUMO TOTAL</b>					<b>2346,08</b>

**FEBRERO**

	Componentes	Potencia total (kW)	Horas al día de funcionamiento	Días en funcionamiento	Consumo (kWh)
<b>Ventilación</b>	20 motores (0,4 kW)	8	8	28	1792
	5 ventiladores (0,25 kW)	1,25	8	28	280
<b>Control</b>	1 PC	0,07	24	28	47,04
<b>CONSUMO TOTAL</b>					<b>2119,04</b>

**ABRIL - NOVIEMBRE**

	Componentes	Potencia total (kW)	Horas al día de funcionamiento	Días en funcionamiento	Consumo (kWh)
<b>Ventilación</b>	20 motores (0,4 kW)	8	8	30	1920
	5 ventiladores (0,25 kW)	1,25	8	30	300
<b>Control</b>	1 PC	0,07	24	30	50,4
<b>CONSUMO TOTAL</b>					<b>2270,4</b>

Por lo tanto,

$$\text{Consumo total} = 2 \cdot 2825,4 + 2 \cdot 2919,58 + 5 \cdot 2346,08 + 2119,04 + 2 \cdot 2270,4$$

$\text{Consumo total} = 29.880,2 \frac{kWh}{\text{año}}$
--



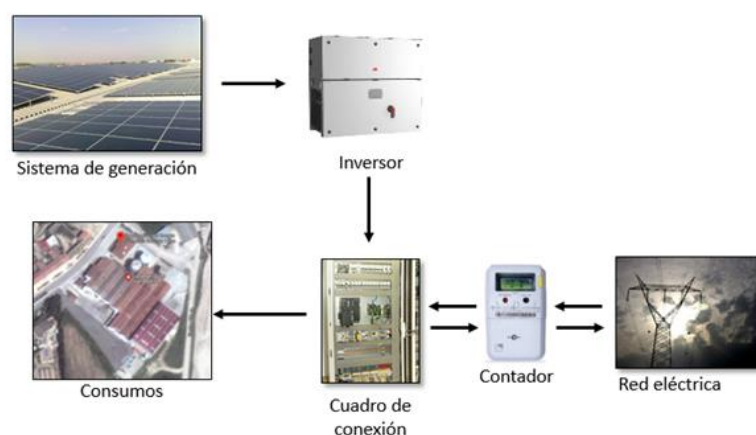
## 5. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN AGROVOLTAICA

La instalación agrovoltaica se ha diseñado con módulos bifaciales de última tecnología de Silicio policristalino, con una potencia de 535 Wp por cada uno de ellos. La configuración final está conformada por un total de 26 módulos en el campo solar. Asimismo, se ha previsto utilizar 1 inversor solar, con una potencia nominal de 12 kW, de manera que la instalación tiene una potencia pico de 13,91 kWp y una potencia nominal de total de 12 kW. Aprovechando la disposición del invernadero, los módulos estarán orientados a 13° de inclinación y 27° de ángulo azimut, montados sobre estructura coplanar. Este sistema permite aprovechar la orientación e inclinación de la propia pendiente de la cubierta, de manera que los paneles fotovoltaicos se instalan paralelamente a la superficie de la vertiente utilizada. La sobrecarga aplicada sobre la cubierta es mínima, teniendo que considerar únicamente el peso propio de la estructura y el módulo. La descripción detallada de los equipos eléctricos se encuentra en los Anexos 5, 6 y 7. La implantación definitiva se muestra en el plano incluido en el Anexo 4.

Los principales sistemas que integran el sistema fotovoltaico son los siguientes:

- Generador: compuesto por módulos fotovoltaicos, elementos de soporte y fijación de los módulos, elementos de interconexión entre módulos, etc.
- Adaptador de energía: compuesto por el inversor, cuadro de corriente continua, cableado, etc.
- Conexión a red: compuesto por cuadro de medida e interruptores, sistemas de protección, cableado de interconexión, etc.
- Monitorización: compuesto por sensores, sistemas de adquisición de datos, etc.
- Obra civil: accesos a la cubierta donde están colocados los módulos fotovoltaicos.

Una instalación fotovoltaica de conexión a red interior responde al esquema de la Figura 10. El generador fotovoltaico está formado por una serie de módulos del mismo modelo conectados eléctricamente entre sí, que se encargan de transformar la energía del Sol en energía eléctrica, generando una corriente continua proporcional a la irradiancia solar que incide sobre ellos.



*Figura 10. Esquema básico de una instalación de autoconsumo fotovoltaico conectada a red.  
Elaboración propia.*

Sin embargo, no es posible inyectar directamente la energía del generador fotovoltaico en la red eléctrica precisando ser transformada en corriente alterna para acoplarse a la misma.

Esta corriente se conduce al inversor que, utilizando tecnología de electrónica de potencia, la convierte en corriente alterna a la misma frecuencia y tensión que la red eléctrica y, de este modo, queda disponible para cualquier usuario. La energía generada se inyectará a la red interior tal y como marca el Real Decreto 244/2019, de 5 de abril y el Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre.

Cada una de las filas de módulos se llevará al inversor, que tendrá integrado los elementos de protección de la parte de corriente continua de la instalación. Estos elementos consistirán en un interruptor seccionador de corriente continua y los fusibles de cada una de las cadenas que forman el campo fotovoltaico. La salida del inversor se conectará con la caja de protecciones de corriente alterna para finalmente conectarse al cuadro general de protección.

Las protecciones del sistema deben ir conforme al Real Decreto 244/2019 y a las normas particulares de la empresa distribuidora en cuestión.

El cableado y los elementos de protección deben ser conformes al Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (e Instrucciones Complementarias) y a las Normas Particulares de la Compañía Distribuidora.

En la siguiente tabla se recoge el resumen para la presente instalación (Tabla 6):

*Tabla 6. Datos de la instalación fotovoltaica*

Instalación fotovoltaica de autoconsumo de 13,91 kWp para un invernadero con tecnología agrovoltaica	
Nº de módulos	26
Potencia pico instalada	13,91 kWp
Nº de inversores	1
Configuración	2 cadenas de 13 módulos en serie

### **5.1. Dimensionado del generador fotovoltaico de 13,91 kWp**

Esta parte de la instalación está diseñada con 26 módulos bifaciales de última tecnología de Silicio monocristalino modelo JAM72D30-535/MB de la marca JA Solar, con una potencia pico nominal de 535 Wp por cada uno de ellos. Se ha previsto utilizar un inversor solar de 12 kW de la marca Huawei para gestionar la generación en la cubierta del invernadero. Dichos equipos cumplen con la normativa exigida y presentan los certificados de conformidad requeridos por el mercado europeo.

La potencia del inversor debe ajustarse a la potencia del módulo. No obstante, los datos de potencia de los módulos (Wp) se refieren a las Condiciones Estándar de Medida (STC: 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C, AM = 1,5), estas son condiciones de laboratorio. En este caso se elige un inversor para que la potencia nominal del invernadero quede limitada a 12 kW, ya que en determinadas condiciones de irradiancia y temperatura el conjunto de módulos podría generar una potencia superior.

Tabla 7. Características técnicas del módulo fotovoltaico JAM72D30-535/MB

Características del módulo fotovoltaico JAM72D30-535/MB	
Potencia	535 Wp
Tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ )	49,78 V
Tensión punto de máxima potencia ( $V_{mpp}$ )	41,77 V
Corriente punto de máxima potencia ( $I_{mpp}$ )	12,69 A
Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ )	13,45 A
Longitud	2285 mm
Anchura	1136 mm
Coef. temp. tensión de circuito abierto ( $T_k(V_{oc})$ )	- 0,275 %/°C
Coef. temp. corriente de cortocircuito ( $T_k(I_{sc})$ )	+ 0,045 %/°C
Coef. temperatura de potencia ( $T_k(P_n)$ )	- 0,35 %/°C

Tabla 8. Características técnicas del inversor Huawei SUN2000-12KTL-M2

Características del inversor HUAWEI SUN2000-12KTL-M2	
Potencia de salida nominal (AC)	12 kW
Potencia máxima de salida (AC)	13,2 kVA
Tensión, Frecuencia nominal	3 x 400 V, 50 Hz
Distorsión armónica	$\leq 3\%$ (THD)
Máximo rendimiento del inversor	> 98 %
Min. Tensión MPP	160 Vdc
Máx. Tensión MPP	950 Vdc
Máxima tensión del sistema	1080 Vdc
Máxima corriente (AC)	20 A
Máxima corriente (DC)	30 A
Máxima corriente de entrada por MPPT	22 A

Los módulos se conectarán mediante 2 ramas en paralelo de 13 módulos en serie. El número de los módulos solares en serie debe elegirse de modo que la tensión de entrada no supere en ningún caso el rango de tensión de entrada del inversor, pues de lo contrario el inversor puede colapsarse. Teniendo en cuenta los coeficientes de temperatura,  $T_k(V_{MPP})$ ,  $T_k(V_{oc})$  y  $T_k(I_{sc})$ , deben de cumplirse una serie de condiciones:

- A) Los dos valores extremos del voltaje MPP (punto de máxima potencia) se deben de ajustar al rango de tensión MPP del inversor.

El máximo voltaje MPP de los módulos solares se da a  $-10^{\circ}\text{C}$ , porque en las células cristalinas la tensión crece al bajar la temperatura. Este valor debe de estar por debajo del límite superior de tensión MPP del inversor tanto para el primario como para el secundario:  $V_{MPP\_max,inv} = 950 \text{ V}_{dc}$

$$V(-10^{\circ}\text{C})_{MPP} = N_{max,mod,serie} \cdot [V_{MPP,max} \cdot (1 + T_k(V_{MPP}) \cdot (T_{min} - T_{STC}))] \quad (1)$$

$$V(-10^{\circ}\text{C})_{MPP} = 13 \cdot [41,77 \text{ V} \cdot (1 + (-0,0035) \cdot (-10^{\circ} - 25^{\circ}))] = 609,53 \text{ V} < 950 \text{ V}_{dc} \quad (2)$$

El mínimo voltaje MPP se registra a aproximadamente a  $70^{\circ}\text{C}$ , en verano con los módulos calientes. Este mínimo voltaje MPP de los módulos a  $70^{\circ}\text{C}$  debe estar por encima del límite inferior de tensión MPP del inversor:  $V_{MPP\_min,inv} = 160 \text{ V}_{dc}$

$$V(70^{\circ}\text{C})_{MPP} = N_{min,mod,serie} \cdot [V_{MPP,max} \cdot (1 + T_k(V_{OC}) \cdot (T_{max} - T_{STC}))] \quad (3)$$

$$V(70^{\circ}\text{C})_{MPP} = 13 \cdot [41,77 \text{ V} \cdot (1 + (-0,00275) \cdot (70^{\circ} - 25^{\circ}))] = 475,81 \text{ V} > 160 \text{ V}_{dc} \quad (4)$$

Por lo tanto, la tensión MPP a la entrada del inversor se encuentra dentro del rango de tensión MPP del equipo para la configuración de módulos considerada.

- B) La tensión de circuito abierto  $V_{OC}$  en condiciones extremas de temperatura (a  $-10^{\circ}\text{C}$ ) debe de estar por debajo de la máxima tensión admisible del inversor:  $V_{max,inv} = 950 \text{ V}_{dc}$ .

$$V(-10^{\circ}\text{C})_{OC} = N_{max,mod,serie} \cdot [V_{OC,mod} \cdot (1 + T_k(V_{OC}) \cdot (T_{min} - T_{STC}))] \quad (5)$$

$$V(-10^{\circ}\text{C})_{OC} = 13 \cdot [49,78 \text{ V} \cdot (1 + (-0,00275) \cdot (-10^{\circ} - 25^{\circ}))] = 709,43 \text{ V} < 950 \text{ V}_{dc} \quad (6)$$

Por lo tanto, la condición de tensión de circuito abierto también se satisface.

- C) Teniendo en cuenta que se conectarán una cadena a cada MPPT, la corriente máxima de cortocircuito a  $70^{\circ}\text{C}$  que llegará al inversor debe ser inferior a la corriente máxima de entrada al equipo:  $I_{CCmax} = 30 \text{ A}$ .

$$I(70^{\circ}\text{C})_{CC,mod} = N_{max,mod,MPPT} \cdot [I_{CC,mod} \cdot (1 + T_k(I_{CC}) \cdot (T_{max} - T_{STC}))] \quad (7)$$

$$I(70^{\circ}\text{C})_{CC,mod} = 2 \cdot [13,45 \text{ A} \cdot (1 + (0,00045) \cdot (70^{\circ} - 25^{\circ}))] = 27,44 < 30 \text{ A} \quad (8)$$

La condición de corriente de cortocircuito se cumple. En consecuencia, podemos afirmar que el inversor elegido cumple con las especificaciones requeridas.

## 5.2. Características técnicas de los equipos utilizados

En este apartado se van a explicar brevemente cada uno de los equipos principales utilizados en la instalación agrovoltaica. En los Anexos 5, 6 y 7 pueden consultarse las fichas técnicas de cada uno de ellos.

### 5.2.1. Inversor de conexión a red

Se utilizará un modelo de inversor de la marca Huawei tal y como se ha comentado anteriormente: Huawei SUN2000-12KTL-M2.

El inversor es el elemento de la instalación encargado de transformar la corriente continua entregada por el generador solar en corriente alterna. La potencia nominal de los inversores es adecuada a la potencia pico del generador fotovoltaico.

Se trata de un inversor de potencia con salida trifásica para operación en paralelo con conexión a red, 3x400V, 50 Hz. Dispone de un sistema avanzado de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y un alto rendimiento energético, mayor de 98%; panel de control integrado para visualización de estados de operación y valores actuales; interfaces RS 485 o fibra óptica, etc.

El modelo que se va a instalar dispone internamente de las protecciones siguientes [30]:

- Interruptor de interconexión interno para la desconexión automática según RD 661/2000.
- Protección interna de máxima y mínima tensión según RD 661/2007.
- Protección interna de máxima y mínima frecuencia según RD 661/2007.
- Relé de bloqueo de protecciones. Este relé es activado por las protecciones de máxima y mínima tensión y máxima y mínima frecuencia según RD 661/2007.
- Un transformador, que asegura una separación galvánica entre el lado de corriente continua y la red.
- Incluye protección contra funcionamiento en isla con desconexión automática.
- Incorpora internamente un vigilante de aislamiento de la parte de corriente continua que actúa en caso de detectar una derivación a tierra.

### 5.2.2. Módulos fotovoltaicos

La presente instalación consta de un total de 26 módulos fotovoltaicos. El modelo elegido para esta instalación es el JAM72D30-535/MB, módulo bifacial, con una potencia de 535 Wp, de la marca JA Solar.

La tecnología de módulos bifaciales está recibiendo un creciente interés en el mercado. Aunque las células bifaciales se han investigado desde la década de 1980, el proceso de fabricación en masa era muy complejo en ese momento. Sin embargo, con los avances recientes en los procesos industriales, ha sido posible reducir el coste de producción de esta tecnología hasta el punto en que los módulos bifaciales están disponibles casi al mismo precio por Wp que los módulos monofaciales convencionales. Así, se espera que esta tecnología sea responsable de aproximadamente el 70% de la cuota de mercado de los módulos fotovoltaicos para 2030 [31].

Los módulos bifaciales pueden ofrecer ganancias de generación de energía de hasta un 25% en comparación con los módulos convencionales (monofacial), ya que pueden generar energía desde ambos lados de la celda, frontal y posterior, al recolectar la luz que incide directamente en la cara frontal, así como la luz reflejada por el suelo. Por lo tanto, el rendimiento de los módulos bifaciales en un sistema fotovoltaico depende no solo de la irradiancia incidente en la superficie frontal, sino también de la irradiancia incidente en la superficie posterior de los módulos. Este último depende en

gran medida de las condiciones específicas del sitio, como el albedo, las estructuras del sistema, la altura y el ángulo de inclinación de los módulos, entre otros [31].

En la Figura 11 se muestra una representación del funcionamiento de un módulo bifacial.

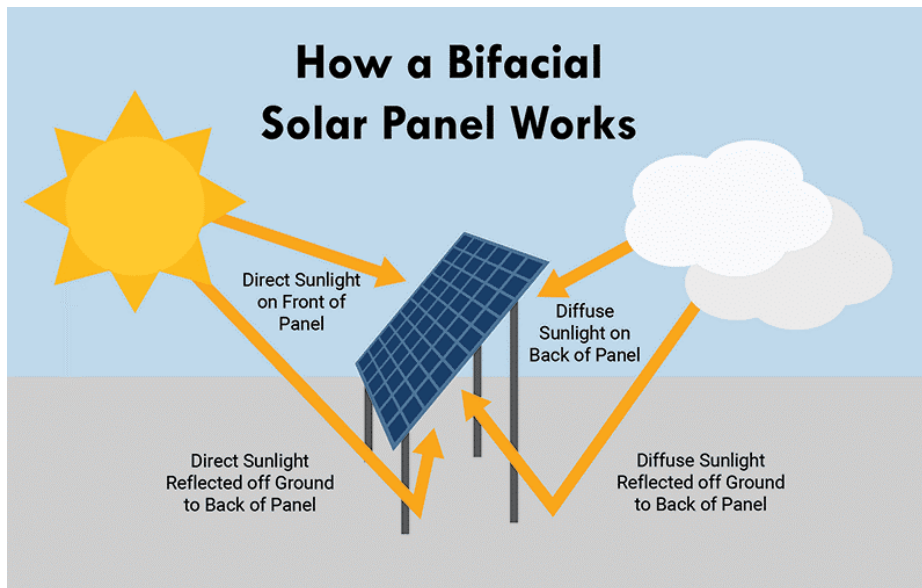


Figura 11. Captación de la irradiancia solar de un módulo bifacial por ambos lados del panel [32].

### 5.2.3. Estructura de soporte

Para la sujeción de las placas a cubierta se va a utilizar el sistema coplanar básico. Este sistema permite aprovechar la orientación e inclinación de la propia pendiente de la cubierta, de manera que los paneles fotovoltaicos se instalan paralelamente a la superficie de la vertiente utilizada. La sobrecarga aplicada sobre la cubierta es mínima, teniendo que considerar únicamente el peso propio de la estructura y el módulo.

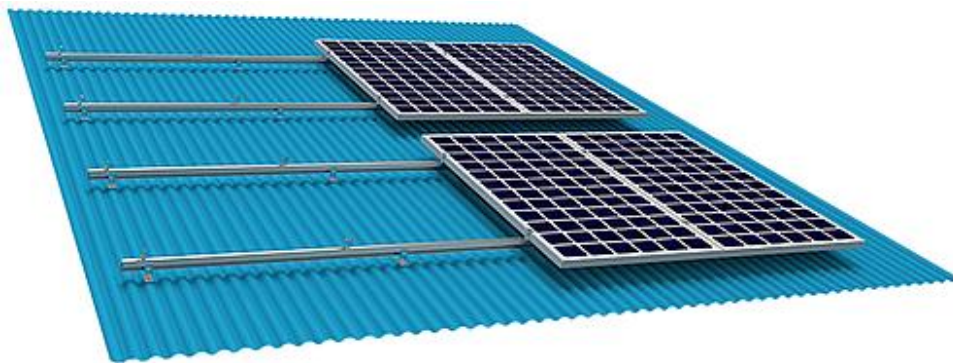


Figura 12. Instalación de paneles fotovoltaicos con estructura coplanar [33].

Este sistema utiliza cuatro perfiles ranurados de aluminio para sujetar dos filas de módulos. Los módulos se anclan a los perfiles mediante piezas de fijación centrales y laterales y suelen montarse perpendicularmente, pero también es posible la disposición horizontal.

La estanqueidad está asegurada a través de juntas EPDM. El EPDM (Ethylene Propylene Diene Methylene) es un tipo de elastómero con muy buenas propiedades

frente al paso del agua y a los agentes atmosféricos, con muy alta elasticidad y resistencia, lo que lo convierte en un material muy indicado para la impermeabilización de todo tipo de superficies [34]. Los cauchos EPM y EPDM son los cauchos sintéticos de más baja densidad (1 – 1,3 g/cm<sup>3</sup>) [35].

## 6. ANÁLISIS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DE LA INSTALACIÓN AGROVOLTAICA

Confrontando la producción solar con el consumo del invernadero, la energía generada por la instalación fotovoltaica que se autoconsumiría en el propio invernadero representaría el 99,17% para la potencia instalada. Este autoconsumo supondría el 74,80% del consumo total de la empresa, lo que significa que esta energía dejaría de adquirirse a la compañía comercializadora de electricidad.

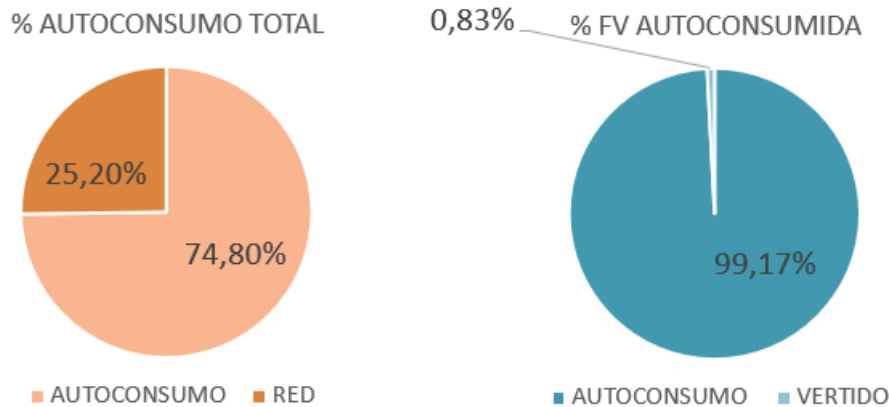


Figura 13. Porcentajes de cobertura de demanda con energía fotovoltaica (naranja) y de autoconsumo de la energía eléctrica generada en el campo fotovoltaico (azul). Elaboración propia.

La estimación de la energía inyectada se ha realizado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_p = \frac{(G_{d,m}(\alpha, \beta) \cdot P_{mp}^* \cdot PR)}{G_{CEM}}$$

Donde:

- $G_{d,m}(\alpha, \beta)$  es el valor medio mensual y anual de la irradiación diaria sobre el plano generador en kWh/(m<sup>2</sup>·día)
- $P_{mp}^*$  es la potencia pico del generador
- $PR$  es el rendimiento energético de la instalación (*Performance Ratio*)
- $G_{CEM}$  es la irradiación en Condiciones Standard de Medida (1 kW/m<sup>2</sup>)

Las Condiciones Standard de Medida son una irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, una distribución espectral AM de 1,5 y una temperatura de las células de 25°C.

La potencia nominal de la instalación es de 12 kW y la potencia pico total de nuestra instalación es de 13,91 kWp. Por tanto, la producción anual estimada de esta instalación será de 22,51 MWh/año.



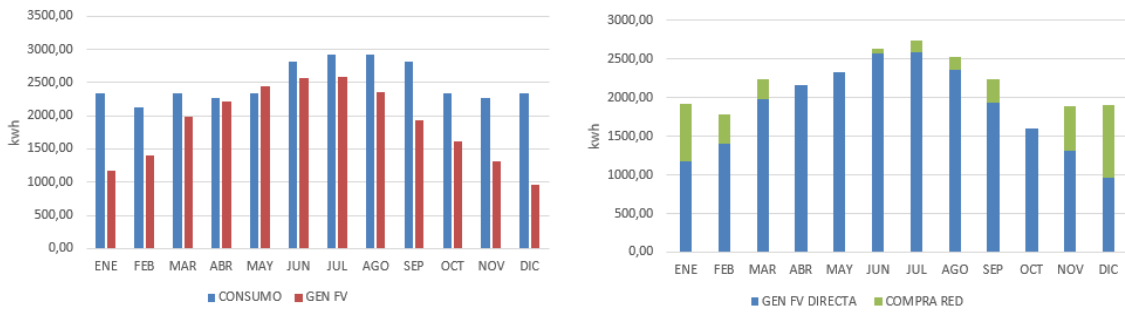


Figura 14. Comparativa mensual de consumos y generación renovable. Elaboración propia.

Un análisis de la generación y el consumo por periodos de tarificación muestra que la instalación fotovoltaica suministrará energía durante todos los periodos de tarificación, incluidos aquellos en los que el coste del kWh es más elevado (P1 y P2), maximizando así el ahorro económico que se obtiene con la instalación de autoconsumo. Si además el invernadero es capaz de adaptar su consumo a las horas con mayor radiación solar, el ahorro económico podría ser incluso ligeramente mayor al obtenido con los datos extraídos del escenario actual.

Tabla 9. Resultados de generación fotovoltaica, consumo eléctrico demandado por el invernadero, cantidad de energía comprada y vertida a la red, y generación fotovoltaica autoconsumida mes a mes.

	GEN FV (kWh)	CONSUMO (kWh)	COMPRA RED (kWh)	GEN FV DIR (kWh)	GEN FV RED (kWh)
ENERO	1171,29	2346,08	742,54	1171,29	0,00
FEBRERO	1407,04	2119,04	374,87	1407,04	0,00
MARZO	1979,37	2346,08	260,50	1979,37	0,00
ABRIL	2219,76	2270,40	0,00	2156,17	63,59
MAYO	2443,49	2346,08	0,00	2319,99	123,50
JUNIO	2572,03	2825,40	62,09	2572,03	0,00
JULIO	2583,61	2919,58	149,62	2583,61	0,00
AGOSTO	2361,12	2919,58	156,21	2361,12	0,00
SEPTIEMBRE	1927,06	2825,40	305,72	1927,06	0,00
OCTUBRE	1606,30	2346,08	0,00	1606,30	0,00
NOVIEMBRE	1308,48	2270,40	578,16	1308,48	0,00
DICIEMBRE	957,97	2346,08	941,70	957,97	0,00
<b>TOTAL</b>	<b>22537,52</b>	<b>29880,20</b>	<b>3571,40</b>	<b>22350,43</b>	<b>187,09</b>

Todos estos datos de generación fotovoltaica se han obtenido a partir de la simulación realizada con la herramienta PVSyst (ver Anexo 1) y están recogidos en el Anexo 8, así como los resultados obtenidos correspondientes al ahorro económico.

## **6.1. Rendimiento del sistema**

La transformación de la energía solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico se realiza con una eficiencia representada por el parámetro conocido como *Performance Ratio* (PR). El *Performance Ratio* presentado en este proyecto se determina para el primer año de producción e incluye las pérdidas de energía en baja tensión (BT) hasta el punto de conexión, no incluyendo la falta de disponibilidad de la planta ni su autoconsumo, así como tampoco la degradación de los paneles ni demás componentes electromecánicos.

El PR engloba una serie de pérdidas de energía, algunas de las cuales dependen del diseño de la instalación y los equipos que la forman, y otras están directamente relacionadas con las condiciones meteorológicas instantáneas del emplazamiento. Para calcular el rendimiento energético de la instalación (PR), se tiene en cuenta las siguientes pérdidas separadas:

- Las pérdidas por posición del generador y sombreado.
- Pérdidas IAM.
- Pérdidas por polvo o suciedad de los módulos.
- La dependencia de la eficiencia de los módulos fotovoltaicos con la temperatura.
- Pérdidas de mismatch o acoplamiento.
- Las pérdidas óhmicas en el cableado CC y CA.
- La eficiencia energética del inversor.
- Pérdidas respecto a la potencia nominal.
- Las pérdidas por errores en el seguimiento del punto de máxima potencia.

Cada una de estas pérdidas se definen en el Anexo 2: Rendimiento del sistema – análisis de pérdidas (ver también Anexo 1).

La composición de todas estas pérdidas separadas determina el rendimiento global de la instalación fotovoltaica (PR). En esta instalación se ha obtenido un PR de 81,64%.

## **6.2. Análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> y contaminantes gaseosos que dejan de emitirse a la atmósfera.**

La energía solar fotovoltaica contribuye a la disminución de agentes contaminantes atmosféricos y emisiones de dióxido de carbono. La reducción de estas especies químicas en la atmósfera permite la disminución de los principales problemas asociados a la contaminación atmosférica, como son el efecto invernadero (CO<sub>2</sub>), la lluvia ácida (SO<sub>2</sub>) y el smog fotoquímico (NO<sub>x</sub>). La Tabla 10 recoge las emisiones específicas características de estos compuestos según el mix de generación de energía eléctrica que se tiene actualmente en España.

Tabla 10. Emisiones específicas asociadas a la generación eléctrica [36].

<b>Emisiones específicas según mix energético nacional (2019)</b>	
CO <sub>2</sub> (kg/kWh)	0,246
SO <sub>2</sub> (kg/kWh)	0,353
NO <sub>x</sub> (g/kWh)	0,499

A continuación, se muestra la estimación de emisiones evitadas a la atmósfera por la instalación de 13,91 kWp, objeto de este proyecto:

Tabla 11. Emisiones evitadas a la atmósfera por la instalación fotovoltaica mes a mes.

	<b>EMISIONES CO<sub>2</sub> (t/mes)</b>	<b>EMISIONES SO<sub>2</sub> (kg/mes)</b>	<b>EMISIONES NO<sub>x</sub> (kg/mes)</b>
ENERO	0,29	0,41	0,58
FEBRERO	0,35	0,50	0,70
MARZO	0,49	0,70	0,99
ABRIL	0,55	0,78	1,11
MAYO	0,60	0,86	1,22
JUNIO	0,63	0,91	1,28
JULIO	0,64	0,91	1,29
AGOSTO	0,58	0,83	1,18
SEPTIEMBRE	0,47	0,68	0,96
OCTUBRE	0,40	0,57	0,80
NOVIEMBRE	0,32	0,46	0,65
DICIEMBRE	0,24	0,34	0,48
<b>TOTAL</b>	<b>5,54</b>	<b>7,96</b>	<b>11,25</b>

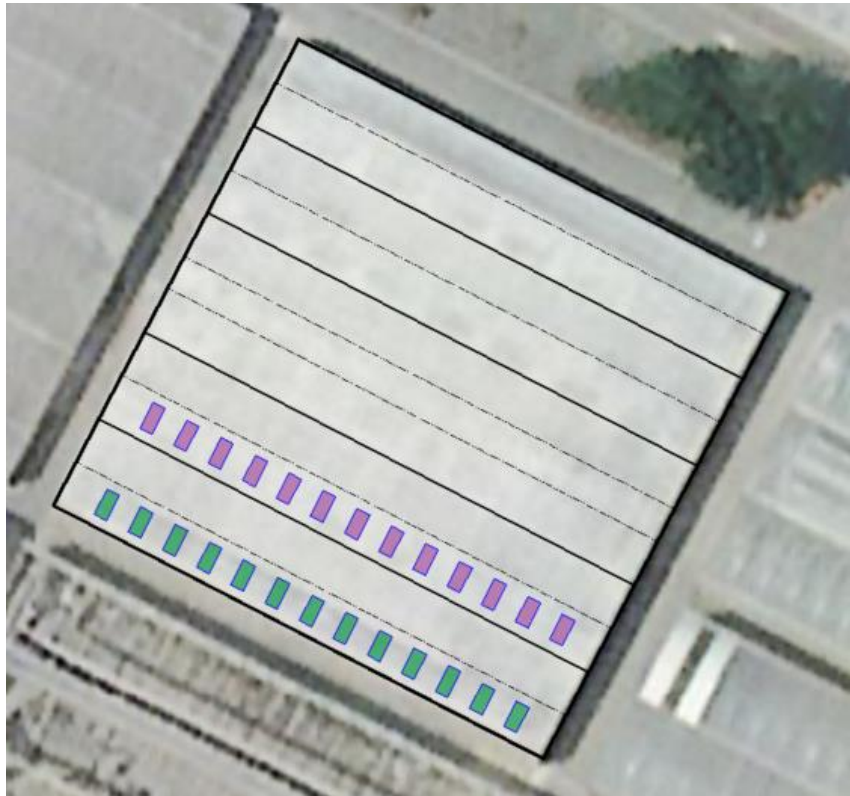
## **7. ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DEL CULTIVO CON LA TECNOLOGÍA AGROVOLTAICA**

En este apartado se van a evaluar las condiciones climáticas dentro del invernadero en el que se han instalado módulos fotovoltaicos en la cubierta, describiendo la radiación solar y la variabilidad de la temperatura que se produce en el interior, así como la afección a la producción del cultivo bajo las zonas sombreadas por la instalación de paneles fotovoltaicos. Para ello, se han consultado diferentes estudios en los que se cubría el 50% de la cubierta del invernadero y se analizaban sus efectos sobre estos parámetros.

El principal reto que plantea esta tecnología agrovoltaica es conciliar la producción de energía y alimentos en un mismo terreno, con el objetivo de optimizar la productividad económica de este sistema mixto. Este aspecto está estrictamente relacionado con el posicionamiento del conjunto fotovoltaico en la cubierta del invernadero y se vuelve más crítico a medida que se aumenta la superficie ocupada. De hecho, reemplazar toda la cubierta con paneles fotovoltaicos conduce a un sombreado interno que afecta al crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos.

En estudios previos, se ha comprobado que los módulos solares que cubren una superficie de la cubierta del invernadero inferior al 20%, no se detectaron efectos significativos en la producción y rendimiento del cultivo [37]. Sin embargo, la mayoría de los invernaderos fotovoltaicos que se han construido hasta hoy se ha cubierto en torno al 50% del área de la cubierta con paneles solares, sin considerar adecuadamente las necesidades de luz solar de los cultivos. Además, actualmente resulta complicado encontrar en la literatura una caracterización del microclima dentro de los invernaderos fotovoltaicos con altos niveles de sombra, lo que dificulta al agricultor a identificar cuáles son los cultivos más rentables. Por esta razón, el estudio de las condiciones climáticas del invernadero es crucial para elegir la mejor combinación de paneles solares y cultivos, con el fin de optimizar tanto la energía como la producción de cultivos.

De los 1974 m<sup>2</sup> que tiene de cubierta el invernadero, se han ocupado 67,5 m<sup>2</sup> con paneles fotovoltaicos bifaciales, lo que supone un 3,42% de la superficie disponible. Tal y como puede verse en la implantación (ver Anexo 4), se han utilizado las caras de la cubierta que están orientadas al suroeste, concretamente las filas 1 y 2, colocando los módulos con un ángulo azimut de 27°.



*Figura 15. Distribución paneles fotovoltaicos sobre la cubierta del invernadero. Elaboración propia.*

En un estudio que se llevó a cabo en la Universidad de Sassari (Italia), se demostró que en invernaderos en los que la cobertura fotovoltaica era del 50%, la reducción de la radiación solar que se producía era del 64% anual, llegando a alcanzar el 82% en las áreas que estaban cubiertas por los paneles fotovoltaicos. Además, el “efecto invernadero” se ve también reducido por la limitada radiación solar que penetra, provocando que las temperaturas en invierno estén por debajo del umbral mínimo y cause problemas a la hora del proceso de maduración del fruto [37].

En la Figura 16 puede apreciarse como la radiación solar que recibieron las zonas ubicadas bajo el techo de plástico fue aproximadamente tres veces mayor que las zonas ubicadas bajo los paneles fotovoltaicos. La reducción media anual bajo el techo de plástico y bajo el techo fotovoltaico fue respectivamente del 46% y el 82% con respecto a la entrada de radiación solar sin sistema fotovoltaico.

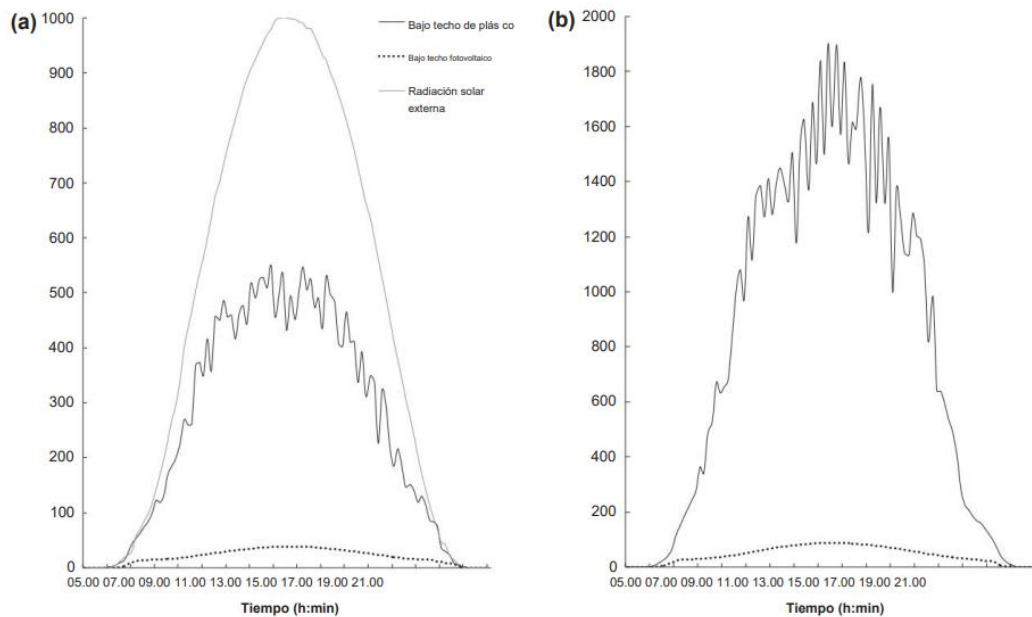


Figura 16. Distribución de radiación global (a) y PPFD (densidad de flujo de fotones fotosintéticos) (b) para un día despejado medida bajo la cubierta fotovoltaica, la cubierta de plástico y en el exterior, suponiendo una superficie ocupada por paneles fotovoltaicos del 50% [37].

El término PPFD (densidad de flujo de fotones fotosintéticos) mide el número de fotones fotosintéticamente activos que recaen sobre una superficie determinada cada segundo [38].

La entrada de energía solar reducida sugiere que el conjunto fotovoltaico llevó a cabo un efecto de enfriamiento en el ambiente interno. Este impacto de reducción de temperatura por los paneles fotovoltaicos puede resultar beneficioso durante los meses de verano para reducir la carga de refrigeración dentro del invernadero. Sin embargo, podría tener un efecto negativo durante el invierno, aumentando el consumo de energía para calefacción y provocando una disminución en el rendimiento y la calidad de la producción ya que pueden ralentizarse algunos procesos fisiológicos y de desarrollo [37].

La ventaja de los invernaderos con el 50% del área del techo cubierta con módulos fotovoltaicos se relaciona principalmente con la enorme cantidad de electricidad fotovoltaica producida. Algunos estudios demostraron que los ingresos derivados de la producción de energía son considerablemente superiores a los derivados de los cultivos, cuyos rendimientos se ven penalizados por las sombras que producen los módulos. Una disminución de la energía fotovoltaica instalada sobre el techo del invernadero podría ser una respuesta rápida a la mejora del rendimiento y calidad de los cultivos, aunque se debe buscar un equilibrio para no comprometer el tiempo de recuperación de la inversión de la instalación. De hecho, se recomienda que la superficie cubierta por paneles solares en los invernaderos fotovoltaicos oscile entre el 8,9% y el 12,9%, para de esta manera obtener unos rendimientos similares a los de los invernaderos convencionales [37].

En este caso, al cubrir exclusivamente un 3,42% de la cubierta del invernadero con paneles fotovoltaicos, utilizar paneles bifaciales y dejar una separación de 2 metros

entre módulo y módulo, se espera que el rendimiento de la producción y la calidad del cultivo no se vean afectadas considerablemente.

### 7.1. Indicadores de rendimiento (KPI)

En este apartado se proponen una serie de indicadores de rendimiento que se pueden utilizar para comparar las instalaciones agrovoltaicas instaladas. Estos indicadores se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Resumen de indicadores de desempeño del sistema agrovoltaico [39].

Indicador	Representación matemática	Características sobresalientes
Relación de cobertura del suelo (GCR)	$GCR = \frac{A_{PV}}{A_{GROUND}}$ <p><math>A_{PV}</math> es la superficie de módulos fotovoltaicos</p> <p><math>A_{GROUND}</math> es la superficie de suelo cultivado</p>	Un alto valor de GCR implica un alto rendimiento energético pero un bajo rendimiento de cultivo.
Rendimiento energético ( $Y_{EL}$ ) y agrícola ( $Y_{AG}$ )	$Y_{EL} = \frac{\text{Annual Energy (MWh)}}{\text{Unit land area (ha)}}$ $Y_{AG} = \frac{\text{Yield (kg)}}{\text{Unit land area (ha)}}$	$Y_{EL}$ depende de la radiación solar, la eficiencia del módulo, las pérdidas del sistema, etc.
Relación indicadores económicos-rendimiento precio	$PPR = \frac{P}{P_b}$ <p><math>P</math> es el coste del sistema agrovoltaico</p> <p><math>P_b</math> es el coste del sistema fotovoltaico convencional</p>	Si $PPR > 1$ no se considera razonable, mientras que si $PPR = 1$ es económicamente razonable

- Relación de cobertura del suelo (GCR) [39]

El Grand Coverage Ratio (GCR) es una de las variables más impactantes en un diseño agrovoltaico. El GCR se define como la relación entre el área de superficie ocupada por los módulos fotovoltaicos y la superficie del suelo cultivado, como se indica en la ecuación:

$$GCR = \frac{A_{PV}}{A_{GROUND}}$$

Para los sistemas agrovoltaicos, los valores altos de GCR proporcionan un alto rendimiento energético, mientras que el rendimiento del cultivo será bajo debido a la cantidad reducida de radiación solar y la tasa de fotosíntesis posterior.

En este caso, el valor de GCR es:

$$GCR = \frac{65,7 (m^2)}{1974 (m^2)} = 0,03328 \rightarrow \text{Alto rendimiento del cultivo}$$

- Rendimiento energético y agrícola [39]

El rendimiento energético  $Y_{EL}$  (MWh/ha) es la energía eléctrica producida anualmente, expresada por unidad de terreno en ha. Hay que tener en cuenta que el rendimiento energético depende de muchas variables específicas y locales: la radiación solar, la eficiencia del módulo, las temperaturas y el efecto del microclima, etc.

$$Y_{EL} = \frac{22,51 (MWh)}{0,1974 (ha)} = 114,032 MWh/ha$$

El rendimiento agrícola  $Y_{AG}$  (kg/ha) es la cantidad total de productos agrícolas expresada por unidad de terreno en ha.

- Indicador económico [39]

La tecnología agrovoltaica tiene numerosas ventajas como ya se han enumerado en apartados anteriores. Sin embargo, para abrirse camino en el mercado, la energía agrovoltaica debe ser atractiva desde el punto de vista financiero.

Un valor de ppr superior a 1 no se considera razonable para la implementación agrovoltaica, ya que los costes de la planta fotovoltaica agrovoltaica son más altos que los ingresos de los productos agrícolas. Un valor igual a 1 se considera económicamente razonable porque se ha diversificado el ingreso del agricultor. Cuanto más pequeño es el ppr, más interesante es el proyecto.

Además de este valor, el atractivo financiero se va a decidir finalmente con los resultados obtenidos al calcular el Valor Neto Actual (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), los cuales se van a calcular en el siguiente apartado.

## 7.2. Producción del cultivo

A la hora de elegir el cultivo que se va a cultivar bajo una instalación fotovoltaica es importante conocer su tolerancia a la sombra. Algunos cultivos, como es el caso del pimiento, pueden verse beneficiados por una menor radiación solar y son más adecuados que los cultivos amantes del sol como el maíz, el arroz o el trigo. Para poder comparar la afcción del sombreado sobre diferentes cultivos en primer lugar se han clasificado éstos en tres categorías distintas: “+”, “0” y “-”, los cuales se muestran en la siguiente tabla (Tabla 13).



Tabla 13. Clasificación de los cultivos más relevantes aptos para el proyecto agrovoltaico.

+	0	-
Espinaca	Guisante	Trigo
Legumbres	Espárragos	Maíz
Pimiento	Zanahorias	Cebada
Tomate	Puerro	Girasol

La Figura 17 muestra la respuesta del rendimiento del cultivo frente a una reducción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) según las categorías del cultivo descritas anteriormente. De la Figura 17 se pueden sacar las siguientes conclusiones: las plantas en la categoría “+” exhiben un aumento en el rendimiento al aumentar la sombra inicialmente, pero cuando la radiación se ve reducida en torno a un 50%, este rendimiento cae por debajo del nivel de referencia. Las plantas en la categoría “0” se mantienen razonablemente estables hasta el 70% de sombra, momento en el cual el rendimiento disminuye drásticamente. Sin embargo, las plantas de la categoría “-” disminuyen casi linealmente, incluso con poca sombra [40].

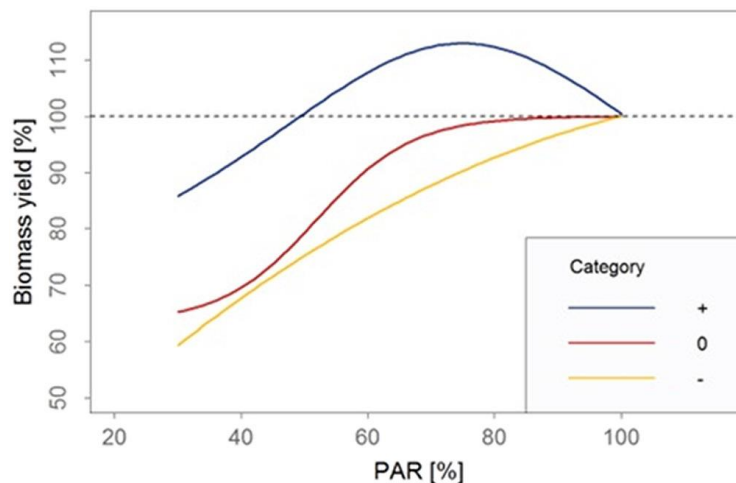


Figura 17. Función esquemática de respuesta a la sombra del cultivo [40].

Gracias a esta simulación se puede verificar que el cultivo seleccionado, el pimiento, puede verse beneficiado por la sombra producida por las placas solares, aunque este sombreado no debe superar el 50% para evitar una disminución de su rendimiento.

## **8. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO**

El principal objetivo de este proyecto es conseguir una optimización de la hibridación entre la generación de energía eléctrica mediante energía solar fotovoltaica y la superficie agrícola dedicada a un determinado cultivo. Esto permitirá el desarrollo de la técnica de agrovoltaica y su futura comercialización y, por ende, la modernización del mercado con el consiguiente abaratamiento del coste de esta tecnología con el fin de llegar al alcance de un mayor número de usuarios.

Los principales usuarios de esta tecnología van a ser los agricultores, independientemente del cultivo al que se dediquen, y los dueños de los invernaderos.

Con la ejecución del presente proyecto se espera que los resultados del proyecto tengan el siguiente impacto:

- Científico, fomentando la investigación de distintas disciplinas tecnológicas alrededor de la búsqueda de la optimización de instalaciones agrovoltaicas: agricultura, energía fotovoltaica, estructura, materiales, etc.
- Innovador, ya que se espera que se desarrollen nuevos productos o resultados (nuevos diseños de estructura agrovoltaica o incluso de paneles solares que permitan una mayor eficiencia), nuevos procesos agrícolas para la optimización en hibridación con instalación fotovoltaica, modelos de simulación matemática para la optimización de diseños, gracias a los desarrollos tecnológicos del proyecto.
- Técnico, ya que un conocimiento profundo de esta tecnología permitirá dar un salto cualitativo en el avance técnico de la agrovoltaica. Un objetivo a alcanzar en el futuro es mejorar las eficiencias y diseños de todos los procesos, metodologías y componentes de estas instalaciones hibridadas para conseguir un abaratamiento de los costes tal que permita empezar a competir con otras formas de generación renovable.
- Socioeconómico, en varios vectores de acción: desde el más inmediato de generación de empleo en aquellas empresas que incorporen el diseño y montaje de esta tecnología, hasta la creación de futura riqueza y empleos gracias a los nuevos diseños más eficientes de este proyecto lo cual permitirá una mayor expansión de la agrovoltaica en el territorio español e incluso europeo.

### **8.1. Viabilidad económica del proyecto**

Los costes de la tecnología agrovoltaica pueden variar considerablemente de un proyecto a otro, dependiendo de factores como la capacidad instalada, la gestión agrícola, la ubicación del campo, la tecnología fotovoltaica escogida, etc. Los gastos de capital son generalmente más altos en comparación con una instalación fotovoltaica convencional montada en cubierta, principalmente debido a que requiere de una estructura más elaborada o unos módulos de tecnología más costosa. En el caso de proyectos de agrovoltaica en suelo, también su coste se encarece considerablemente debido a la altura que puede alcanzar la estructura para permitir el trabajo de la maquinaria agrícola.

Sin embargo, la tecnología agrovoltaica representa una alternativa de mejorar la capacidad de generación de ingresos.

Los sistemas agrovoltaicos, de acuerdo con las experiencias internacionales, presentan una mayor inversión en comparación con sistemas fotovoltaicos convencionales, sobre todo aquellos instalados en el suelo. En el caso de instalaciones en cubierta, como es el caso del invernadero, el coste también es ligeramente superior debido a que la mayoría de las infraestructuras no están preparadas para soportar el peso de una instalación fotovoltaica, por lo que es necesario reforzar la cubierta. Además, el modelo de panel que se utiliza normalmente es bifacial, el cual se caracteriza por ser sensible a la luz por ambas caras, al contrario que ocurre con las placas solares monofaciales, cuya parte posterior está cubierta con materiales opacos y, por lo tanto, no capta la radiación solar. En el caso de una placa solar bifacial, la parte trasera está formada por una lámina transparente o fabricada con vidrio templado doble, de modo que ambos lados reciben los rayos del Sol para la generación de energía. Al ser tanto las cubiertas como las paredes de los invernaderos transparentes, permitiendo así el paso de la luz, son el tipo de panel solar ideal. El principal inconveniente de los paneles bifaciales es su coste, el cual es más elevado que el de los paneles monofaciales. Sin embargo, este inconveniente puede verse contrarrestado positivamente por un mayor rendimiento del panel al producir energía por ambas caras.

En algunos análisis económicos que se han realizado en instalaciones agrovoltaicas en suelo construidas en Italia, concretamente en el valle del Po, se ha demostrado que la inversión es en torno a un 50% superior con respecto a instalaciones fotovoltaicas convencionales en suelo, dado principalmente a la infraestructura e instalación [41].

En este caso, al ser un invernadero preparado para instalar un sistema fotovoltaico en la cubierta, la diferencia del precio recaerá en los paneles utilizados. En la Tabla 14 se muestra la diferencia de precio entre utilizar paneles monofaciales o paneles bifaciales.

*Tabla 14. Estimación del sobrecoste de una instalación agrovoltaica con paneles bifaciales frente a una instalación solar fotovoltaica convencional con paneles monofaciales.*

	Precio (\$/Wp)	Precio (€/Wp)	Potencia instalada	Coste total
<b>Paneles monofaciales</b> <b>JAM 72S30-535/MR</b>	0,26	0,24	13,91 kWp	<b>3.338,4 €</b>
<b>Paneles bifaciales</b> <b>JAM72D30-535/MB</b>	0,2796	0,2629	13,91 kWp	<b>3.656,94 €</b>
<b>Diferencia</b>		<b>+ 7,56% paneles bifaciales</b>		

### 8.1.1. Conceptos básicos de economía

Cuando se va a acometer una inversión en un proyecto de este estilo, es necesario tener la información suficiente para poder determinar en cuánto tiempo se va a recuperar dicha inversión y bajo qué rentabilidad. En este caso, la inversión se recuperará con los ahorros que se obtengan a partir de la puesta en marcha de la

instalación fotovoltaica. En los proyectos fotovoltaicos de autoconsumo, como es el caso, el flujo de caja no tiene un ingreso como tal, sino un “no gasto”, es decir, un ahorro sobre un escenario base o de referencia que es siempre la situación inicial previa a la instalación.

De manera sencilla, se puede decir que cuanto más altos sean los ahorros generados por la instalación, antes se recuperará la inversión y la rentabilidad del proyecto será mayor. Una vez recuperada la inversión inicial, el coste de la electricidad procedente de la instalación fotovoltaica será mínimo, correspondiéndose simplemente al coste de mantenimiento de la propia instalación.

Económicamente, en este proyecto participan distintos actores como son: costes fijos, costes de operación y ahorros. Los costes fijos corresponden con la inversión inicial relativa a la ejecución de la planta fotovoltaica, los costes de operación se corresponden con los costes de mantenimiento y finalmente, los ahorros se corresponden con el coste de la cantidad de energía que se deja de adquirir a la red. Es necesario que todos estos parámetros queden plasmados en un análisis de rentabilidad o viabilidad de proyecto.

Los parámetros principales de rentabilidad de un proyecto son los siguientes:

- Periodo de retorno (Pay-back, PB)

El periodo de retorno o Pay-back es el periodo de tiempo requerido para recuperar el capital inicial de una inversión. Su definición matemática es la siguiente:

$$PB = \frac{I}{F_n}$$

Donde I (€) es el capital inicial de la inversión y  $F_n$  (€/año) es el flujo de caja anual.

- Valor actual neto (VAN)

El valor actualizado neto (VAN) actualiza los flujos de entrada y de salida de un proyecto, trayéndolos al presente descontándolos a un tipo de interés determinado. El VAN de un proyecto se mide en valor absoluto (€). La expresión matemática que calcula el VAN de un proyecto es la siguiente:

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{(1+k)^i}$$

Donde I (€) es el capital inicial de la inversión,  $F_i$  (€/año) es el flujo de caja anual en el año  $i$ ,  $k$  es la tasa de interés y  $n$  (años) los años de vida útil del proyecto.

- Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es la tasa de interés que igual el VAN a cero para un proyecto de inversión determinado y es una medida de la rentabilidad de ese proyecto. La TIR sirve para comparar proyectos diferentes desde el punto de vista de su rentabilidad. Tal y como indica su definición, la expresión matemática para calcular la TIR es la siguiente:

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{(1+TIR)^i} = 0$$

Donde I (€) es el capital inicial de la inversión, Fi (€/año) es el flujo de caja anual en el año i, TIR (tpu) es la tasa interna de retorno y n (años) los años de vida útil del proyecto.

Además, para un proyecto fotovoltaico incluimos también el siguiente parámetro:

- Coste normalizado de la energía (LCOE)

El LCOE o coste normalizado de la energía es el valor del coste total actual de construir y operar una instalación generadora de energía a lo largo de toda su vida útil. De esta manera, mide los costes totales que esa instalación tendrá a lo largo de toda su vida y los divide por la producción de energía que realizará también durante todos sus años de operación [42]. Se expresa normalmente en €/MWh. La fórmula de cálculo simplificada del LCOE es la siguiente:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde I (€) es el capital inicial de la inversión, M (€) representa los costes de operación y mantenimiento, F representa el coste del combustible (en este caso, al tratarse en una energía renovable, F=0), r es la tasa de descuento y E (MWh) es la generación de energía cada año.

Para obtener estos parámetros básicos de rentabilidad, se utilizará una hoja de cálculo Excel incluyendo los 25 años de vida útil de la instalación. Esta hoja de cálculo se puede ver incluida en el Anexo 9.

En la Tabla 15 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de los principales indicadores de rentabilidad del proyecto.

*Tabla 15. Resumen parámetros de rentabilidad (VAN, TIR, PB) y valor del LCOE del proyecto.*

<b>VAN</b>	48.447 €
<b>TIR</b>	23,27 %
<b>PAY-BACK</b>	4,29 años
<b>LCOE</b>	57,81 €/MWh

Por lo tanto, esta inversión presenta un periodo de retorno de 4,29 años, con una TIR del 23,27% y un VAN de 48.447 €. Como primera conclusión, la inversión es viable y además arroja unos parámetros de rentabilidad bastante atractivos.

#### 8.1.2. Parámetros principales en un análisis de viabilidad de un proyecto de autoconsumo

A continuación, se aplica el análisis general de viabilidad que se acaba de presentar, teniendo en cuenta algunas circunstancias particulares de las instalaciones solares fotovoltaicas de autoconsumo. Además de los parámetros ya vistos, se deben tener en cuenta las siguientes variables:

- Producción eléctrica (obtenida mediante la herramienta PVSyst). Este valor será el que determine los ahorros que introducimos en el análisis de viabilidad. Hay que tener en cuenta que el módulo fotovoltaico se degrada progresivamente con el paso del tiempo. El fabricante garantiza que esa degradación será en torno al 0,7%, tal y como puede verse en la ficha técnica en el Anexo 5. Si no se incluyera este parámetro de degradación, los parámetros de rentabilidad se sobreestimarían. Este parámetro corresponde a la fila de “Tasa estimada de pérdida de producción” en la hoja de cálculo del estudio de rentabilidad (Anexo 9).
- Costes de inversión. Además del coste de la propia instalación, tenemos en cuenta también otros parámetros que también deben abonarse de manera inicial con la inversión. En la hoja de cálculo aparecen indicados en el apartado “Gastos” → “Pago de tasas e ICIO Ayuntamiento”.
- Incremento del precio de la electricidad. El mercado eléctrico es muy voluble y los precios pueden variar considerablemente dentro de un mismo año, por eso se supone un porcentaje de variación, el cual en este caso se ha considerado del 1%.
- Costes de mantenimiento. Para esta instalación, el coste de mantenimiento está estimado en 450 €/año, revalorizable al IPC (2% cada año).

## 8.2. Evaluación de la rentabilidad

En este apartado se va a explicar el análisis de rentabilidad que se ha llevado a cabo para la instalación solar fotovoltaica de autoconsumo de 12 kW de potencia nominal.

En primer lugar, se ha calculado la producción estimada que va a generar la instalación fotovoltaica utilizando la herramienta PVSyst (ver Anexo 1). De este modo, se obtiene la energía autoconsumida (kWh), la energía excedentaria vertida a la red (kWh) y el ahorro económico estimado (€). Los datos correspondientes a la energía autoconsumida y a la energía excedentaria vertida a la red ya se han mostrado anteriormente en el apartado 6 de la memoria, pero se adjunta una tabla resumen de nuevo con estos resultados (Tabla 16), así como el ahorro económico estimado.

*Tabla 16. Resultados de energía autoconsumida, energía excedentaria vertida a la red y ahorro económico, tras haber obtenido la producción de la instalación fotovoltaica a través de la simulación realizada con PVSyst.*

	<b>Energía autoconsumida (kWh)</b>	<b>Energía excedentaria vertida a la red (kWh)</b>	<b>Ahorro en el término de energía (€)</b>	<b>Ingresos por compensación de excedente (€)</b>
<b>Total anual</b>	22350,43	187,09	4100,08	9,35

Tras haber obtenido una producción estimada de 22.537,52 kWh/año, el propietario del invernadero alcanzará un ahorro en el consumo de energía de la red del 74,80% y de toda la energía producida por la instalación fotovoltaica, tan solo un 0,83% será vertida a la red como excedente. En términos económicos, se obtendrá un ahorro en

la compra de energía de 4.100 € al año y unos ingresos adicionales por la compensación de los excedentes de 9,35 €.

A continuación, conocidos los resultados relativos al ahorro económico, ya se puede desarrollar el análisis de viabilidad de este proyecto. Para ello, se tiene que el coste de inversión de esta instalación es de 1,12 €/Wp, es decir, 15.573,61 €. A este coste habría que añadirle el pago de tasas e impuestos que se estima en un 4% del total. En cuanto al mantenimiento, se estima en unos 450 €/año. La Tabla 17 recoge estos y otros parámetros de entrada al modelo financiero.

*Tabla 17. Datos de entrada del análisis de viabilidad.*

<b>Parámetros de entrada modelo económico</b>	
Coste de la instalación	15.573,61 €
Coste tasas y licencias (4%)	623 €
Costes de operación (mantenimiento)	450 €/año
Degradación anual del módulo	0,7%
Incremento precio de la electricidad	1% anual
Inflación	2%
Tasa de descuento	3%
Vida útil de la instalación	25 años

Para obtener los parámetros básicos de rentabilidad se crea la hoja de cálculo que se ha comentado anteriormente, incluyendo los 25 años de vida útil de la instalación. Los resultados definitivos de Pay-Back, VAN y TIR se han mostrado en la Tabla 15. Este autoconsumo permitirá recuperar la inversión en 4,29 años por medio del ahorro en factura y la compensación de excedentes que va a generar a lo largo de su vida útil. Para obtener este ahorro se han supuesto unos precios medios actuales de la electricidad, los cuales se muestran en la siguiente tabla (Tabla 18).

*Tabla 18. Valores del precio de la electricidad por periodos (en €/kWh) para calcular el ahorro económico que se obtiene de la instalación de autoconsumo.*

	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
Precios promedio de la electricidad en €/kWh	0,223192	0,220769	0,202304	0,183838	0,165373	0,146908

Tras estos resultados obtenidos, se puede concluir que la instalación fotovoltaica para el proyecto de agrovoltaica resulta rentable, ya que se obtiene un valor de la TIR alto y un periodo de retorno bajo, frente a los 25 años que tiene de vida útil la instalación.

Es importante destacar que el dimensionado de un autoconsumo debe hacerse en la medida de lo posible, en función del consumo eléctrico que exista. Si en este caso se

hubiera instalado más potencia, los excedentes generados crecerían rápidamente. Estos excedentes se retribuyen a un precio bastante más bajo que el que el dueño del invernadero pague en su factura, que es precisamente el que evita la energía fotovoltaica autoconsumida.



## 9. ANÁLISIS SOCIAL DEL PROYECTO

El presente proyecto tendrá un impacto social positivo, ya que generará o agregará un valor social, es decir, la población, en este caso los agricultores propietarios del terreno de cultivo obtendrán un beneficio gracias a él.

Esta tecnología puede tener especial importancia en zonas rurales ya que numerosos estudios han demostrado que los sistemas agrovoltaicos a pequeña escala pueden ser económicamente viables en ciertas configuraciones y puede proporcionar beneficios colaterales, como por ejemplo la electrificación rural, la modernización de la generación de electricidad, entre otros. Además, esta sinergia entre generación eléctrica mediante energía renovable y la producción de cultivos agrícolas, puede hacer que mejore el apoyo público al desarrollo de la energía solar fotovoltaica. Siguiendo esta línea, aunque las instalaciones agrovoltaicas podrían reducir aún más la oposición local a este tipo de tecnología renovable, hay que tener en cuenta las preocupaciones locales que puedan surgir a la hora de desarrollar un proyecto solar, como la forma en que el proyecto proporcionaría beneficios económicos a agricultores, la equidad en la forma en que se distribuyen los beneficios económicos, los detalles de la ubicación de cualquier nueva instalación, etc. [43].

Además del beneficio económico que puede ofrecer la agrovoltaica a los agricultores, también surgen otras ventajas de esta tecnología que pueden impactar positivamente sobre la sociedad. Al ser compatibles ambas actividades (generación de energía eléctrica y agricultura), se consigue un alivio en la competencia por el uso del suelo. Además, al generar una nueva vía de ingresos a la agricultura, se apoya contra la despoblación en zonas rurales, problema cada vez más grave y preocupante en la sociedad.

## 10. CONCLUSIONES

La tecnología solar fotovoltaica es fundamental en la transición a un sistema de energía con bajas emisiones de carbono. Sin embargo, ya se ha visto que el despliegue a gran escala puede verse obstaculizado debido a los temores sobre las compensaciones de sostenibilidad y los focos de resistencia social. Por ejemplo, el despliegue de granjas fotovoltaicas puede competir con la agricultura por el uso de la misma tierra para la producción de alimentos y puede crear tensiones locales sobre cómo se usa y asigna la tierra.

Sin embargo, la agrovoltaica combina la generación de electricidad solar con la producción agrícola en el mismo lugar. Como se muestra en la Figura 18, cada vez más investigaciones evalúan este tipo de tecnología por su potencial para mejorar la eficiencia del uso de la tierra, las soluciones climáticas, los alimentos sostenibles y las economías locales. Las diferentes configuraciones agrovoltaicas, como la combinación de energía fotovoltaica con tierras de cultivo, pastos o hábitats de polinizadores, pueden contribuir a lograr objetivos alimentarios y energéticos sostenibles simultáneamente, al tiempo que posiblemente reduzcan la oposición local al despliegue de energía fotovoltaica [43].

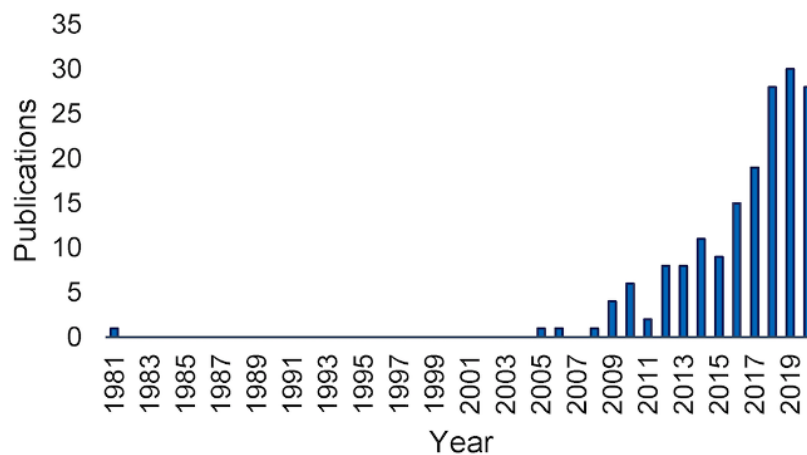


Figura 18. Número de artículos académicos agrovoltaicos relevantes publicados anualmente [43].

La aplicación de los sistemas agrovoltaicos ofrece una serie de oportunidades, que difieren según las condiciones regionales y climáticas. El valor añadido real de la tecnología agrovoltaica es que permite la producción simultánea de alimento y energía, proporcionando beneficios económicos innegables para los agricultores, con efectos sinérgicos potenciales adicionales. Esto es de particular interés en los países industrializados densamente poblados, donde la expansión de las energías renovables es cada vez más importante, pero es necesario preservar las tierras agrícolas productivas.

Por lo tanto, la agrovoltaica puede ser un componente importante de los sistemas agrícolas futuros, al abordar algunos de los principales desafíos sociales y ambientales actuales y futuros, como el cambio climático, la demanda mundial de energía, la seguridad alimentaria y el uso de la tierra.

La agrovoltaica conducirá inevitablemente a condiciones microclimáticas alteradas, en particular una radiación solar reducida y los cambios resultantes en el balance hídrico. Dado que la radiación es uno de los factores más importantes que afectan al rendimiento de los cultivos, una disminución en los rendimientos agrícolas es

la consecuencia más probable del cultivo debajo de paneles fotovoltaicos. Sin embargo, los beneficios son posibles para cultivos adaptados a la sombra y en climas cálidos y áridos donde el ahorro de agua mejorado y la protección contra los efectos adversos de las altas temperaturas y la radiación excesiva son ventajosos. Para seleccionar el cultivo que mejor se adaptara a estas condiciones, se han consultado varios estudios y se llegó a la conclusión que el pimiento era idóneo ya que las pérdidas de rendimiento afectaban al cultivo cuando el sombreado era superior al 50%. Además, otras de las razones por las que también se eligió el pimiento, fue que hoy en día es el producto más cultivado en la región de Almería, superando incluso en los últimos años al tomate.

Además de la posible mejora en la producción de determinados cultivos, gracias a la tecnología agrovoltaica podemos obtener un mayor rendimiento de la instalación solar. Las placas solares fotovoltaicas generan energía gracias a la radiación solar que reciben. Sin embargo, cuando están sometidos a temperaturas muy altas, condición que puede darse durante los meses de verano, puede verse afectado de forma negativa su rendimiento y reducir su eficiencia en un porcentaje bastante alto. El hecho de ubicar cultivos bajo los paneles produce una reducción de la temperatura de estos, evitando así que se sobrecalienten y se vea afectado su rendimiento [44].

En este proyecto, para dimensionar adecuadamente la instalación solar fotovoltaica, se partió de un consumo tipo de invernadero y se instalaron 13,91 kWp. Para ello, se colocaron 26 módulos repartidos en 2 cadenas de 13 módulos en serie, y un inversor de 12 kW de potencia nominal. Para comprobar si dicha instalación era viable tanto técnica como económicamente, se realizó un estudio de viabilidad. En primer lugar, se calcularon los principales parámetros de rentabilidad y se obtuvo un periodo de retorno de 4,29 años, con una TIR del 23,27% y un VAN de 48.447 €. Para conocer si una inversión es rentable, el valor de VAN debe ser mayor de 0, lo cual cumple, y además cuanto mayor sea el valor de la Tasa Interna de Rentabilidad, más rentable será la inversión. Por lo tanto, con estos datos, se puede afirmar que la inversión es viable y arroja unos parámetros de rentabilidad bastante atractivos.

Previamente a este estudio, se realizó una simulación con la herramienta PVSyst para calcular la producción estimada de la instalación solar, y pudo comprobarse que solo se producía un 0,83% de excedente. Para obtener un mayor beneficio económico, al legalizarse la instalación como un autoconsumo con excedentes, se recibirá una retribución específica por esa energía vertida a la red eléctrica. Al instalar una potencia inferior a 100 kW nominales, se aplica el mecanismo de compensación simplificada, el cual consiste en aplicar un coste de referencia (0,05 €/kWh) sobre la energía excedentaria que se ha calculado previamente al confrontar generación con consumo demandado por el invernadero [45].

Sin embargo, hoy en día la tecnología agrovoltaica no es competitiva en costos con la fotovoltaica convencional sobre suelo, y puede requerir de programas públicos de apoyo si se quiere impulsar en España. Para justificar estas ayudas, se debe resaltar que este tipo de instalaciones pueden ayudar a crear un sector agrícola español más resiliente frente al cambio climático y a generar una nueva fuente de ingresos. En este caso, al tratarse de un invernadero que ya estaba equipado estructuralmente, el sobre coste de la instalación se ha visto recaído exclusivamente en el precio de los módulos, los cuales se han utilizado bifaciales, una tecnología hoy en día más cara que los módulos convencionales monofaciales.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Dinesh, J.M. Pearce, “The potential of agrivoltaic systems”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 54 (2016) pp. 299-308
- [2] B. Valle, T. Simonneau, P. Pechier, P. Hamard, T. Frisson, M. Rycckewaert, A. Christophe, “Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops”, Applied Energy, Volume 206 (2017) pp. 1495-1507
- [3] N. Roslan, M.E. Ya’acob, M.A.M. Radzi, Y. Hashimoto, D. Jamaludin, G. Chen, “Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) greenhouse shading: New insights for solar radiation manipulation”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 92 (2016) pp. 171-186
- [4] Agrivoltaica: Cuando la producción de energía solar se une con la agricultura. Consultado en soporte electrónico: <https://www.elperiodico.com/es/economia/20210915/agrivoltaica-produccion-energia-solar-une-12059430> (Accedido en abril 2022)
- [5] Endesa inicia en Sevilla un proyecto pionero de agrovoltaica y apicultura solar. Consultado en soporte electrónico: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/endesa-inicia-en-sevilla-un-proyecto-pionero-20201229> (Accedido en abril 2022)
- [6] Carmona acoge las primeras colmenas inteligentes que producen “miel solar”. Consultado en soporte electrónico: <https://www.catalunyapress.es/texto-diario/mostrar/3166845/carmona-acoge-primeras-colmenas-inteligentes-producen-miel-solar> (Accedido en abril 2022)
- [7] Agrovoltaico, nuevas soluciones sostenibles para el territorio. Consultado en soporte electrónico: <https://www.evwind.com/2021/02/13/agrovoltaico-nuevas-soluciones-sostenibles-para-el-territorio/> (Accedido en abril 2022)
- [8] Création de “France Agrivoltaïsme” pour structurer la filière. Consultado en soporte electrónico: <https://www.pv-magazine.fr/2021/06/09/creation-de-france-agrivoltaisme-pour-structurer-la-filiere/> (Accedido en marzo 2022)
- [9] Página oficial de L’association France Agrivoltaïsme. Consultado en soporte electrónico: <https://france-agrivoltaisme.org/> (Accedido en marzo 2022)
- [10] Baywa re desplegará 35 MWp agrovoltaicos en Europa para 2022. Consultado en soporte electrónico: <https://www.pv-magazine.es/2021/03/30/baywa-re-desplegara-35-mwp-agrovoltaicos-en-europa-para-2022/> (Accedido en marzo 2022)
- [11] Página oficial INDEREN – El proyecto agrovoltaico “Fruitvoltaic” ha ganado el premio “The smarter E AWARD 2021” del sector energético. Consultado en soporte electrónico: <https://inderen.es/es/proyecto-agrovoltaico-fruitvoltaic-smarter-e-award/> (Accedido en marzo 2022)
- [12] Italia destina 1.100 millones de euros a agrovoltaica y 2.000 a comunidades energéticas y almacenamiento. Consultado en soporte electrónico: <https://www.pv-magazine.es/2021/04/28/italia-destina-1-100-millones-de-euros-a-agrovoltaica-y-2-000-a-comunidades-energeticas-y-almacenamiento/> (Accedido en marzo 2022)

- [13] Benefits of agrovoltaics. Consultado en soporte electrónico: <https://agrovoltaic.org/benefits-of-agrovoltaics/> (Accedido en enero 2022)
- [14] E. Hassanpour, J.S. Selker, C.W. Higgins, “Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency”, Plos Genetics Collection, (2018)
- [15] L. El Chaar, L.A. Iamont, N. El Zein, “Review of photovoltaic technologies”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15 (2011) pp. 2165-2175
- [16] “Photovoltaics Report”, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH (2022)
- [17] “Trends in photovoltaic applications 2020”, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (2020)
- [18] T.D. Lee, A.U. Ebong, “A review of thin film solar cell technologies and challenges” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 70 (2017) pp. 1286-1297
- [19] A. Yano, M. Cossu, “Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 109 (2019) pp. 116-137
- [20] E.F. Fernández, A. Villar-Fernández, J. Montes-Romero, L. Ruiz-Torres, P.M. Rodrigo, A.J. Manzaneda, F. Almonacid, “Global energy assessment of the potential of photovoltaics for greenhouse farming”, Applied Energy, Volume 309 (2022)
- [21] El invernadero de paneles solares ya es una realidad. Consultado en soporte electrónico: <https://esenergia.es/paneles-solares-invernadero/> (Accedido en marzo 2022)
- [22] K. Ezzaeri, H. Fatnassi, R. Bouharroud, L. Gourdo, A. Bazgaou, A. Wifaya, H. Demrati, A. Bekkaoui, A. Aharoune, C. Poncet, L. Bouirden, “The effect of photovoltaic panel on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses”, Solar Energy, Volume 173 (2018) pp. 1126-1134
- [23] P. Marín, “Estudio del comportamiento resistente en campo de un invernadero tipo “Almería”. Trabajo Fin de Grado” Escuela Superior de Ingeniería de Almería (2011) pp. 22-44
- [24] El cultivo del pimiento. Consultado en soporte electrónico: <https://www.ecoterrazas.com/blog/el-cultivo-del-pimiento/> (Accedido en marzo 2022)
- [25] A.O. Rodríguez Torressi, “El cultivo de pimiento: la importancia de la media sombra”, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (2014)
- [26] 6 trastornos a evitar en el pimiento. Consultado en soporte electrónico: <https://www.hortalizas.com/cultivos/6-trastornos-a-evitar-en-el-pimiento/> (Accedido en marzo 2022)

- [27] “Análisis de la campaña hortofrutícola campaña 2020/2021”, Cajamar Caja Rural (2021)
- [28] Página oficial Fundación Finca Experimental Universidad de Almería – Plano de la Finca Experimental. Consultado en soporte electrónico: <https://www.fundacionualanecoop.com/breve-historia/plano-de-la-finca-experimental/> (Accedido en mayo 2022)
- [29] “Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos”, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2022)
- [30] Página oficial de HUAWEI. Consultado en soporte electrónico: <https://solar.huawei.com/es/Products/FusionSolar> (Accedido en febrero 2022)
- [31] K. Barbosa de Melo, M. Kitayama da Silva, J.L. de Souza Silva, T. Silva Costa, M. Gradella Villalva, “Study of energy improvement with the insertion of bifacial modules and solar trackers in photovoltaic installations in Brazil”, Renewable Energy Focus, Volume 41 (2022), pp. 179-187
- [32] Paneles solares fotovoltaicos bifaciales: ¿Qué son? ¿Los puedo instalar sobre mi cubierta? Consultado en soporte electrónico: <https://www.opengy.com/paneles-solares-fotovoltaicos-bifaciales-que-son-instalacion-sobre-cubierta/> (Accedido en febrero 2022)
- [33] Instalaciones de paneles con estructura coplanar. Consultado en soporte electrónico: <https://www.helioesfera.com/instalaciones-de-paneles-con-estructura-coplanar/> (Accedido en febrero 2022)
- [34] Estanqueidad de las estructuras para paneles solares: adiós a las goteras. Consultado en soporte electrónico: <https://alusinsolar.com/estanqueidad-de-las-estructuras-para-paneles-solares-adios-a-las-goteras/> (Accedido en febrero 2022)
- [35] Ficha de datos técnicos y de seguridad. Mezclas de caucho EPDM. Consultado en soporte electrónico: [https://rncmurcia.com/wp-content/uploads/2017/10/FICHA\\_TECNICA\\_EPDM-1.pdf](https://rncmurcia.com/wp-content/uploads/2017/10/FICHA_TECNICA_EPDM-1.pdf) (Accedido en febrero 2022)
- [36] Página oficial de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. Consultado en soporte electrónico: <https://www.cnmc.es/ambitos-de-actuacion/energia/mercado-electrico> (Accedido en junio 2022)
- [37] M. Cossu, L. Murgia, L. Ledda, P.A. Deligios, A. Sirigu, F. Chessa, A. Pazzona, “Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity”, Applied Energy, Volume 133 (2014) pp. 89-100
- [38] PAR (radiación fotosintéticamente activa). Consultado en soporte electrónico: <https://www.horti-growlight.com/es-es/par-ppf-y-pf-ppfd-y-dli> (Accedido en mayo 2022)
- [39] P. Jain, G. Raina, S. Sinha, P. Malik, S. Mathur, “Agrovoltaics: Step towards sustainable energy-food combination”, Bioresource Technology Reports, Volume 15 (2021)

[40] M. Beck, G. Bopp, A. Goetzberger, T. Oberfell, C. Reise, S. Schindele, “Combining PV and food crops to Agrophotovoltaic-optimization of orientation and harvest”, EUPVSEC Proceedings, Volume 1 (2012)

[41] A. Agostini, M. Colauzzi, S. Amaducci, “Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment”, Applied Energy, Volume 281 (2021)

[42] ¿Qué es el Levelized Cost of Energy (LCOE)? Consultado en soporte electrónico: <https://www.energyavm.es/que-es-el-levelized-cost-of-energy-lcoe/> (Accedido en junio 2022)

[43] How “Agrivoltaics” can provide more benefits than agriculture and solar photovoltaics separately. Consultado en soporte electrónico: <https://energyinnovation.org/2021/11/01/how-agrivoltaics-can-provide-more-benefits-than-agriculture-and-solar-photovoltaics-separately/> (Accedido en mayo 2022)

[44] Agrovoltaica, las ventajas de unir renovables y cultivos. Consultado en soporte electrónico: <https://www.vectorenrenewables.com/es/recursos/blog/agrovoltaica-las-ventajas-de-unir-renovables-y-cultivos> (Accedido en mayo 2022)

[45] Autoconsumo con excedentes: ¿compensación simplificada o venta de energía? Consultado en soporte electrónico: <https://selectra.es/autoconsumo/info/tarifas> (Accedido en junio 2022)