

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ENERGÍAS RENOVABLES

PROYECTOS DE ENERGÍAS RENOVABLES

Y PROYECTO FIN DE MÁSTER

Curso 2023/2024

ANÁLISIS DEL IMPACTO ENERGÉTICO DE LA APLICACIÓN SOSTENIBLE DE PANELES FOTOVOLTAICOS TRANSPARENTES SOBRE EL "MAR DE PLÁSTICO" DE ALMERÍA



Alumnos:

Lucas Javier Rodríguez Garrido

Alba Cordero Relaño

Ana García Pérez

Tutor:

Ricardo Dorda Laforet

ÍNDICE

1. RESUMEN	3
2. INTRODUCCIÓN	5
2.1. Objetivos	6
2.2. Tipos de sistemas	7
2.3. Estado de la tecnología actual de los paneles fotovoltaicos transparentes	7
2.4. Estudio de rentabilidad	9
3. METODOLOGÍA Y DATOS	11
3.1.1. Emplazamiento	11
3.1.2. Planeamiento	11
3.1.3. Ambiental	12
3.1.4. Recurso solar	12
3.1.5. Topografía	13
3.2. Análisis del invernadero	13
3.3. Tipos de tecnología	16
3.3.1. Células solares de perovskita	16
3.3.2. Células fotovoltaicas orgánicas	18
3.3.3. Células fotovoltaicas de silicio	19
3.3.4. Elección de las Células fotovoltaicas.	22
3.4. Sistema fotovoltaico	23
3.4.1. Distribución de paneles	24
3.4.2. Producción de energía	25
3.4.3. Balance energético	26
3.5. Análisis económico financiero	29
3.5.1. Estudio área limitada	29
3.5.2. Ayudas existentes	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	34
4.1. Diseño del sistema fotovoltaico	34
4.2. Demanda vs producción	34
4.3. Viabilidad	36
5. CONCLUSIONES	37
6. BIBLIOGRAFÍA	42
7. ANEXOS	45
7.1. Anexo I – Fichas técnicas equipos	45
7.2. Anexo II – Informes PVSyst sistemas fotovoltaicos	45

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Localización del invernadero a estudiar (500 ft, 200m) (Fuente: Microsoft Bing)	11
Ilustración 2 - Modelo de zonificación ambiental, sensibilidad ambiental energía fotovoltaica, presenta una baja tonalidad naranja lo que indica una baja sensibilidad ambiental (Fuente: Geo Portal del ministerio de agricultura, pesca y alimentación)	12
Ilustración 3 - Espacios Naturales Protegidos (ENP) en el emplazamiento (Fuente: Geo Portal del ministerio de agricultura, pesca y alimentación)	12
Ilustración 4 - Año meteorológico típico mediante PVGIS, 2024 en el emplazamiento	13
Ilustración 5 - Relieve en el emplazamiento (Fuente: Geo Portal del ministerio de agricultura, pesca y alimentación)	13
Ilustración 6 - Área del invernadero a estudiar (Fuente: Google Earth)	14
Ilustración 7 - Tipo de invernadero “raspa y amagado” (D. L. Valera et al,2014)	14
Ilustración 8 - Lámina de células de perovskita (Fuente: Magazine reciclados)	17
Ilustración 9 - Célula solar de perovskita (Fuente: Ecoinventos)	17
Ilustración 10 - Célula solar orgánica Konarka (Fuente: New Atlas)	18
Ilustración 11 - Célula solar orgánica flexible (Fuente: Academia de Ciencias de Morelos)	19
Ilustración 12 - Módulos fotovoltaicos de silicio transparentes (Fuente: Solitek)	20
Ilustración 13 - Techo solar con módulo agro fotovoltaicos (Fuente: BriteSolar)	21
Ilustración 14 - Ayudas para proyectos innovadores de agrivoltaica. (Fuente: BOE.es)	33
Ilustración 15 Comparación curvas energéticas opción 1	34
Ilustración 16 Comparación curvas energéticas opción 2	35

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Consumos del invernadero de 1,15 Ha para cada mes del año	16
Tabla 2 - Resumen comparativo células transparentes de Perovskita, orgánicas y de silicio	22
Tabla 3 Datos de partida sistema FV	23
Tabla 4 Cálculo de la producción FV mensual Opción 1	25
Tabla 5 Cálculo de la producción FV mensual Opción 2	26
Tabla 6 Balance energético opción 1	27
Tabla 7 Balance energético opción 2	28
Tabla 8 Excedentes y consumos de la red para la opción 1	29
Tabla 9 Excedentes y consumos de la red para la opción 2	30
Tabla 10 Inversión inicial para la opción 1 y 2, con y sin baterías	31
Tabla 11 Ahorros de consumo eléctrico, las ganancias por venta a la red y el coste de la electricidad, para las opciones 1 y 2 sin baterías	32
Tabla 12 Ahorros de consumo eléctrico, las ganancias por venta a la red y el coste de la electricidad, para las opciones 1 y 2 con uso de baterías	32
Tabla 13 Resumen del sistema fotovoltaico	34
Tabla 14 Resumen de la inversión, beneficios netos y periodo de recuperación	37

1. RESUMEN

Este estudio analiza la demanda energética de un invernadero en El Ejido, Almería, ubicado en el "Mar de plástico" andaluz, para la implementación de paneles fotovoltaicos transparentes. En base a esto, se diseñará un sistema fotovoltaico, comparando dos modalidades de autoconsumo: con y sin excedentes, para posteriormente obtener la producción del sistema, balance energético en base a la demanda y así poder realizar un análisis económico-financiero del mismo.

Se comparan tres tipos de tecnologías para la fabricación de paneles transparentes: perovskita, células orgánicas y silicio, seleccionándose este último por su madurez tecnológica, durabilidad y adaptabilidad a las condiciones del proyecto.

El invernadero ocupa 1,15 hectáreas, y su estructura es tipo "raspa y amagado". Su diseño asegura un ambiente controlado para el cultivo de tomates, un producto de alta demanda y producción estable a lo largo del año. La demanda energética estimada es de 23.050 kWh/año, variando entre 2.875- 1.375 kWh/mes, destinada principalmente a calefacción, iluminación LED, ventilación, y sistemas de riego y control climático.

Este estudio evalúa la viabilidad económica de instalar un sistema fotovoltaico transparente en un invernadero, considerando cuatro configuraciones, dos de ellas como autoconsumo sin excedentes con o sin batería y otros dos como autoconsumo con excedentes de venta a la red con o sin batería. Con el fin de determinar cuál de las opciones es más rentable y si puede ofrecer una independencia energética respecto a la red eléctrica. Para ello, se dimensiona teniendo en cuenta la demanda energética del invernadero, planteando el sistema suponiendo que un 80% de la demanda total (18.440 kWh/año). Para las opciones mencionadas, el análisis considera el coste de instalación entre 1,000-1,200 €/kWp y el uso de baterías Tesla Megapack, con un coste adicional de 150-300 €/kWh. Este proyecto puede beneficiarse de subvenciones del estado.

■ PALABRAS CLAVE

- Invernadero
- Paneles fotovoltaicos transparentes
- Autoconsumo energético
- Viabilidad económica
- Energías renovables

■ *ABSTRACT*

This study analyzes the energy demand of a greenhouse in El Ejido, Almería, located in Andalusia's "Sea of Plastic" region, for the implementation of transparent photovoltaic panels. Based on this analysis, a photovoltaic system will be designed, comparing two self-consumption models—with and without surplus energy export—to determine system production, energy balance based on demand, and to carry out an economic and financial analysis of the system, yielding results.

Three types of technologies for manufacturing transparent panels are explored: perovskite, organic cells, and silicon. Silicon was selected for its technological maturity, durability, and adaptability to project conditions.

The greenhouse spans 1.15 hectares and has a "parral-type" structure. Its design ensures a controlled environment for growing tomatoes, a product with high demand and stable year-round production. The estimated energy demand is 23,050 kWh/year, varying between 2,875–1,375 kWh/month, mainly for heating, LED lighting, ventilation, and irrigation and climate control systems.

This study assesses the economic feasibility of installing a photovoltaic system in the greenhouse, considering four configurations: two for self-consumption without surplus energy export, with and without batteries, and two for self-consumption with surplus energy sale to the grid, with and without batteries. The aim is to determine which option is the most cost-effective and whether it can provide energy independence from the electrical grid. To do so, the system is dimensioned based on the greenhouse's energy demand, assuming that 80% of the total demand (18,440 kWh/year) occurs during daylight hours. For the mentioned options, the analysis considers installation costs between €1,000–1,200 per kWp and the use of Tesla Megapack batteries, with an additional cost of €150–300 per-kWh. This project may benefit from government subsidies.

■ *KEYWORDS*

- Greenhouse
- Transparent photovoltaic panels
- Energy self-consumption
- Economic feasibility
- Renewable energy

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente el mundo alberga a más de 8 mil millones de personas y seguirá ascendiendo durante los próximos 70 años a 10 mil millones (Naciones Unidas, 2024). Produciendo que la demanda de recursos crezca de manera significativa, requiriendo cada vez más alimentos, agua y energía, entre otros recursos esenciales. Lo cual crea que cada día aumente los gases de efecto invernadero, aumentando el calentamiento global (Mario Ruiz, 2024; Naciones Unidad, 2024).

La producción de alimentos es una de las grandes preocupaciones de la sociedad actual debido al aumento de demanda sumado a los problemas que supone el cambio climático en las cosechas y escasez de tierras de cultivo (Instituto Del Agua, 2024). Por ello se está optando cada vez más por lo cultivos en invernadero, los cuales tienen mayor rendimiento que la cosecha tradicional (Corpoica et al. 2013).

Según indica Tong et al. (2024) el cultivo en invernaderos ha ido aumento significativamente en los últimos años obteniendo cifras de 1,3 millones de hectáreas de infraestructuras de invernaderos en 2019, de los cuales el 60,4% de las hectáreas representan a China, seguido de España el cual lidera el segundo puesto con un 5,6% (La Voz de Galicia, 2024). Poniendo el punto de mira en España, las explotaciones con invernadero comprenden una superficie de 65.000 hectáreas, donde casi la mitad (48%) se encuentran en Almería, el llamado “mar de plástico”, seguido de Granada con un 9% (Subsecretaría de Agricultura et al, 2024).

Este aumento en la construcción de invernaderos supone una gran incertidumbre sobre las implicaciones ambientales que tendrá sobre el entorno y se han de estudiar e investigar posibles soluciones. Se prevén la sobreexplotación de los recursos hídricos y contaminación de aguas con fertilizantes y pesticidas, deterioro del suelo y contaminación por plásticos debido a las láminas y cubiertas de los invernaderos, sin olvidar el consumo de energía del cual depende principalmente de la potencia de los sistemas de ventilación, calefacción y humidificación según las condiciones meteorológicas (La Voz de Galicia, 2024).

Para que los invernaderos se conviertan en una opción viable para la agricultura sostenible se necesita compensar el gasto de energía. Una gran solución sería las energías renovables, entre las que destacan la generación de la energía fotovoltaica, de la cual ya sean realizado diversos estudios favorables en el autoconsumo de invernaderos e incluso venta de energía a la red (Green, 2019). El problema de los paneles fotovoltaicos tradicionales es que no permiten el paso de la luz al interior de los invernaderos, por ellos solo se pueden implantar un determinado número de placas en los tejados produciendo entre un 15-50% de sombra dentro del invernadero. En la producción del tomate, por ejemplo, una superficie sombreada supero al 15% perjudica el rendimiento y calidad del cultivo, según López Díaz, G, 2021. Por ello es necesario implantar una tecnología que permita aprovechar en su totalidad o en mayor medida la superficie del techo de los invernaderos para aumentar la producción de energía y la solución podría estar en los paneles fotovoltaicos transparente los cuales permiten el paso de la luz solar (Cordis, 2022) y no crearían sombras dentro del invernadero.

Con el fin de continuar con la lucha de una agricultura sostenible y eficiente acorde con las demandas del mundo actual, se propone realizar un estudio de un invernadero autosostenible mediante placas fotovoltaicas transparentes en España, ubicado en Almería. Se ha elegido Almería por ser el epicentro de la producción de plantas y hortalizas en España principalmente por la zona geográfica y su clima. Almería tiene gran cantidad de horas de radiación solar al año y dispone gran cantidad de agua subterránea. Cabe destacar además su innovación tecnológica en invernaderos (Ecozap, 2023; Diario De Almería, 2022). Y su cercanía a los principales

mercados europeos, asegurando así una producción agrícola de calidad y eficiente y asegurando una venta directa al mercado español y europeo (Pérez, 2022).

Cabe destacar que este proyecto se alinea con los intereses tanto con La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, como al Pacto Verde Europeo, al fomentar una agricultura sostenible y eficiente, basada en energías limpias, contribuyendo a los objetivos de transición energética y sostenibilidad. La Agenda 2030 es un plan de acción mundial que debe guiar a los gobiernos y a la sociedad en sus futuras decisiones hasta el 2030, el cual consta de diecisiete objetivos cuyas metas están a favor del planeta, las personas y la prosperidad. En este proyecto se pueden alinear a cinco de los objetivos (Desarrollo Sostenible, 2017);

- Objetivo 2 “Hambre Cero” logrando mediante la agricultura en invernaderos aumentar la producción de alimentos incluso en tierras desérticas y aisladas durante todo el año independientemente de los factores climáticos.
- Objetivo 7 “Energía Asequible y No Contaminante”, mediante los paneles fotovoltaicos se produce energía renovable la cual haría un invernadero libre de emisiones contaminantes y contribuyendo así a la mitigación del cambio climático
- Objetivo 6 “Acción por el Clima” ya que este proyecto busca eliminar el consumo de energía fósil en el invernadero logrando así una agricultura más limpia ya que la agricultura es una de las principales fuentes de emisiones de gases efecto invernadero.
- Objetivo 15 “Vida de Ecosistemas Terrestres” los rendimientos de las hortalizas en invernadero pueden ser de tres a diez veces más altos que en el cultivo en campo abierto (Castilla, 2013). Por ello la superficie que demanda un invernadero es inferior a la agricultura tradicional lo cual permite reducir la necesidad de expandir la agricultura a nuevas tierras, preservando los ecosistemas naturales y la degradación del suelo.
- Objetivo 9 “Industria, Innovación e Infraestructura” también estaría dentro de este proyecto ya que ya que los invernaderos autosostenibles combinan la innovación tecnológica, sostenibilidad y eficiencia energética y podrían ser implementado en un futuro en regiones con escasez de recursos.

Con el fin de que Europa sea el primer continente climáticamente neutro para 2050 creo el Pacto Verde Europeo. Este proyecto lograría los objetivos del Pacto Verde Europeo pudiendo solicitar subvenciones y fondos como el “Fondo de Innovación”, el “Fondo de Transición Justa” y el “Mecanismo de Recuperación y Resiliencia” (Ministerio Para La Transición Ecológica, 2019; Comisión Europea, 2019; Ministerio de Hacienda, 2020). Los objetivos que lograrían serían (Cumplir El Pacto Verde Europeo, 2019):

- Neutralidad climática y energía limpia.
- Reducción de emisiones de gases efectos invernaderos gracias a la producción de energía fotovoltaica.
- Resiliencia climática ya que los invernaderos son resistentes al cambio climático.
- Se lograría la Estrategia "De la Granja a la Mesa" consiguiendo un sistema alimentario más saludable y respetuoso con el medio ambiente.

2.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto es realizar un estudio de un invernadero autosostenible energéticamente mediante paneles fotovoltaicos transparentes en Almería.

Además, verificar si es económica y energéticamente rentable incluir esta nueva tecnología fotovoltaica en los invernaderos del “Mar de plástico”.

Para ello, en los siguientes puntos se abarcarán los cálculos y estudios necesarios para investigar acerca de este tema, comenzando por estudiar un área específica de un invernadero.

El desarrollo del estudio abarcará para estas áreas, lo siguientes puntos:

- Análisis de la demanda energética de un área específica de invernadero dentro del “Mar de plástico” en Almería.
- Análisis de las tecnologías disponibles y compatibles para instalar un sistema fotovoltaico sobre el invernadero.
- Diseño del sistema fotovoltaico para autoconsumo.
- Cálculo de la producción del sistema y compatibilización con curva de demanda del invernadero.
- Estudio económico-financiero del sistema y obtención de resultados.

2.2. Tipos de sistemas

Definir brevemente los tipos de sistemas fotovoltaicos existentes nos ayudará a clarificar en qué lugar se encuentra nuestro estudio. Como sabemos, los sistemas pueden dividirse en dos grandes grupos: conectados a la red y aislados. Además, dentro de los sistemas conectados a red, del que trata este trabajo, tenemos los sistemas de autoconsumo o bien sistemas de venta a red eléctrica.

Este trabajo se basa en el estudio de un sistema fotovoltaico para autoconsumo de la demanda de energía de un invernadero. Por ello, será de gran relevancia realizar un análisis previo del perfil de demanda energética de este, con el fin de identificar en que horas, días, meses se encuentran los mayores picos de demanda de esta industria. Con esta información, se podrá realizar un diseño personalizado que se ajuste lo máximo posible a este perfil, evitando desaprovechar esta energía.

También, resulta interesante aclarar que dentro de los autoconsumos hay dos opciones: sin vertido y con vertido de excedentes a la red o venta. Teniendo en cuenta que es muy probable que el perfil de demanda no sea 100% compatible con las horas de sol, lo ideal sería plantear el vertido de toda aquella energía no cubierta por el invernadero para evitar su desaprovechamiento y aumentar la rentabilidad del sistema. Aunque por desgracia, hoy en día esto no es una libre elección, ya que en general habría que buscar nudos en la red de transporte y distribución con capacidad para verter estos excedentes, y estos nudos son muy escasos. Además, cabe mencionar la complicidad que supone el acceso a la red eléctrica, que requiere de mucho tiempo de búsqueda de capacidad en nudos próximos al invernadero, sumado a la dificultad de realizar su trámite.

2.3. Estado de la tecnología actual de los paneles fotovoltaicos transparentes

Los avances en el aprovechamiento de la luz solar están a la orden del día, prueba de ello son las células fotovoltaicas transparentes. Esta tecnología al igual que los módulos fotovoltaicos convencionales, permite obtener electricidad gracias a la luz solar, pero son capaces de dejar pasar luz a través de ellos. Esta característica, ha sido por la cual está comenzando a ser ampliamente utilizado en arquitectura y construcción. (Energy, 2023)

Este tipo de paneles permite el aprovechamiento energético de tejados, fachadas para la producción de electricidad, mientras deja pasar luz con la que poder iluminar el interior de edificios, sin afectar a la estética ni a la funcionalidad. Además, se obtiene con su uso un ahorro en el consumo de calefacción y refrigeración.

Existen varias tecnologías para construcción de estos paneles fotovoltaicos transparente. Los principales dispositivos son los módulos solares de silicio, de perovskita y los orgánicos. Estos últimos, están compuestos por carbono. Destacan por su ligereza y flexibilidad lo que las permite adaptarse a diferentes superficies.

Este tipo de panel orgánico, tienen actualmente una eficiencia de entorno a un 10-15%. Su durabilidad es un reto importante, ya que suelen ser más propensos a la degradación bajo la luz solar y condiciones ambientales como el oxígeno y la humedad. A pesar de tener un rendimiento menor que los de perovskita, ya que estas tienen una eficiencia de entre 15-20%, los OPV (Organic Photovoltaics) están avanzando en estabilidad con materiales mejorados, pero su vida útil tiende a ser más corta en comparación con otras tecnologías fotovoltaicas, rondando los 10 años en la mayoría de los casos. La escuela de ingeniería de Princeton está estudiando disposiciones en las que se puedan combinar células de perovskita y orgánicas con lo que poder tener las ventajas de los 2 dispositivos. (Thompson, 2024)

Uno de los principales retos para el uso de los paneles orgánicos, es su durabilidad. Pero el estudio “Objetivos de rendimiento para la perovskita Investigación Fotovoltaica, Desarrollo y demostración Programas” realizado por la oficina de tecnologías de energía solar del departamento de energías de estados unidos, han logrado extenderla hasta 30 años mediante la inclusión de una capa protectora ultrafina entre las capas de perovskita y de transporte de carga. Este avance ha demostrado que los paneles pueden soportar condiciones al aire libre durante años sin perder eficiencia significativa

Por otro lado, están las células solares de perovskita, las cuales imitan la estructura del mineral natural con el mismo nombre (De La Plaza, 2022). Destacan por su alto rendimiento y por poder ajustar su transparencia. Han tenido un gran auge desde que se inventaron en 2009, ya que su eficiencia ha aumentado rápidamente, pasando de un 3.8% a más del 25% en la actualidad. Incluso se están desarrollando estructuras tándem con las que poder lograr una eficiencia del 30% (Zavia,2023).

La manufactura de las células solares de perovskita es sencilla y supone un menor coste respecto a los paneles tradiciones de silicio, siendo posible producirlas mediante impresión. Además, se están incorporando a estos módulos absorbentes de radiación ultravioleta e infrarroja con el fin de captar de forma selectiva la radiación solar. De esta forma, se evita que atravesase radiación nociva al interior del lugar donde se encuentren instalados los paneles fotovoltaicos. (Cordis, 2022)

Tanto las células de perovskita como las orgánicas representan el futuro de la energía solar, con avances que podrían llevar a la producción de dispositivos más eficientes y adaptables a diferentes necesidades. Sin embargo, actualmente no hay desarrollados módulos comerciales orgánicos ni basados en perovskita, por lo que la opción más viable es la utilización de la tecnología con mayor desarrollo en los sistemas fotovoltaicos, los módulos de silicio.

Los paneles fotovoltaicos transparentes de silicio utilizan una tecnología que adapta el diseño de las celdas solares de silicio convencionales para obtener una transparencia parcial. Esto se logra mediante la creación de celdas en patrones de rejilla o espaciadas, lo que permite que la luz pase entre las celdas o al utilizar materiales fotovoltaicos en capas ultradelgadas. La transparencia varía generalmente entre el 20% y el 70%, dependiendo del diseño (Vallejo,2024). Un mayor nivel de transparencia da como resultado una menor eficiencia. Los niveles de eficiencia para paneles transparentes o semitransparentes suelen oscilar entre el 5% y el 12%, en comparación con el 15%-22% de los paneles convencionales de silicio.

2.4. Estudio de rentabilidad

Como se mencionaba anteriormente en objetivos, una vez se haya realizado el estudio y cálculos del sistema solar fotovoltaico para cubrir la demanda energética del invernadero a estudiar, será conveniente realizar un análisis de rentabilidad económico-financiero con el fin de conocer el verdadero resultado detrás de estudios técnicos. Este estudio será inicialmente aplicado a un área reducida limitada, cuyos resultados posteriormente serán extrapolados a áreas de invernaderos mayores.

Identificar “los números” obtenidos en este trabajo es quizá la parte más interesante si lo enfocamos a la realidad, aunque este no es el objetivo principal de este análisis exhaustivo. En este trabajo, se pretende investigar y llegar al fondo de este asunto independientemente de su resultado. Para ello se ha de tener en cuenta la gran ventaja de realizar un cambio en un área tan extenso de demanda energética como son estos invernaderos, situados en una ubicación privilegiada energéticamente hablando, con bastante radiación solar durante casi todo el año.

Buscar la forma de rentabilizar este cambio energético, puede resultar complicado si lo miramos desde el punto de vista materialista. Un invernadero convencional trata de una construcción de plástico, material barato y en cuyo interior se trabaja con relativamente reducidos consumos eléctricos. Además, sus perfiles de demanda podrían no ser muy compatibles con la construcción de un invernadero fotovoltaico y sostenible, cuya inversión podría ser alta. Todas estas cuestiones, son las que se pretenden clarificar durante el desarrollo del trabajo. Para ello, será interesante plantear varios casos y opciones de implantaciones solares. Hoy en día, hay estudios que corroboran que instalar un sistema fotovoltaico podría cubrir la demanda energética de estos invernaderos, además, aportando un ingreso extra a los productores, en caso de vender la energía solar sobrante a red.

Además, resulta interesante mencionar que actualmente existen ayudas económicas que podrían motivar este cambio energético, como las que se mencionaban al inicio de esta introducción para cumplir con los objetivos principales de Agenda 2030. Parte de este trabajo será analizar las posibles ayudas existentes hoy en día para hacer que este estudio sea algo más rentable económicamente hablando.

▪ *FRAMEWORK FOR METHODOLOGY*

This study evaluates the feasibility of installing a photovoltaic system in a greenhouse located on Avenida de la Ronda del Oeste, El Ejido, in the "Sea of Plastic" region in Almería, Spain.

- Environmental Zone
The area shows low environmental sensitivity for photovoltaic energy, according to the Spanish environmental zoning model. This indicates that the area is suitable for photovoltaic energy projects, although this model primarily applies to large-scale installations for energy sales to the grid, not specifically for self-consumption.
- Environmental Legislation
According to Law 42/2007 on nature conservation, it has been verified that the project area is not within any protected environmental areas such as Natural Parks or Reserves. This ensures that the project is viable from an environmental and land use perspective.
- Solar Resource
Solar irradiance in the area, obtained through PVGIS, varies between 500 W/m² and 1000 W/m², being high in spring and summer. In winter, although lower, it remains significant, suggesting good annual performance for photovoltaic panels. The available irradiance allows for energy use optimization in the greenhouse by adjusting lighting and heating according to sunlight availability.
- Topography
The terrain's flat topography minimizes construction costs and prevents shading on the panels, consolidating the site's suitability for an efficient photovoltaic system installation.
In conclusion, the area presents low environmental sensitivity, excellent solar irradiance, and suitable topography, making the photovoltaic project in this greenhouse viable.
- Greenhouse Analysis
The selected greenhouse, of the "raspa y amagado" type, is located in El Ejido, Almería, and occupies an area of 11,500 m² (1.15 Ha). This structure type is common in Almerian agriculture and is characterized by its sawtooth-shaped roof, which facilitates better thermal insulation. The greenhouse also has a reservoir for irrigation and a storage area for tools and machinery.
- Structural characteristics of the greenhouse:
 - Height in the "raspa" areas: 3.6 m
 - Height in the "amagado" areas: 2.4 m
 - Roof slope: 13°
- Crop and Energy Demand
The projected crop is tomatoes, which maintain a constant resource demand throughout the year. Greenhouses in Almería have intensive electricity consumption, powering equipment such as irrigation pumps, climate control, and pressure systems. According to studies, up to 80% of electricity consumption occurs during solar hours, making these greenhouses ideal for photovoltaic panel installation.

- Estimated energy consumption:
Annual demand: between 15,000 and 30,000 kWh per hectare, with an annual average of 23,050 kWh for 1.5 hectares.
- Seasonal Consumption Profile
 - Heating: High demand in winter, decreasing in spring and autumn, and not needed in summer.
 - LED lighting: Mainly in winter due to fewer daylight hours, though reduced in summer.
 - Fans: Intensive use in summer.
 - Irrigation and climate control: Constant throughout the year.

The detailed energy demand analysis will allow for the optimization of a photovoltaic system design to meet the greenhouse's energy needs, adjusting energy production to seasonal consumption patterns.

3. METODOLOGÍA Y DATOS

3.1.1. Emplazamiento

El estudio se va a realizar para un invernadero localizado en Avenida de la Ronda del Oeste, El Ejido, Andalucía, España (36.774631°, -2.827565°), esta localidad forma parte del llamado “Mar de plástico” de Almería (Ilustración 1).

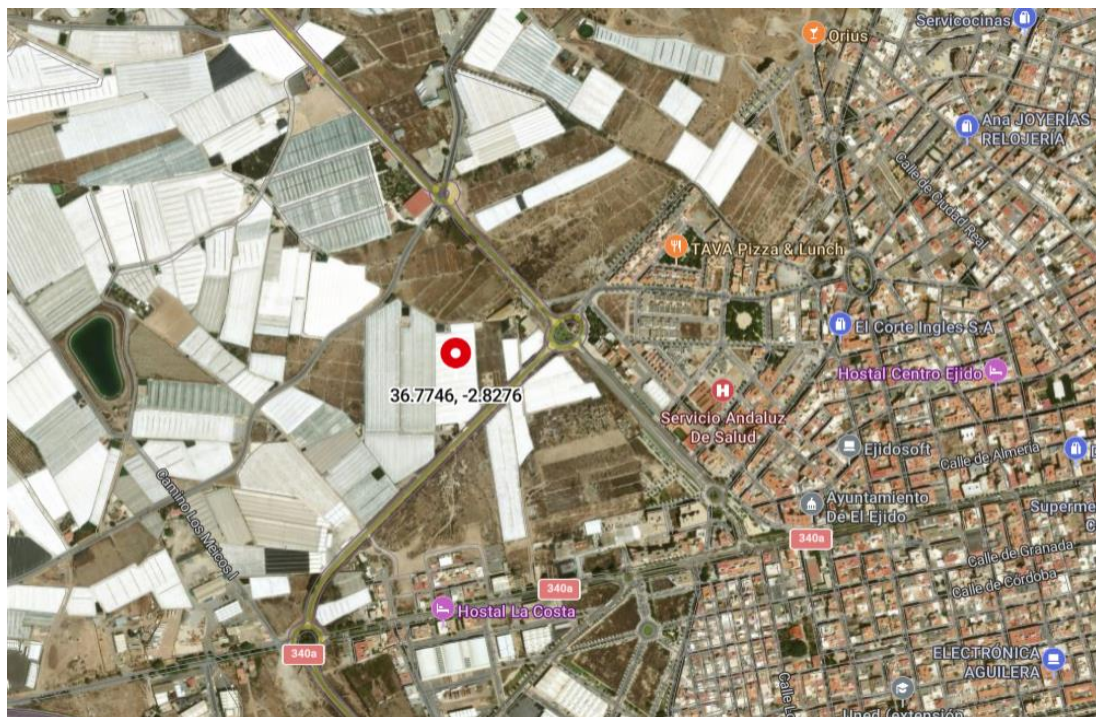


Ilustración 1 - Localización del invernadero a estudiar (500 ft, 200m) (Fuente: Microsoft Bing)

3.1.2. Planeamiento

El modelo de zonificación ambiental para la implantación de energías renovables, fotovoltaica, en esta zona tiene una baja sensibilidad ambiental (Ilustración 2). Este modelo de estudio se refiere a grandes instalaciones de producción de energía cuyo fin es su venta a la red no a instalaciones de autoconsumo.

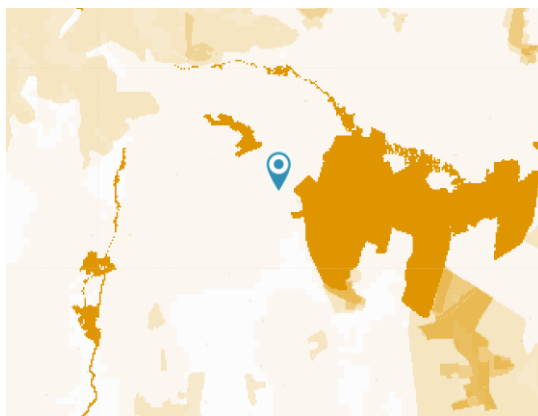


Ilustración 2 - Modelo de zonificación ambiental, sensibilidad ambiental energía fotovoltaica, presenta una baja tonalidad naranja lo que indica una baja sensibilidad ambiental (Fuente: Geo Portal del ministerio de agricultura, pesca y alimentación)

3.1.3. Ambiental

La Legislación estatal (Ley 42/2007) promueve la conservación de la naturaleza, con cinco figuras de protección; Parques y Reservas Naturales, Áreas Marinas Protegidas, Monumentos Naturales y Paisajes Protegidos. Como se muestra en la Ilustración 3, el área elegida para el proyecto no se encuentra dentro de ninguna protección ya que no esté marcado en ningún color. Asegurando así la viabilidad del proyecto.



Ilustración 3 - Espacios Naturales Protegidos (ENP) en el emplazamiento (Fuente: Geo Portal del ministerio de agricultura, pesca y alimentación)

3.1.4. Recurso solar

La siguiente gráfica (Ilustración 4) muestra valores de irradiancia obtenidos de PVGIS. La irradiancia varía entre 500 W/m² y 1000 W/m² durante la mayor parte del año. Esto indica una buena disponibilidad de energía solar, especialmente en los meses de primavera y verano (abril a septiembre). Incluso en meses de invierno (enero y diciembre), aunque la irradiancia es menor, sigue siendo significativa, lo que sugiere que la instalación fotovoltaica podría funcionar de manera eficiente durante todo el año.

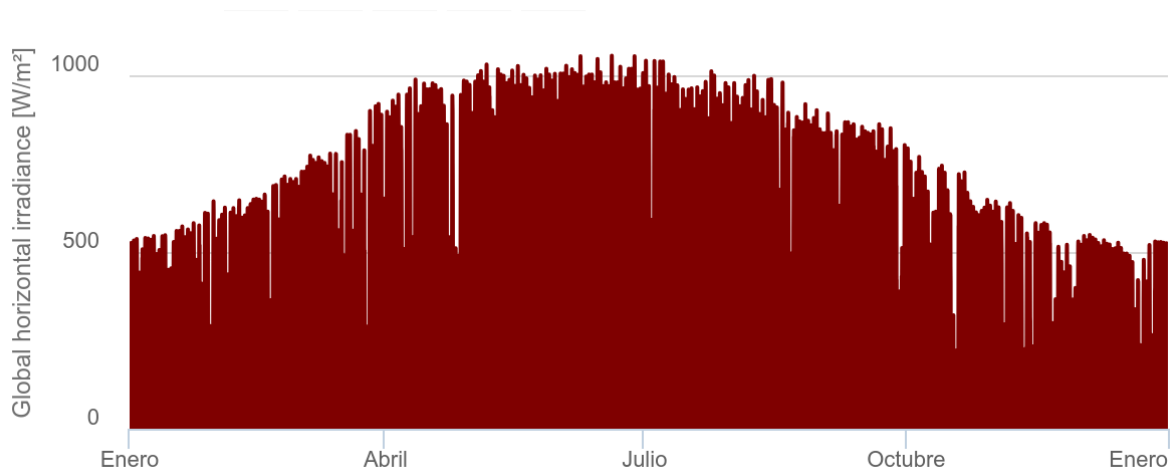


Ilustración 4 - Año meteorológico típico mediante PVGIS, 2024 en el emplazamiento

Cabe destacar que la gráfica de irradiancia (Ilustración 4) también proporciona información clave para optimizar el consumo de energía de un invernadero en Almería, ya que se puede ajustar el uso de iluminación y calefacción de acuerdo con la luz solar disponible. Esta grafica se volverá a estudiar en el apartado de demanda energética de los elementos que conforman el invernadero.

3.1.5. Topografía

Para la ubicación del invernadero se ha de tener en cuenta el desnivel donde se encuentra, siendo el menor posible. Esto reduciría el coste de construcción y mantenimiento. Eliminando también las posibles sombras en los paneles. Como se observa en la ilustración 5, el área elegida carece de relieves siendo una zona ideal para los futuros paneles solares.

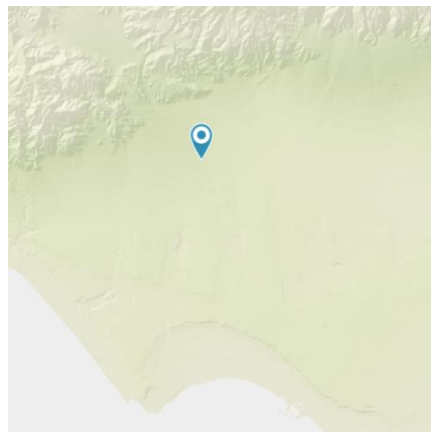


Ilustración 5 - Relieve en el emplazamiento (Fuente: Geo Portal del ministerio de agricultura, pesca y alimentación)

3.2. Análisis del invernadero

Para realizar el análisis de la demanda energética se ha de caracterizar primero el tipo de invernadero para así poder estimar la demanda. A continuación, se van a desarrollar las características del invernadero seleccionado para este estudio. Como se ha comentado anteriormente el invernadero se encuentra en El Ejido, Almería y equivale a un área de 11.500 m² (1,15 Ha), como se muestra en la imagen inferior.

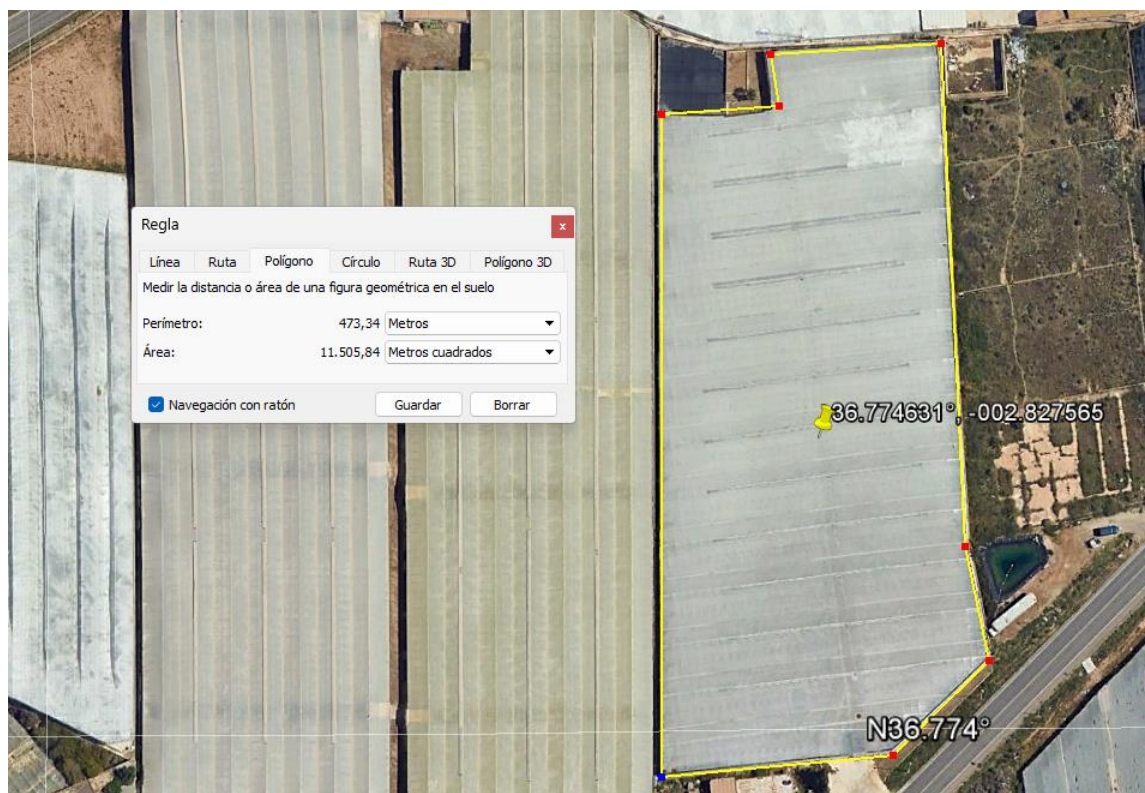


Ilustración 6 - Área del invernadero a estudiar (Fuente: Google Earth)

El invernadero seleccionado equivale con un tipo “raspa y amagado” (Ilustración 7) y es la principal elección entre agricultores almerienses. Este tipo de estructuras presenta una cubierta que se quiebra en una sierra con pendientes de entre 6-20°, a los picos de las sierras se les llama “raspas” y los valles “amagados”. El espacio entre amagados es “capilla”. Esta forma permite un mejor aislamiento respecto al exterior. Adicionalmente, los invernaderos disponen normalmente de un embalse para mejorar la regulación del riego. Además de disponer de un pequeño almacén para recursos, maquinaria y herramientas (Sistemas Hortícolas Almería, 2022; D. L. Valera et al, 2014).

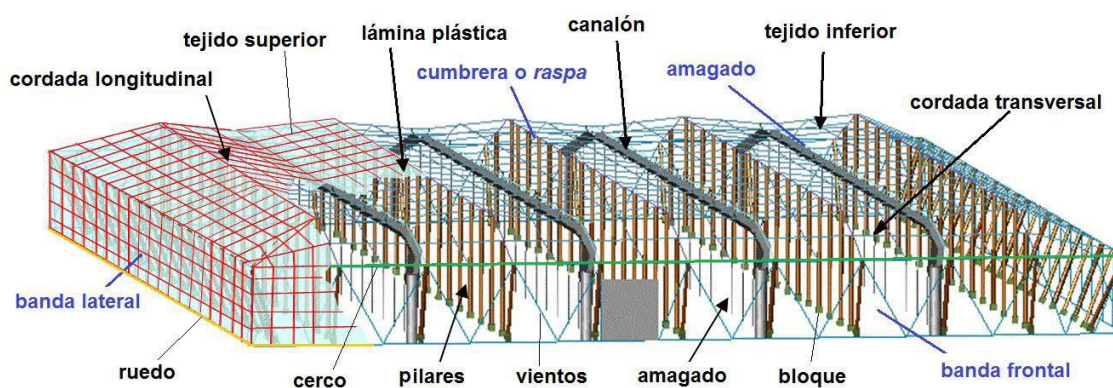


Ilustración 7 - Tipo de invernadero “raspa y amagado” (D. L. Valera et al, 2014)

Se considerará un espacio de las siguientes características:

- Invernaderos de superficie 1,15 Ha
- Altura de raspa invernadero: 3,6 m

- Altura de amagado invernadero: 2,4 m
- Pendientes de las cubiertas 13º

En Almería el cultivo en invernaderos es muy variado, las hortalizas más producidas desde inicios fueron tomate, pimiento y pepino con muy buenos resultados. Aunque actualmente también se producen otros productos como: berenjena, calabacín, melón, sandía, etc. Normalmente, son explotaciones familiares. Además, cabe mencionar que también influirá el tipo de invernadero, existiendo así mismo el tipo “parral”, “raspa y amagado” y multitúnel (Ministerio de agricultura y pesca, 2024; Sistemas Hortícolas Almería, 2022).

En este proyecto se ha supuesto que el invernadero abarcará el cultivo y producción de tomates (Hernández et al., 2015), por ser un tipo de cultivo que suele mantener una demanda más o menos estable a lo largo de todos los días del año. Según investigaciones, los invernaderos son lugares que hoy en día tienen un consumo eléctrico muy intenso equivalente a sus diferentes dispositivos (bombas de riego, equipos de presión, climatización, etc.), además, se conoce que hasta el 80% de este consumo se realiza en horas solares. Por tanto, con estas características, estos lugares se convierten en ideales para instalar paneles solares, reduciendo así su factura eléctrica, además de contribuir de manera sostenible con la energía verde (Energía Fotovoltaica En Invernaderos, 2024).

Como se detallaba en el punto 2.2 de la Introducción, para nuestro tipo de sistema de autoconsumo, será fundamental conocer previamente el perfil de consumos eléctricos del invernadero, identificando consumos máximos mínimos por meses, días, horas, épocas del año. Esta información será crucial para hacer un buen diseño del sistema fotovoltaico en el área de invernadero seleccionada.

La demanda energética de los invernaderos en Almería según López Díaz, G, 2021 tiene una demanda de energía eléctrica entre 15.000 – 30.000 kWh anuales por hectárea. Esta demanda energética procede de los equipos de iluminación LED, ventiladores, calefacción, sistemas de riego y control climático el cual es una herramienta fundamental para gestionar las condiciones climáticas internas del invernadero, permitiendo regular de manera precisa los niveles de temperatura, humedad y dióxido de carbono. Todos los elementos anteriormente mencionados, son fundamentales para un desarrollo óptimo de las plantas a cultivar.

La demanda mensual del invernadero (Tabla 1) se ha calculado basándose en un valor de demanda media de anual de 23.050 kWh para 1,5 hectárea (Almería según López Díaz, G, 2021). A partir de este dato anual según la irradiancia en cada mes se ha estimado la demanda por mes. La demanda energética depende principalmente del consumo de ventiladores y calefacción que están relacionados con la irradiancia solar (Ilustración 4) y mediante el documento el documento proporcionado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) sobre el Ahorro y eficiencia energética en invernaderos, se han estimado el número de elementos y el consumo por unidad que consumirán energía en cada mes.

- La calefacción tiene una alta demanda en invierno (enero, febrero, noviembre, diciembre), reduciéndose en primavera y otoño (marzo, abril, octubre) y en verano (mayo-septiembre) se prescinde de ella.
- La iluminación Led se demanda principalmente en invierno al haber menos horas de luz y se disminuye en verano, aunque sigue siendo necesaria para días nublados.
- Los ventiladores se demandan principalmente en verano (junio, julio, agosto).

- En cuanto al riego y control climático la demanda no varía al cabo del año ya que se ha supuesto que la cantidad de riego es constante y el control climático siempre está en funcionamiento.

Mes	Calefacción (kWh)	Iluminación LED (kWh)	Ventiladores (kWh)	Riego (kWh)	Control Climático (kWh)	Consumo Total (kWh)
Enero	1500	1000	200	20	55	2.775
Febrero	1300	900	200	20	55	2.475
Marzo	900	800	300	20	55	2.075
Abril	500	700	400	20	55	1.675
Mayo	0	600	700	20	55	1.375
Junio	0	550	800	20	55	1.425
Julio	0	500	900	20	55	1.475
Agosto	0	500	900	20	55	1.475
Septiembre	0	600	700	20	55	1.375
Octubre	500	700	400	20	55	1.675
Noviembre	1200	800	300	20	55	2.375
Diciembre	1600	1000	200	20	55	2.875
ANUAL	7500	8650	6000	240	660	23.050

Tabla 1 - Consumos del invernadero de 1,15 Ha para cada mes del año

3.3. Tipos de tecnología

3.3.1. Células solares de perovskita

Se trata de una tecnología que ha ganado popularidad en los últimos años debido a su potencial en la producción de energía solar. Estas, llegan a alcanzar eficiencias del 25% en laboratorios y se espera superar el 30% con mejoras a futuro.

Estas, debido al constante desarrollo de la técnica de producción, en poco tiempo se requerirá menor temperatura para la producción de estas, con ello una reducción en costos y consumo de energía. Además, sus formatos pueden ser flexibles y ligeros, permitiendo aplicaciones en superficies curvas y para dispositivos portables. Ya que se ha demostrado que también trabajan bien en poca iluminación, podrían ser utilizadas en condiciones de nublado o polución en ciudades intermedias, cada vez más extensas. Por otro lado, las células de perovskita tienen gran degradación cuando son expuestas a la humedad, luz ultravioleta y altas temperaturas.

Por otro lado, las células de perovskita tienen una gran degradación cuando están expuestas a humedad, luz ultravioleta y altas temperaturas. Otro problema que presentan es la utilización de plomo en su fabricación, lo que compromete la sostenibilidad. Se están implementando alternativas sin plomo, aunque debido esto se reduciría el rendimiento. Otra desventaja es que no se ha desarrollado una forma de producción en masa que no evite la degradación y pérdida de propiedades de los paneles.



Ilustración 8 - Lámina de células de perovskita (Fuente: Magazine reciclados)

Características Técnicas

- **Materiales:** Las celdas de perovskita generalmente contienen haluros metálicos, como yoduro de plomo o compuestos de estaño. Existen alternativas en desarrollo que buscan reemplazar el plomo.
- **Eficiencia:** Las investigaciones han reportado eficiencias de laboratorio de hasta el 29.15% en celdas de perovskita, y con nuevas estrategias de apilamiento y diseño se esperan mejoras.
- **Tamaño y formato:** Las celdas se pueden fabricar en tamaños variables, desde pequeñas áreas para dispositivos portátiles hasta módulos grandes para instalaciones solares.



Ilustración 9 - Célula solar de perovskita (Fuente: Ecoinventos)

Precio

El costo de la producción de células solares de perovskita varía dependiendo del método de fabricación y las unidades producidas. Sin embargo, en una producción masiva, se estiman entre

0.1\$ a 0.2\$ USD por vatios, aunque estos valores pueden variar en el futuro según la evolución de la tecnología y el mercado.

Producción Energética

En términos de producción, las células de perovskita tienen gran potencial, con puntos de generación de entre 100 W/m² y 200 W/m² bajo condiciones óptimas. Otros factores que intervienen y producirán una variación de generación de energía serán la inclinación, la orientación y las condiciones ambientales al igual que en todos los módulos fotovoltaicos. La capacidad de producción seguirá mejorando en el futuro a medida que los investigadores resuelvan el problema de la estabilidad.

3.3.2. Células fotovoltaicas orgánicas

Las células solares orgánicas (CSO) son una de las tecnologías más novedosas para la producción de energía eléctrica mediante la conversión de radiación solar utilizando compuestos orgánicos.

Las células solares orgánicas son ligeras y pueden fabricarse en formatos flexibles, lo que las hace de gran utilidad para aplicaciones en superficies curvadas y dispositivos portátiles. En cuanto a la fabricación, hay métodos a baja temperatura que, junto con la utilización de materiales comunes, reduce considerablemente el costo de producción frente a las celdas de silicio. Además, los materiales de fabricación son menos tóxicos que las células de silicio y perovskita.

Algunas CSO son parcialmente transparentes, lo que permite su integración en ventanas y fachadas de edificios.

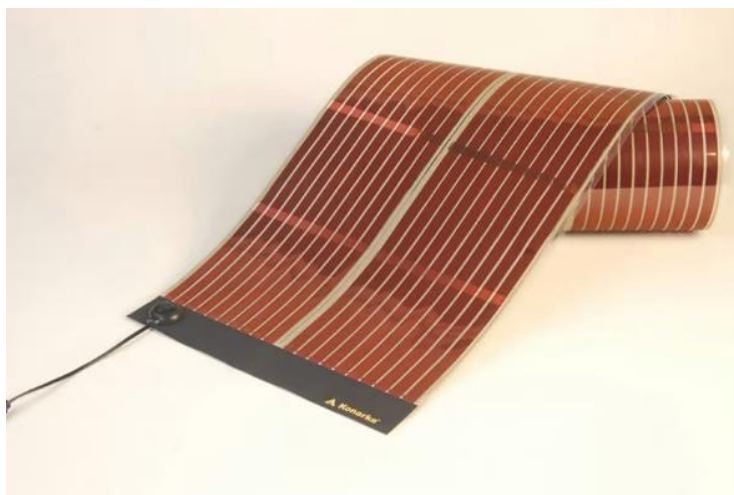


Ilustración 10 - Célula solar orgánica Konarka (Fuente: New Atlas)

En cambio, la eficiencia de las células solares orgánicas (CSO) es menor que la de las células de silicio y perovskita, alcanzando entre el 3% y el 15% en aplicaciones comerciales. Además, la degradación causada por factores ambientales, como la humedad y la luz ultravioleta, genera el problema constante que arrastran los módulos fotovoltaicos, la limitada vida útil. La producción a gran escala y la consistencia en la calidad de las células siguen siendo desafíos en el desarrollo de esta tecnología.

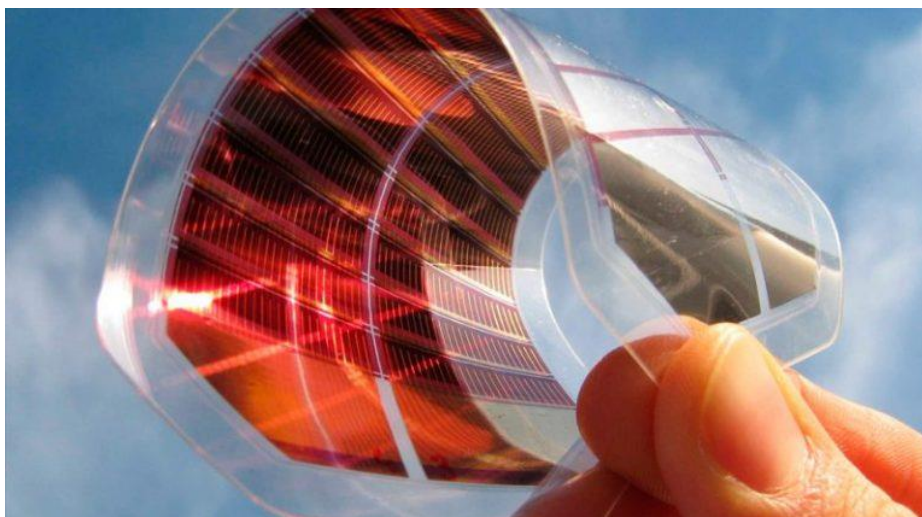


Ilustración 11 - Célula solar orgánica flexible (Fuente: Academia de Ciencias de Morelos)

Precio

El costo de producción de las células solares orgánicas se estima entre 0.05\$ y 0.4\$ por vatio. Este rango puede variar según el método de fabricación y el volumen de producción. La tendencia a la baja en costos es prometedora a medida que la tecnología avanza.

Producción Energética

Generalmente, producen entre 50 y 100 W/m² en condiciones óptimas. La eficiencia puede verse afectada por la exposición a la humedad y otros factores externos.

3.3.3. Células fotovoltaicas de silicio

Las células fotovoltaicas de silicio son una innovación en la que se mezcla la madurez ya existente de los módulos de silicio cristalino, con el diseño que permite el paso de luz a través de estos.

Las células solares de silicio transparentes tienen gran cabida en la integración en elementos móviles, vehículos y edificación donde se puede apoyar la generación de electricidad sin dejar de lado la iluminación en los interiores. Uno de los puntos negativos que encontramos con esta tecnología es la pérdida de eficiencia debido al diseño, provocando una menor densidad de células en el panel, llevando a una menor eficiencia en la conversión de radiación solar en energía eléctrica.

Si las comparamos con otras tecnologías solares, como las células de perovskita o las células orgánicas, las células de silicio transparentes ofrecen mayor estabilidad y durabilidad. El silicio ha demostrado una gran resistencia a la degradación ambiental, lo que otorga a estas células una vida útil prolongada, incluso bajo exposición constante a la luz ultravioleta y la humedad.

Sin embargo, su eficiencia es menor que la de las células solares de silicio convencionales debido a la necesidad de equilibrar la transparencia con la capacidad de generar energía. El rendimiento típico de estas células ronda entre el 10% y el 15%, dependiendo del grado de transparencia y los métodos de fabricación utilizados. Este nivel es inferior al de las células solares de silicio opacas, que pueden alcanzar eficiencias superiores al 20%.



Ilustración 12 - Módulos fotovoltaicos de silicio transparentes (Fuente: Solitek)

Fabricantes Actuales

- Solitek: Empresa europea especializada en la fabricación de paneles solares de silicio cristalino de alta eficiencia. Además de en sus productos convencionales, Solitek se enfoca en el desarrollo de soluciones fotovoltaicas integradas y sistemas solares sostenibles.
- Onyx Solar: Enfocados en soluciones fotovoltaicas integradas en edificios (BIPV), incluyendo células solares de silicio transparente.
- BriteSolar: Fabricante especializado en el desarrollo de vidrio fotovoltaico transparente, enfocado en soluciones para agricultura y arquitectura sostenible.

Características Técnicas

- Materiales: Utilizan silicio cristalino o policristalino, optimizado para dejar pasar parte del espectro visible de luz mientras absorben el infrarrojo.
- Eficiencia: La eficiencia varía según el grado de transparencia, con eficiencias comerciales típicas de entre 10% y 15%.
- Tamaño y formato: Estas células pueden integrarse en ventanas de edificios, lunas de automóviles y dispositivos portátiles, sin alterar significativamente la apariencia o funcionalidad de las superficies.



Ilustración 13 - Techo solar con módulo agro fotovoltaicos (Fuente: BriteSolar)

Precio

Las células solares de silicio convencional tienen un precio aproximado de 0.25 \$ por vatio. Sin embargo, el costo de las células solares de silicio transparentes es 1.5 veces mayor que el de las células convencionales de silicio debido a los procesos adicionales necesarios para lograr la transparencia. Con el desarrollo de esta tecnología, se espera que el precio vaya descendiendo a lo largo de los años.

Producción Energética

En condiciones óptimas, las células solares de silicio transparentes pueden generar entre 100 y 200 W/m², dependiendo principalmente de la transparencia. Aunque su eficiencia es menor que la de otras tecnologías, su capacidad para generar energía sin alterar el diseño sustancialmente de los elementos donde se incorporan las hace una opción atractiva para el desarrollo de edificios sostenibles.

3.3.4. Elección de las Células fotovoltaicas.

A continuación, se añade una tabla resumen con las características de las células solares explicadas anteriormente:

Característica	Células de Perovskita	Células Solares Orgánicas (OPV)	Células Solares de Silicio Cristalino Transparente
Costo de fabricación	10-20 centavos por vatio	5-10 centavos por vatio	30-40 centavos por vatio
Material	Perovskita (compuestos de plomo, haluros)	Polímeros orgánicos o moléculas pequeñas	Silicio cristalino modificado
Eficiencia	15-20% (prototipos comerciales)	5-10% (prototipos comerciales)	10-15% (dependiendo de la transparencia)
Durabilidad	10-20 años	5-10 años	20-30 años
Flexibilidad	Alta, se pueden aplicar en superficies curvas o flexibles	Muy alta, pueden integrarse en textiles y dispositivos flexibles	Baja, estructura rígida
Madurez tecnológica	En desarrollo, más avanzada que las orgánicas	En desarrollo, aplicaciones comerciales limitadas	Tecnología madura, variante transparente en continua mejora
Manejo ambiental	Riesgo por uso de plomo (se buscan alternativas sin plomo)	Materiales orgánicos, pero algunos solventes tóxicos en el proceso	Menor impacto, pero fabricación de silicio intensiva en energía
Estabilidad bajo condiciones extremas	Moderada, sensible a la humedad y altas temperaturas	Baja, sensible a la humedad, el oxígeno y la luz UV	Alta, resistente a condiciones ambientales extremas
Transparencia	50-70% de transparencia en versiones experimentales	Hasta 80-90% de transparencia (pueden ser casi transparentes)	20-70% de transparencia, dependiendo del diseño
Impacto ambiental	Uso de plomo plantea riesgos, aunque en cantidades pequeñas	Materiales orgánicos, generalmente amigables con el medio ambiente	Bajo, pero fabricación requiere alta energía
Producción en vatios por metro cuadrado	150-250 W/m ² (dependiendo de la eficiencia y la luz disponible)	50-100 W/m ² (dependiendo de la eficiencia y la luz disponible)	100-200 W/m ² (dependiendo de la eficiencia y la luz disponible)

Tabla 2 - Resumen comparativo células transparentes de Perovskita, orgánicas y de silicio.

Atendiendo a la tabla anterior, se podrían tener dudas respecto a que tipo de célula utilizar para la implantación de los paneles fotovoltaicos. De acuerdo con el costo de fabricación que, en definitiva, el precio de final de la instalación es de los puntos más importantes a tener en cuenta, sería conveniente adoptar paneles de células orgánicas. Por otro lado, si nos fijamos en la

producción en vatios por metro cuadrado, parece que la opción más acertada sería escoger los paneles de perovskita. Sin embargo, debido a la madurez de la célula de silicio, a la continua mejora e implementación en el diseño de los paneles agrovoltáicos y a la durabilidad en condiciones de humedad y altas temperaturas, hace que sea la mejor opción para el desarrollo del proyecto.

3.4. Sistema fotovoltaico

Definidos los tipos de tecnologías compatibles con la implantación de un sistema solar fotovoltaico sobre un invernadero, se va a diseñar y dimensionar el sistema detallando sus principales características. Para ello, se tendrán en cuenta los datos de demanda mensual ya descritos, que condicionarán el tamaño del sistema y número de paneles a instalar para cubrir el mayor porcentaje posible. Para realizar los cálculos de producción y diseño, se ha recurrido al programa de simulación PVSyst. Este, permite obtener los datos más importantes de la instalación, a partir de la definición de la ubicación exacta del invernadero y las características del lugar donde se implantará.

Como se indicaba anteriormente, se trata de una cubierta tipo “raspa y amagado”. En el caso del invernadero seleccionado, este dispone de una ubicación muy adecuada, donde las “raspas” disponen de una orientación prácticamente sur, con una inclinación de 13º, valores compatibles con el mayor aprovechamiento de la radiación solar en horas de sol. Para esta ubicación, cuanto mayor acercamiento a un azimuth Sur y una inclinación próxima a los 20-25º, mejor será la producción del sistema. Por tanto, en base a esto, los paneles a instalar se situarán en las superficies de las cubiertas que miran al sur, es decir, en la zona de las “raspas”.

Además, como dato de partida, se usará la base de datos meteorológicos de Meteonorm/PVGis para la simulación.

Tras realizar una búsqueda exhaustiva de tipos de paneles transparentes, se ha decidido seleccionar un modelo del fabricante Eurener, modelo MEPV Agro Perc, tecnología de silicio monocristalino con 275 Wp de potencia y un 45% de transparencia. Puesto que no es una tecnología muy avanzada, se ha tratado de seleccionar un modelo relativamente reciente. Por otro lado, se han seleccionado inversores de Sungrow, fabricante conocido y de calidad, seleccionando los modelos que más se adecuen. En el Anexo I se podrá consultar las fichas técnicas de los componentes seleccionados. En la tabla 3 se muestran los datos de partida.

Datos de partida	
Ubicación	36.774631, -2.827565 Almería
Tipo de cubierta	Invernadero “Raspa y amagado”
Inclinación de cubiertas	13º
Azimuth	7º Sur-este
Base de datos meteorológicos	Meteonorm/PVGis
Módulos fotovoltaicos	Células de silicio monocristalino transparentes. Eurener MEPV AGRO 275 Wp
Inversor	Sungrow

Tabla 3 Datos de partida sistema FV

3.4.1. Distribución de paneles

Se realiza la simulación teniendo en cuenta dos opciones:

1. Autoconsumo sin excedentes. Diseño del sistema suponiendo que, de la demanda total, el 80% se consume en horas de sol.
2. Autoconsumo con excedentes acogido a compensación. Diseño del sistema cubriendo toda la cubierta, autoconsumiendo el 80% de horas de sol, y vendiendo el resto de energía a la red.

Opción 1:

Esta opción trata de un modelo de autoconsumo sin excedentes, en la cual, se dimensionará el sistema fotovoltaico teniendo en cuenta que, de la demanda total del sistema, un 80% de la misma se demanda en horas de sol. Por tanto, se dimensionará obteniendo una potencia instalada razonable y sabiendo que la energía fotovoltaica que no sea autoconsumida no será vendida a la red, mediante la aplicación de un sistema antivertido.

Según se indicó anteriormente, el invernadero objeto de estudio dispone de una demanda eléctrica anual de unos 23.050 kWh/año, de la cual suponemos que el 80% será consumida en horas de sol, por tanto, se consumirá 18.440 kWh/año en horas de sol. Como el objetivo es producir con nuestra implantación hasta alcanzar ese 80% de la demanda, es decir, obtener una producción lo más cercana a 18.440 kWh/año, se tomará la fórmula de la Yield para dimensionar la potencia pico del sistema.

Por otro lado, se conoce que en esta zona de España el valor de horas equivalentes ronda aproximadamente los 1.500 kWh/kWp (PVGIS). A partir de este valor, se estimará el tamaño estimado que debería tener nuestra implantación para obtener unos resultados aceptables:

$$Yield \text{ o horas equivalentes } \left(\frac{kWh}{kWp} \right) = \frac{Energia \text{ producida } \left(\frac{kWh}{año} \right)}{Potencia \text{ pico instalada } (kWp)} \quad [1]$$

$$Potencia \text{ instalada } (kWp) = \frac{Energia \text{ producida } \left(\frac{kWh}{mes} \right)}{Horas \text{ equivalentes } \left(\frac{kWh}{kWp} \right)} \quad [2]$$

Aplicando esta fórmula para el valor del 80% demanda objetivo, se obtiene:

$$Potencia \text{ instalada } (kWp) = \frac{18.440 \left(\frac{kWh}{mes} \right)}{1.500 \left(\frac{kWh}{kWp} \right)} = 12,3 \text{ kWp}$$

Por tanto, obtenemos una instalación de autoconsumo fotovoltaico de 12,3 kWp instalados. El nº de módulos aproximado necesarios para la implantación sería:

$$N^o \text{ módulos} = \frac{12.300 \text{ Wp}}{275 \text{ Wp}} = 44 \text{ módulos}$$

Para estos cálculos, se tiene en cuenta que no todos los meses consumen lo mismo, y que habrá meses más desfavorables que otros, y con más excedentes o menos. Esto se puede consultar en la tabla 6 referente al balance energético.

En el punto 4 se indicará el sistema finalmente planteado para esta opción.

Opción 2:

Esta segunda opción hace referencia a un modelo de autoconsumo con excedentes acogido a compensación. Se tratará de llenar toda la cubierta de paneles, de cuya producción, se autoconsumirá todo lo necesario teniendo en cuenta que el 80% de la demanda se realiza en horas de sol, y vendiendo a la red toda la energía excedentaria.

Como se indicó, los paneles se situarían en las rasas sur de las cubiertas. El área correspondiente a las rasas es de 7.617 m², es decir, un 66% aproximadamente del área total considerando que estas disponen de 13º de inclinación. El área del módulo seleccionado es de 1,94 m².

$$N^{\circ} \text{ módulos aprox} = \frac{7.617 \text{ m}^2}{1,94 \text{ m}^2} = 3.926 \text{ módulos}$$

$$\text{Potencia instalada} = 3.926 \text{ módulos} * 275 \text{ Wp} = 1.079,65 \text{ kWp}$$

Por tanto, si se quisiera ocupar todo el invernadero con paneles, se instalaría en torno a 1 MWp de potencia. En el punto 4 se indicará el sistema finalmente planteado para esta opción.

3.4.2. Producción de energía

Empleamos la herramienta PVSyst para calcular la producción mensual de ambas opciones. En Anexos se podrá consultar los informes de producción de las dos opciones contempladas.

Para realizar los cálculos de producción, se tuvo que definir el sistema final basándonos en los cálculos previos realizados el punto 3.4.1., ajustando el número final de módulos e inversores compatibles para obtener un sistema optimizado, agrupando correctamente los módulos en serie y paralelo, y así obteniendo un buen ratio AC/DC.

En la siguiente tabla, se adjunta un resumen de la producción mensual generada en cada opción, para posteriormente, en el punto 3.4.3. realizar el balance energético de los resultados.

Opción 1:

Mes	Demanda energética (kWh)	80% de la demanda (KWh)	Producción FV (kWh)
Enero	2.775	2.220	988
Febrero	2.475	1.980	1.186
Marzo	2.075	1.660	1.647
Abril	1.675	1.340	1.872
Mayo	1.375	1.100	1.949
Junio	1.425	1.140	2.161
Julio	1.475	1.180	2.183
Agosto	1.475	1.180	1.991
Septiembre	1.375	1.100	1.623
Octubre	1.675	1.340	1.337
Noviembre	2.375	1.900	1.077
Diciembre	2.875	2.300	888
	23.050	18.440	18.902

Tabla 4 Cálculo de la producción FV mensual Opción 1

Opción 2:

Mes	Demanda energética (kWh)	80% de la demanda (KWh)	Producción FV (kWh)
Enero	2.775	2.220	88.381
Febrero	2.475	1.980	106.193
Marzo	2.075	1.660	147.398
Abril	1.675	1.340	167.563
Mayo	1.375	1.100	174.416
Junio	1.425	1.140	193.390
Julio	1.475	1.180	195.194
Agosto	1.475	1.180	177.970
Septiembre	1.375	1.100	145.326
Octubre	1.675	1.340	119.771
Noviembre	2.375	1.900	96.435
Diciembre	2.875	2.300	79.552
	23.050	18.440	1.691.589

Tabla 5 Cálculo de la producción FV mensual Opción 2

3.4.3. Balance energético

A continuación, sabiendo los datos de producción de las dos opciones contempladas, se realizará un balance de energía para conocer los valores mensuales y porcentajes de autoconsumo FV, excedentes de energía, cobertura de la demanda y consumo de red. En las tablas 6 y 9 se observan los resultados:

Opción 1: Autoconsumo sin excedentes; 12,1 kWp

Mes	Demanda energética (kWh)	80% de la demanda (KWh)	Producción FV (kWh)	Autoconsumo real (kWh)	Autoconsumo FV (%)	Excedentes (kWh)	Excedentes (%)	Cobertura demanda (kWh)	Consumo de la red (kWh)	Consumo de la red (%)
Enero	2.775	2.220	988	988	100%	0	0%	36%	1.787	64%
Febrero	2.475	1.980	1.186	1.186	100%	0	0%	48%	1.289	52%
Marzo	2.075	1.660	1.647	1.647	100%	0	0%	79%	428	21%
Abril	1.675	1.340	1.872	1.340	72%	532	28%	80%	335	20%
Mayo	1.375	1.100	1.949	1.100	56%	849	44%	80%	275	20%
Junio	1.425	1.140	2.161	1.140	53%	1.021	47%	80%	285	20%
Julio	1.475	1.180	2.183	1.180	54%	1.003	46%	80%	295	20%
Agosto	1.475	1.180	1.991	1.180	59%	811	41%	80%	295	20%
Septiembre	1.375	1.100	1.623	1.100	68%	523	32%	80%	275	20%
Octubre	1.675	1.340	1.337	1.337	100%	0	0%	80%	338	20%
Noviembre	2.375	1.900	1.077	1.077	100%	0	0%	45%	1.298	55%
Diciembre	2.875	2.300	888	888	100%	0	0%	31%	1.987	69%
TOTAL	23.050	18.440	18.902	14.163	75%	4.739	25%	61%	8.887	39%

Tabla 6 Balance energético opción 1

Donde:

Demanda energética: demanda total del invernadero en kWh/mes

80% de la demanda: cálculo del 80% de la demanda total, que es lo consumido en horas de sol en kWh/mes

Autoconsumo real: Energía FV auto consumida sobre el consumo en horas de sol (80% de la demanda) kWh/mes

Cobertura de la demanda: Autoconsumo real sobre la demanda total del sistema en %

Opción 2: Autoconsumo con excedentes; 1080 kWp.

Mes	Demanda energética (kWh)	80% de la demanda (KWh)	Producción FV (kWh)	Autoconsumo real (kWh)	Autoconsumo FV (%)	Excedentes (kWh)	Excedentes (%)	Cobertura demanda (kWh)	Consumo de la red (kWh)	Consumo de la red (%)
Enero	2.775	2.220	88.381	2.220	3%	86.161	97%	80%	555	20%
Febrero	2.475	1.980	106.193	1.980	2%	104.213	98%	80%	495	20%
Marzo	2.075	1.660	147.398	1.660	1%	145.738	99%	80%	415	20%
Abril	1.675	1.340	167.563	1.340	1%	166.223	99%	80%	335	20%
Mayo	1.375	1.100	174.416	1.100	1%	173.316	99%	80%	275	20%
Junio	1.425	1.140	193.390	1.140	1%	192.250	99%	80%	285	20%
Julio	1.475	1.180	195.194	1.180	1%	194.014	99%	80%	295	20%
Agosto	1.475	1.180	177.970	1.180	1%	176.790	99%	80%	295	20%
Septiembre	1.375	1.100	145.326	1.100	1%	144.226	99%	80%	275	20%
Octubre	1.675	1.340	119.771	1.340	1%	118.431	99%	80%	335	20%
Noviembre	2.375	1.900	96.435	1.900	2%	94.535	98%	80%	475	20%
Diciembre	2.875	2.300	79.552	2.300	3%	77.252	97%	80%	575	20%
TOTAL	23.050	18.440	1.691.589	18.440	1%	1.673.149	99%	80%	4.610	20%

Tabla 7 Balance energético opción 2

Donde:

Demanda energética: demanda total del invernadero en kWh/mes

80% de la demanda: cálculo del 80% de la demanda total, que es lo consumido en horas de sol en kWh/mes

Autoconsumo real: Energía FV auto consumida sobre el consumo en horas de sol (80% de la demanda) kWh/mes

Cobertura de la demanda: Autoconsumo real sobre la demanda total del sistema en %

3.5. Análisis económico financiero

3.5.1. Estudio área limitada

Una vez analizadas las dos opciones, se va a realizar un análisis comparativo en cuanto a la inversión inicial entre ambas configuraciones fotovoltaicas para el invernadero de 1,5 hectáreas. Se va a proponer dos sistemas de inversión, con y sin baterías, estudiando así si sería rentable no depender de la red eléctrica.

En la siguientes Tablas 8 y 9, se recogen los valores de excedentes y consumo a la red con o sin batería. Como se observa en las Tablas 8 y 9, sin usar baterías el invernadero tendría que depender de la red eléctrica en ciertas horas del día. En la primera opción (Tabla 8) los meses de abril a septiembre se obtienen excedentes que pueden ser almacenados en baterías, pudiendo así ser autosostenible energéticamente esos meses y en la segunda opción (Tabla 9) mediante el uso de batería se volvería 100% autosostenible energéticamente. El dimensionamiento de las baterías se realizará a partir del mes que se deba almacenar más energía eléctrica siendo; en la 1 opción el mes de abril con 335 kWh y en la segunda opción 575 kWh el mes de diciembre. Estos valores máximos de almacenamiento serán los que se utilizarán para la estimación de las inversiones de las baterías.

Mes	SIN BATERIAS		CON BATERIAS		
	Excedentes (kWh)	Consumo de la red (kWh)	Almacenamiento en baterías (kWh)	Consumo de la red con baterías (kWh)	Excedentes para posible venta en la red (kWh)
Enero	0	1.787	0	1.787	0
Febrero	0	1.289	0	1.289	0
Marzo	0	428	0	428	0
Abril	532	335	335	0	197
Mayo	849	275	275	0	574
Junio	1.021	285	285	0	736
Julio	1.003	295	295	0	708
Agosto	811	295	295	0	516
Septiembre	523	275	275	0	248
Octubre	0	338	0	338	0
Noviembre	0	1.298	0	1.298	0
Diciembre	0	1.987	0	1.987	0
Total anual	4739	8.887	1760	7.127	2.979

Tabla 8 Excedentes y consumos de la red para la opción 1

	SIN BATERIAS		CON BATERIAS		
Mes	Excedentes (kWh)	Consumo de la red (kWh)	Almacenamiento en baterías (kWh)	Consumo de la red con baterías (kWh)	Excedentes para venta en la red (kWh)
Enero	86.161	555	555	0	85.606
Febrero	104.213	495	495	0	103.718
Marzo	145.738	415	415	0	145.323
Abril	166.223	335	335	0	165.888
Mayo	173.316	275	275	0	173.041
Junio	192.250	285	285	0	191.965
Julio	194.014	295	295	0	193.719
Agosto	176.790	295	295	0	176.495
Septiembre	144.226	275	275	0	143.951
Octubre	118.431	335	335	0	118.096
Noviembre	94.535	475	475	0	94.060
Diciembre	77.252	575	575	0	76.677
Total anual	1.673.149	4.610	4.610	0	1.668.539

Tabla 9 Excedentes y consumos de la red para la opción 2

Para realizar el análisis económico se va a suponer un coste promedio de la instalación de 1.000-1.200 €/kWp, para instalaciones grandes superiores a 100 kWp es decir la segunda opción se utilizara un valor de 1.200 €/kWp y para la primera opción se considerara 1.000 €/kWp. Este coste promedio tiene en cuenta los siguientes elementos (Renewable Power Generation Costs in 2023, 2024):

- Módulos fotovoltaicos: Representan el mayor porcentaje del costo total del sistema. En el caso de los módulos Eurener Agro PERC MEVP 275, el costo dependerá de la cantidad de módulos necesarios para alcanzar la potencia deseada.
- Inversores: Convierten la corriente continua (DC) generada por los paneles solares en corriente alterna (AC) para su uso en la red eléctrica.
- Estructura de soporte: Las estructuras que sostienen los módulos solares en el tejado del invernadero. Los sistemas de montaje, las fijaciones y las estructuras necesarias para optimizar la inclinación y orientación.
- Cableado y conexiones: El cableado necesario para conectar los módulos entre sí y conectarlos al inversor y a la red eléctrica.
- Sistemas de protección eléctrica: Incluyen fusibles, interruptores y protecciones contra sobretensiones para garantizar la seguridad del sistema.
- Mano de obra, permisos y licencias, seguros, estudios previos y costes financieros entre otros.

Para ambos sistemas se ha decidido utilizar las baterías Tesla Megapack con un coste aproximado entre 150-300 €/kWh (Tesla, 2021; El tejado solar, 2024). El precio de las baterías se calculará mediante el mes con más almacenamiento es decir para 335 kWh de almacenamiento en la opción 1 y 575 kWh en la opción 2. En la Tabla 10 se recogen los valores de inversión con y sin batería para ambas opciones. En la opción 1 se incrementa la inversión 5 veces más solo por el coste de la batería y en la opción 2 la inversión con batería aumenta entorno al 9% respecto sin batería.

	Opción 1	Opción 2
Potencia instalada (kWp)	12,1	1.079,9
Coste promedio de la instalación (€/kW)	1.000	1.200
Coste de las baterías (€)	50.250,0	115.000
Estimación de costes de inversión sin baterías (€)	12.100	1.295.910
Estimación de costes de inversión con baterías (€)	62.350	1.410.910

Tabla 10 Inversión inicial para la opción 1 y 2, con y sin baterías

Para calcular el ahorro anual en costes de electricidad, se ha de conocer el precio por kWh que el invernadero pagaría a su proveedor de electricidad. Se va a estimar un valor medio de 0,1106 €/kWh (Preciogas, 2024) para los próximos 25 años. En cuanto a la venta de excedentes a la red se ha consultado el mercado OMIP el cual ofrece las estimaciones a largo plazo del precio medio de la energía en España, obteniendo un valor de 52,54 €/MWh en España del 2025 al 2049 (25 años). A partir de estos datos de compra y venta de electricidad, en las Tablas 14 y 15 se estima los ahorros de consumo eléctrico, las ganancias por venta a la red y el coste de la electricidad en los casos en el que la electricidad producida por los sistemas fotovoltaicos no alcanza la demanda del invernadero. Con el fin de obtener los beneficios netos anuales (Bn) y el periodo de recuperación obtenidos mediante las siguientes expresiones [3] Y [4]:

$$Bn = \text{Ahorros por autoconsumo} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) + \text{Ganacias por venta a la red} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) - \text{Coste de electricidad a la red} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right) \quad [3]$$

$$\text{Periodo de recuperacion (años)} = \frac{\text{Costes de inversión totales (€)}}{Bn \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right)} \quad [4]$$

Como se observan en la Tabla 11, en la cual se recogen los datos de las dos opciones de sistemas fotovoltaicos sin uso de batería. Se ha obtenido un periodo de recuperación de 14,5 años para ambas opciones, que indica que el tiempo para recuperar la inversión sería el mismo. En cambio, en la segunda opción la cual es el sistema fotovoltaico de autoconsumo con excedentes acogido a compensación (diseño del sistema cubriendo toda la cubierta) produce unos beneficios netos anuales de 89.436,8 €, produciendo unos beneficios 107 veces superiores a los obtenidos en la opción 1 que representa el sistema de autoconsumo sin excedentes.

	Opción 1	Opción 2
Estimación de costes de inversión totales (€)	12.100	1.295.910
Producción (kWh)	18.902	1.691.589
Autoconsumo sin baterías (kWh)	14.163	18.440
Excedentes (kWh)	4.739	1.673.149
Consumo de electricidad a la red (kWh)	8.887	4.610
Precio medio de la energía durante los próximos 25 años (€/MWh)	110,6	110,6
Estimación de Ahorros por autoconsumo (€/año)	1.566,4	2.039,5
Precio medio venta a la red de la energía durante los próximos 25 años (€/MWh)	52,54	52,54
Estimación de ganancias por venta a la red (€/año)	249,0	87.907,2
Coste de electricidad a la red (€/año)	982,9	509,9
Beneficios netos (€/año)	832,5	89.436,8
Retorno de la inversión (ROI) (%)	6,88	6,90
Periodo de recuperación (años)	14,5	14,5

Tabla 11 Ahorros de consumo eléctrico, las ganancias por venta a la red y el coste de la electricidad, para las opciones 1 y 2 sin baterías

En cuanto a la estimación para las dos opciones de sistema fotovoltaicos con uno de batería para poder almacenar la energía y utilizarla en las horas que no se produzca radiación solar. Se ha obtenido (Tabla 12) un periodo de recuperación para la opción uno de 55,2 años, debido a la alta inversión que supone la batería, la cual solo almacenaría energía los meses de abril a septiembre. Por ello esta opción de autoconsumo sin excedentes con batería se ha de descartar. En cuanto al periodo de recuperación para la opción dos es de 15,6 años con beneficios anuales de 90.214,4 €, 80 veces superiores a la opción 1.

	Opción 1	Opción 2
Estimación de costes de inversión totales (€)	62.350	1.410.910
Producción (kWh)	18.902	1.691.589
Excedentes almacenados en baterías(kWh)	1.760	4.610
Autoconsumo con baterías (kWh)	15.923	23.050
Consumo de electricidad a la red (kWh)	7.127	0
Excedentes venta a la red (kWh)	2.979	1.668.539
Precio medio de la energía durante los próximos 25 años (€/MWh)	110,6	110,6
Estimación de Ahorros por autoconsumo (€/año)	1.761,1	2.549,3
Precio medio venta a la red de la energía durante los próximos 25 años (€/MWh)	52,5	52,5
Estimación de ganancias por venta a la red (€/año)	156,5	87.665,0
Coste de electricidad a la red (€/año)	788,2	0
Beneficios netos (€/año)	1.129,4	90.214,4
Retorno de la inversión (ROI) (%)	1,81	6,38
Periodo de recuperación (años)	55,2	15,6

Tabla 12 Ahorros de consumo eléctrico, las ganancias por venta a la red y el coste de la electricidad, para las opciones 1 y 2 con uso de baterías

3.5.2. Ayudas existentes

Atendiendo a las características del proyecto desarrollado, existen ayudas y subvenciones con las que beneficiar y reducir costos de la implantación de paneles fotovoltaicos.

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) establece en la disposición 15413 del BOE, las bases reguladoras de la convocatoria para las ayudas a proyectos innovadores de energías renovables (MITECO,2024).

Según indica la disposición anteriormente mencionada:

Se subvencionarán proyectos enfocados a impulsar la innovación en energías renovables en las siguientes líneas de actuación:

Programa de incentivos 1: Proyectos innovadores de instalaciones agrivoltaicas con almacenamiento.

- Subprograma 1.1: Agrivoltaica intercalada con el cultivo.
- Subprograma 1.2: Agrivoltaica con estructura sobre el cultivo $2\text{ m} \leq h \leq 4\text{ m}$

Actuaciones de generación fotovoltaica	Módulo Generación máximo [Ayuda (€/kWp)]		
	10 kWp < P ≤ 100 kWp	100 kWp < P ≤ 1.000 kWp	P > 1.000 kWp
1. Proyectos innovadores de agrivoltaica.			
1.1. Agrivoltaica intercalada con el cultivo.	1.000	800	600
1.2. Agrivoltaica con estructura sobre cultivo $2\text{ m} \leq h \leq 4\text{ m}$.	1.150	950	750
1.3. Agrivoltaica con estructura sobre cultivo $h > 4\text{ m}$.	1.300	1.100	900

Ilustración 14 - Ayudas para proyectos innovadores de agrivoltaica. (Fuente: BOE.es)

El Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE), dependiente del MITECO, será el encargado de la organización y gestión de las ayudas con carácter definitivo.

Además, también se pueden aprovechar subvenciones ofrecidas por la junta de Andalucía como es la “Ayuda a inversiones productivas en explotaciones agrarias. Modernización genérica (Submedida 4.1)” ofrecida por el organismo de agricultura, pesca, agua y desarrollo rural. Esta financiación, tiene como objetivo la modernización de explotaciones, la mejora del rendimiento y la sostenibilidad. La instalación de paneles fotovoltaicos en invernaderos se vería beneficiados por esta medida con ayudas máximas de entre 120.000€ y 200.000€ por beneficiario. (JuntadeAndalucía,2024)

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Diseño del sistema fotovoltaico

	Opción 1	Opción 2
Potencia instalada (kWp)	12,1	1079,9
Potencia módulo (Wp)	275	275
Modelo módulo	Eurener Agro PERC MEPV 275	
Nº de módulos en serie	22	33
Nº de strings	2	119
Nº de módulos total	44	3927
Potencia de inversor (kWn)	10	125
Modelo inversor	SG10RT	SG125CX
Nº inversores	1	7
Potencia total inversores (kWn)	10	875
Ratio DC/AC	1,21	1,23
Producción (kWh/año)	18.902	1.691.589
Horas equivalentes (kWh/kWp)	1.562	1.566
PR (%)	77,9%	78,1%

Tabla 13 Resumen del sistema fotovoltaico

4.2. Demanda vs producción

A continuación, en las imágenes 15 y 16, se muestra la superposición de curvas energéticas provenientes del balance energético realizado en el punto 3.4.3. Se pueden observar los resultados mensuales para cada una de las opciones:

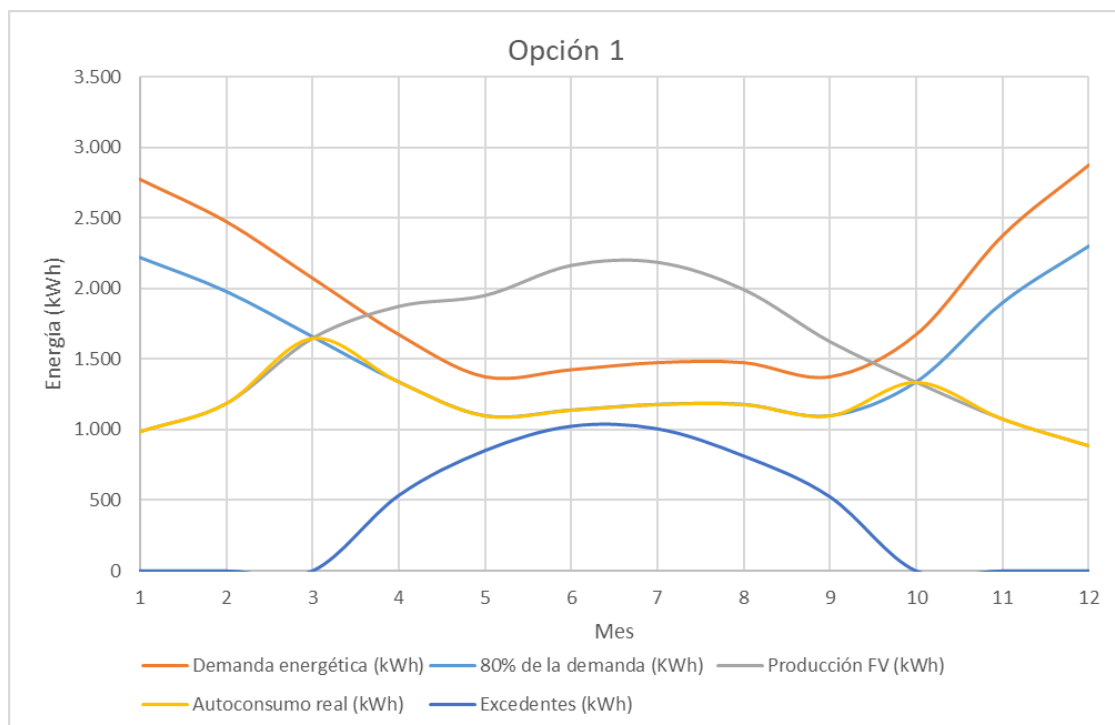


Ilustración 15 Comparación curvas energéticas opción 1

En la opción 1 se observa cómo, al ser una implantación un 99% más pequeña que la opción 2, se adapta mejor al modelo de autoconsumo propiamente dicho, obteniendo que se auto consume un 75% sobre la producción FV total, con tan solo un 25% de excedentes; y, además, se cubre con el autoconsumo un 61% de la demanda total reduciendo la factura eléctrica y tan solo demandando de la red eléctrica un 39% de la demanda total. Aunque los resultados de reducción de la factura eléctrica sean algo menos que en la opción 2, habrá que basarse en el análisis económico-financiero realizado para comprobar la rentabilidad de implantar una instalación de 12,1 kWp frente a una de 1080 kWp. En el punto 4.3 se comprueba la viabilidad de los sistemas.

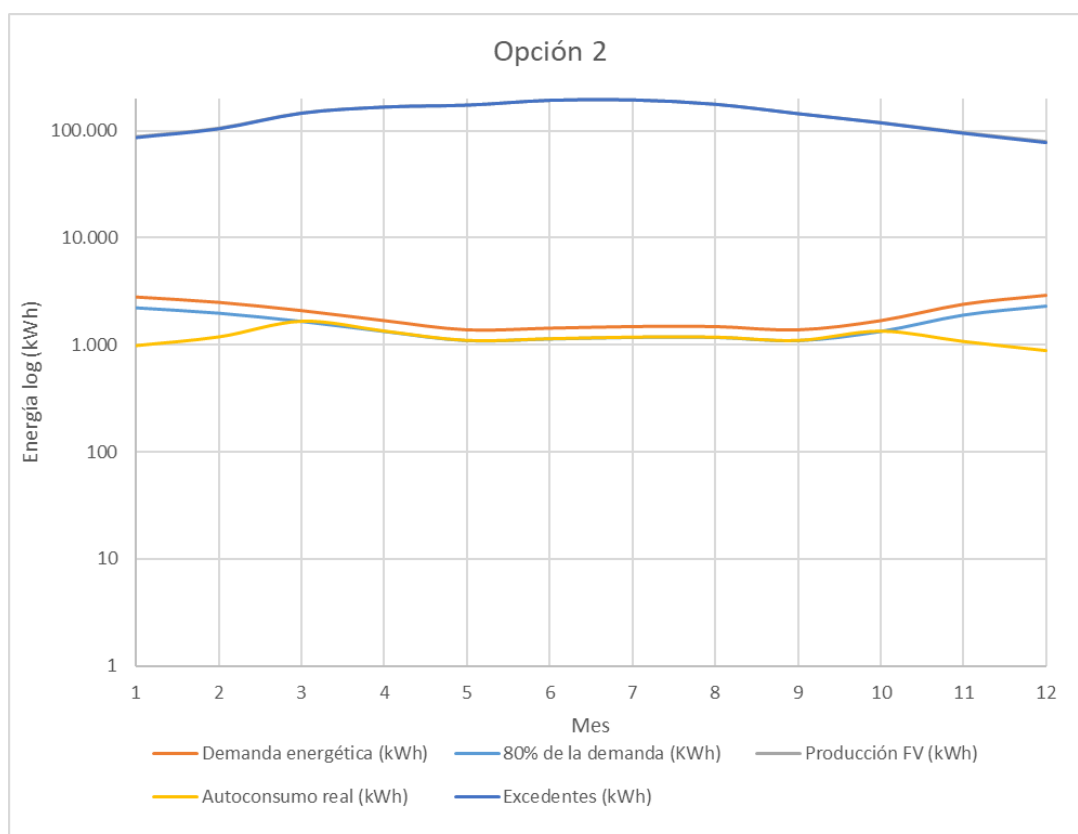


Ilustración 16 Comparación curvas energéticas opción 2, (en escala logarítmica (base 10) en el eje Y)

Por otro lado, en la opción 2, vemos que la producción es un 90% mayor que en la opción 1. En resultados de autoconsumo, se adapta menos a este modelo, donde solo se autoconsume un 1% de la producción FV total, con un 99% de excedentes; aunque, conseguiríamos un 80% de reducción de la factura, tan solo demandando de la red eléctrica un 20% de la energía total demandada.

Este modelo estaría más enfocado a vender la energía a la red para recibir compensación económica por ella. Este tema quedaría supeditado a la solicitud de acceso y conexión del punto de evacuación más próximo al invernadero y que disponga de capacidad real para evacuar. Hay que destacar que este trámite suele ser largo y tedioso, puesto que actualmente hay muy poco nudos con capacidad. Igualmente, en el punto 3.5. se ha comprobado su rentabilidad económico-financiera frente a la opción 1 en términos de autoconsumo, suponiendo que esta energía pudiera venderse. En el punto 4.3 se comprueba la viabilidad de los sistemas.

4.3. Viabilidad

A continuación, se va a analizar que opciones son las más viables económicamente, en la Tabla 14 se encuentra el resumen de la inversión, beneficios netos y periodo de recuperación para cada caso.

- Opción 1:
 - A) Autoconsumo sin excedentes y sin batería para almacenar la energía.
 - B) Autoconsumo sin excedentes y con batería para almacenar la energía.
- Opción 2:
 - A) Autoconsumo con excedentes acogido a compensación y sin batería para almacenar la energía.
 - B) Autoconsumo con excedentes acogido a compensación y con batería para almacenar la energía.

Se compara primero la opción 1 de autoconsumo sin excedentes, con o sin batería. Se obtiene que el periodo de recuperación para la inversión de la opción 1 con batería es de 55,2 años, lo que lo hace inviable económicamente y quedaría eliminada de la elección. Esto es debido al elevado precio de la batería, la cual solo se va a utilizar durante los meses de abril a septiembre, teniendo que depender energéticamente los demás meses del año de la red. En cambio, para la opción 1 sin batería el tiempo de recuperación sería de 14,5 años.

En cuanto a la opción 2 de autoconsumo con excedentes acogido a compensación, con o sin batería. El periodo de recuperación en la opción 2 con batería es de 1,1 año superior al de sin batería y solo se obtendría un 1% más de beneficio neto. Por ello económicamente la opción 2 sin batería sería la más viable debido a que requiere una menor inversión inicial. Pero cabe destacar que el no usar baterías haría al invernadero depender siempre energéticamente de la red para las horas de baja o nula radiación solar.

Confrontando las opciones sin uso de batería se obtiene un periodo de recuperación igual de 14,5 años, pero los beneficios netos de la opción 2 son 107 veces superiores, debido a que se está vendiendo a la red una gran cantidad de energía. Por ello la opción 2 sin batería sería más viable económicamente en cuanto a beneficios netos, aunque cabe destacar que el coste de inversión es 107 veces superior a la opción de solo autoconsumo sin excedentes.

En resumen, el tipo de instalación fotovoltaica dependerá principalmente de la cantidad de dinero que se tiene para invertir y de la dependencia energética que se quiera tener con la red.

- Si no se quiere depender energéticamente de la red la opción 2, autoconsumo con excedentes acogido a compensación con baterías, será la más favorable siendo autosostenible energéticamente al 100%, con ventas de excedentes a la red. Con beneficios netos anuales de 90.214,4 €/año y un retorno de la inversión de 6,4%.
- Si se quiere realizar una menor inversión y se puede depender de energéticamente de la red, se utilizará la opción 2, autoconsumo con excedentes acogido a compensación sin baterías, siendo la opción con mayor retorno de inversión (6,9%) y beneficios netos (89.436,8€/año).
- Y por último si la inversión ha de ser mucho menor y se puede depender de energéticamente de la red, se utilizará la opción 1, autoconsumo sin excedentes sin batería con un retorno de inversión de 6,9% y beneficios netos de 832,5 €/año

	Sin batería		Con batería	
	Opción 1	Opción 2	Opción 1	Opción 2
Inversión inicial	12.100	1.295.910	62.350	1.410.910
Estimación de Ahorros por autoconsumo (€/año)	1.566,4	2.039,5	1.761,1	2.549,3
Estimación de ganancias por venta a la red (€/año)	249,0	87.907,2	156,5	87.665,0
Coste de electricidad a la red (€/año)	982,9	509,9	788,2	0,0
Beneficios netos (€/año)	832,5	89.436,8	1.129,4	90.214,4
Retorno de la inversión (ROI) (%)	6,9	6,9	1,8	6,4
Periodo de recuperación (años)	14,5	14,5	55,2	15,6

Tabla 14 Resumen de la inversión, beneficios netos y periodo de recuperación.

5. CONCLUSIONES

Se ha logrado realizar un estudio exhaustivo acerca del autoconsumo energético mediante placas solares transparentes en uno de los invernaderos dentro de un área tan extensa como lo es el “Mar de plástico”. Este proyecto se alinea con los objetivos de sostenibilidad al reducir la huella de carbono del invernadero mediante el uso de energía renovable. Por ello se podrían solicitar varias ayudas del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), mejorando la viabilidad económica. Además, evita la creación de sombras en el cultivo al permitir el paso de luz a través de los paneles, lo que favorece el crecimiento y calidad del producto.

Se va a utilizar placas solares del fabricante Eurener, el modelo MEPV Agro Perc. Con tecnología de silicio monocristalino con 275 Wp de potencia y un 45% de transparencia. Aunque las células fotovoltaicas de perovskita y orgánicas presentan avances prometedores, actualmente el silicio transparente es la opción más adecuada para este proyecto debido a su disponibilidad comercial, mayor durabilidad y menor tasa de degradación en condiciones de alta humedad y temperaturas extremas.

El invernadero estudiado tiene una demanda energética de estimada de 23.050 kWh, variando de 2.875- 1.375 kWh/mes. Se han valorado diseñar dos opciones, buscando que se cubra un 80% de la demanda;

- Autoconsumo sin excedentes: Con una potencia instalada de 12,1 kWp, con módulos de 275 Wp (modelo Eurener Agro PERC MEPV 275). Está configurada con 44 módulos en total, organizados en series de 22 módulos y 2 strings. Utiliza un único inversor SG10RT de 10 kW, resultando en una relación DC/AC de 1,21. La producción anual estimada es de 18.902 kWh, con 1562 horas equivalentes (kWh/kWp) y un rendimiento (PR) del 77,9%.
- Autoconsumo con excedentes acogido a compensación: Con una potencia instalada de 1079,9 kWp y también con módulos de 275 Wp del mismo modelo. Tiene un total de 3927 módulos organizados en series de 33 módulos y 119 strings. La instalación cuenta con 7 inversores SG125CX, alcanzando una potencia total de inversores de 875 kW y una

relación DC/AC de 1,23. Su producción anual estimada es de 1.691.589 kWh, con 1566 horas equivalentes (kWh/kWp) y un rendimiento (PR) del 78,1%.

La implementación de paneles fotovoltaicos transparentes en el invernadero es una alternativa viable para cubrir la mayor parte de su demanda energética. La opción de autoconsumo con excedentes ofrece la posibilidad de generar ingresos adicionales mediante la venta a la red.

En cuanto al análisis económico de las opciones planteadas; un sistema fotovoltaico destinado al autoconsumo del invernadero con o sin batería y un sistema fotovoltaico destinado al autoconsumo con venta a la red con o sin baterías de almacenamiento. La opción de autoconsumo con baterías ha sido desestimada debido al alto periodo de recuperación (55,2 años) siendo inviable económicamente. Debido a la alta inversión de las baterías las cual solo serán utilizadas en determinados meses. Las tres siguientes opciones sí han resultado viablemente económicas:

- Autoconsumo sin excedentes y sin batería para almacenar la energía.
- Autoconsumo con excedentes acogido a compensación y sin batería para almacenar la energía.
- Autoconsumo con excedentes acogido a compensación y con batería para almacenar la energía.

Y el usuario deberá elegir la opción más adecuada, dependiendo de sus prioridades.

- **Autosuficiencia energética:** si el usuario quiere una mayor autosuficiencia energética la opción de instalación fotovoltaica con baterías sería la elegida, alcanzando un 100% de independencia de la red eléctrica durante todo el año. Siendo la opción con una inversión inicial mucho más alta (1.410.910€).
- **Periodo de recuperación:** Ambas opciones sin batería presentan un periodo de recuperación de 14,5 años, mientras que la opción con baterías con venta de excedentes a la red tiene un periodo de 1,1 año más. La inclusión de baterías en el sistema eleva la inversión y prolonga el periodo de retorno, aunque permitiría un mayor grado de independencia energética.
- **Beneficios:** En cuanto a la opción de autoconsumo sin excedentes y sin batería ofrece beneficios 11 veces inferiores a las dos opciones de autoconsumo con excedentes. Los beneficios de las opciones de autoconsumo con excedentes acogido a compensación ofrecen beneficios netos superiores debido a la venta de electricidad, siendo un 1% mayor en la instalación con baterías ya que tiene la posibilidad de almacenar excedentes y evitar el costo de la electricidad de la red. Esto implica una ventaja económica a largo plazo.
- **Recomendaciones según el tipo de usuario:**
 1. Autoconsumo sin excedentes y sin batería para almacenar la energía: Si el objetivo es reducir la inversión inicial y aprovechar al máximo las horas de radiación solar, teniendo siempre disponible electricidad de la red eléctrica. La opción sin baterías resulta más rentable a corto plazo y representa una inversión más conservadora.
 2. Autoconsumo con excedentes acogido a compensación y sin batería para almacenar la energía: Si el usuario se puede permitir una mayor inversión (107 veces mayor que la anterior opción, siendo esta opción de 1.295.910 € de inversión inicial) y tiene

disponibilidad de conexión a la red eléctrica, se recomienda la opción de autoconsumo con excedentes acogido a compensación y sin batería. Con una mayor inversión, pero mayores beneficios por venta a la red.

3. Autoconsumo con excedentes acogido a compensación y con batería para almacenar la energía: Para usuarios que buscan autosuficiencia total y están dispuestos a realizar una inversión significativa (9% superior a la anterior opción, siendo esta opción de 1.410.910€ de inversión inicial). La opción con baterías y venta de excedentes a la red es la más adecuada. Este sistema garantiza independencia de la red y maximiza los beneficios anuales, aunque su periodo de recuperación sea de un año mayor a las dos opciones anteriores.

El análisis demuestra que es fundamental considerar tanto los beneficios económicos como la independencia energética en el desempeño de la alternativa fotovoltaica en un entorno agrícola.

De cara a una futura ampliación de este trabajo, sería interesante evaluar algunos puntos adicionales:

- Extrapolar los resultados existentes de un área específica a un área de invernaderos mayor, con la posibilidad de aprovechar todos los invernaderos existentes en la zona. Proporcionando una opción sostenible para reducir la dependencia de la red eléctrica y promover la agricultura eficiente en el "Mar de Plástico"
- Indagar más en los tipos de tecnologías tanto a nivel de módulos e inversor, como de baterías, ya que actualmente se realizan muchos ensayos y estudios que en un futuro permitirán mejorar la rentabilidad y viabilidad de uso de baterías. Además, se podría investigar más a fondo acerca de la viabilidad estructural de este tipo de invernaderos con la implantación de módulos sobre ellos. Se puede evaluar periódicamente los avances en tecnologías fotovoltaicas de perovskita y orgánicas, dado su potencial de mejora en eficiencia y coste. A medida que estas tecnologías se desarrollen, podrían representar una alternativa viable y rentable a los módulos de silicio.

■ CONCLUSIONS

An exhaustive study on energy self-consumption using transparent solar panels has been successfully conducted in one of the greenhouses within the extensive area known as the "Sea of Plastic." This project aligns with sustainability objectives by reducing the greenhouse's carbon footprint through renewable energy use. For this reason, several subsidies from the Ministry for the Ecological Transition and Demographic Challenge, could be requested, enhancing economic feasibility. Additionally, it avoids casting shadows on the crops by allowing light to pass through the panels, benefiting crop growth and quality.

The project will use solar panels from the manufacturer Eurener, the MEPV Agro Perc model. These panels use monocrystalline silicon technology, with a power output of 275 Wp and 45% transparency. Although perovskite and organic photovoltaic cells show promising advances, transparent silicon remains the most suitable option for this project due to its commercial availability, greater durability, and lower degradation rate under high humidity and extreme temperatures.

The studied greenhouse has an estimated energy demand of 23,050 kWh, ranging from 2,875–1,375 kWh/month. Two design options have been evaluated to cover 80% of this demand:

- Self-consumption without surplus: With an installed capacity of 12.1 kWp using 275 Wp modules (Eurener Agro PERC MEPV 275 model). It consists of 44 modules organized into two series of 22 modules each and two strings. A single SG10RT inverter of 10 kW is used, resulting in a DC/AC ratio of 1.21. The estimated annual production is 18,902 kWh, with 1,562 equivalent hours (kWh/kWp) and a performance ratio (PR) of 77.9%.

- Self-consumption with surplus eligible for compensation: With an installed capacity of 1,079.9 kWp using the same 275 Wp modules. It comprises 3,927 modules arranged in series of 33 modules across 119 strings. The installation includes seven SG125CX inverters, with a total inverter capacity of 875 kW and a DC/AC ratio of 1.23. The estimated annual production is 1,691,589 kWh, with 1,566 equivalent hours (kWh/kWp) and a performance ratio (PR) of 78.1%.

Implementing transparent photovoltaic panels in the greenhouse is a viable alternative to cover most of its energy demand. The surplus self-consumption option offers the possibility of generating additional income through grid sales.

Regarding the economic analysis of the proposed options, a photovoltaic system for the greenhouse's self-consumption with or without batteries, and a photovoltaic system with surplus sale to the grid with or without storage batteries, were considered. The self-consumption option with batteries was ruled out due to a high payback period (55.2 years), making it economically unfeasible due to the high cost of batteries, which would only be used in specific months. The following three options have proven economically viable:

- Self-consumption without surplus and without energy storage batteries.
- Self-consumption with surplus eligible for compensation and without energy storage batteries.
- Self-consumption with surplus eligible for compensation and with energy storage batteries.

The user must choose the most suitable option depending on their priorities.

- **Energy self-sufficiency:** If the user desires greater energy self-sufficiency, the photovoltaic installation option with batteries would be the best choice, achieving 100% independence from the electrical grid year-round. This option involves a much higher initial investment (€1,410,910).
- **Payback period:** Both battery-free options present a payback period of 14.5 years, while the option with batteries and surplus sales to the grid extends the payback period by 1.1 years. Adding batteries increases the investment and prolongs the payback period, although it would allow for greater energy independence.
- **Benefits:** The self-consumption option without surplus and without batteries offers benefits 11 times lower than the two surplus self-consumption options. The surplus self-consumption options eligible for compensation provide higher net benefits due to electricity sales, with a 1% advantage in the battery-equipped installation, as it can store surpluses and avoid grid electricity costs. This implies a long-term economic benefit.

- **Recommendations by user type:**

1. Self-consumption without surplus and without energy storage batteries: This is recommended if the goal is to reduce initial investment and maximize solar radiation hours, with grid electricity always available. The battery-free option is more profitable in the short term and represents a more conservative investment.
2. Self-consumption with surplus eligible for compensation and without energy storage batteries: If the user can afford a higher investment (107 times greater than the previous option, with an initial investment of €1,295,910) and has access to the electrical grid, this option is recommended. It requires a larger investment but yields greater benefits through grid sales.
3. Self-consumption with surplus eligible for compensation and with energy storage batteries: For users seeking total self-sufficiency and willing to make a significant investment (9% higher than the previous option, with an initial investment of €1,410,910), the battery-equipped option with surplus sales to the grid is the most suitable. This system ensures grid independence and maximizes annual benefits, although its payback period is one year longer than the other two options.

The analysis demonstrates the importance of considering both economic benefits and energy independence when evaluating photovoltaic alternatives in an agricultural setting.

For future expansion of this work, it would be useful to assess several additional points:

- Extrapolating the existing results from a specific area to a larger greenhouse area, with the potential to utilize all greenhouses in the area. This would provide a sustainable option to reduce grid dependence and promote efficient agriculture in the "Sea of Plastic."
- Further investigating module, inverter, and battery technologies, as many current trials and studies could, in the future, improve the profitability and feasibility of battery use. Additionally, it would be worthwhile to explore the structural feasibility of implementing modules in these types of greenhouses. Advances in perovskite and organic photovoltaic technologies could be periodically reviewed, given their potential for improvement in efficiency and cost. As these technologies develop, they could offer a viable and cost-effective alternative to silicon modules.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Naciones Unidad. (2024, June 11). La población mundial llegará a un máximo de 10.300 millones en este siglo. <https://news.un.org/es/story/2024/07/1531126>
- [2] Mario Ruiz (2024, January 23) Agotamiento de los recursos naturales. <https://www.biospace.es/agotamiento-de-recursos-naturales/#:~:text=Aumento%20de%20la%20poblaci%C3%B3n%20mundial%20y%20su%20impacto,otros%20recursos%20esenciales%20para%20sostener%20la%20vida%20humana.>
- [3] Naciones Unidad. (2024, June 5). Cambio climático: hay un 80% de probabilidades de que el planeta siga calentándose los próximos cinco años por encima de los 1,5 grados. <https://news.un.org/es/story/2024/06/1530326>
- [4] Instituto del agua. (2024, February 2). *Cómo Afecta el Cambio Climático a los Alimentos: Impactos y Soluciones en la Era Moderna | Instituto del Agua*. Instituto Del Agua. <https://institutodelagua.es/cambio-climatico/como-afecta-el-cambio-climatico-a-los-alimentoscambio-climatico/>
- [5] CORPOICA., & Noreña, J. E. J. (2013). Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas. Produmedios. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13320/Ver_Documento_13320.pdf?sequence=3
- [6] Tong, X., Zhang, X., Fensholt, R., Jensen, P. R. D., Li, S., Larsen, M. N., Reiner, F., Tian, F., & Brandt, M. (2024). Global area boom for greenhouse cultivation revealed by satellite mapping. *Nature Food*, 5(6), 513–523. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00985-0>
- [7] N.D. (2024, June 5). Los invernaderos cubren ya 1,3 millones de hectáreas en el mundo. LaVozDeGalicia. <https://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/somosagro/agricultura/2024/06/04/invernaderos-cubren-13-millones-hectareas-mundo/00031717515855372780563.htm>
- [8] Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística. (2023, June). Una visión global de la agricultura española a través del análisis del censo agrario 2020. https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/informemapa_ca2020_tcm30-653742.pdf
- [9] De Almería, D. (2022, October 23). Almería roza el 90% de la superficie de invernaderos de Andalucía oriental. *DiarioDeAlmería*. https://www.diariodealmeria.es/finanzas/agricultura/Almeria-superficie-invernaderos-Andalucia-oriental_0_1732027155.html
- [10] Ecozap. (2023, May 2). *La razón detrás de la gran cantidad de invernaderos en Almería*. https://ecozap.es/agricultura-ecologica/la-razon-detras-de-la-gran-cantidad-de-invernaderos-en-almeria/?utm_content=cmp-true
- [11] Green, M. A. (2019). How did solar cells get so cheap? *Joule*, 3(3), 631–633. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.02.010>
- [12] López Díaz, G. (2021). EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS INVERNADEROS HORTÍCOLAS EN EL ÁREA DE ALMERÍA PARA LA COMPATIBILIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA CON LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA. <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/10364/01.%20Tesis.pdf.pdf?sequence=1>
- [13] Pérez, R. (2022, April 17). Agricultura en Almería | Por qué los invernaderos son sostenibles: solvencia económica, social y ambiental. *Ideal*. <https://www.ideal.es/almeria/almeria/invernaderos-sostenibles-solvencia-almeria-20220418143559-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.ideal.es%2Falmeria%2Falmeria%2Finvernaderos-sostenibles-solvencia-almeria-20220418143559-nt.html>
- [14] Desarrollo Sostenible. (2017, November 13). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

- [15]Castilla, N. (2013). Greenhouse Vegetable Production in the Mediterranean Region. https://www.researchgate.net/profile/Nikolaos-Katsoulas/publication/260984593_Good_Agricultural_Practices_for_greenhouse_vegetable_crops_Principles_for_Mediterranean_climate_areas/links/02e7e5362cd3f06306000000/Good-Agricultural-Practices-for-greenhouse-vegetable-crops-Principles-for-Mediterranean-climate-areas.pdf#page=37
- [16]Fondo de Innovación. (n.d.). Ministerio Para La Transición Ecológica Y El Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/fondo-innovacion.html>
- [17]Fuentes de financiación de la Transición Justa. (n.d.). Comisión Europea. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal/just-transition-mechanism/just-transition-funding-sources_es
- [18]Mecanismo de Recuperación y Resiliencia: Ministerio de Hacienda. (n.d.). <https://www.hacienda.gob.es/es-ES/CDI/Paginas/FondosEuropeos/Fondos-relacionados-COVID/MRR.aspx>
- [19]Cumplir el Pacto Verde Europeo. (2019). Comisión Europea. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_es
- [20]Cordis, C. (2022a, November 25). Células fotovoltaicas transparentes: el futuro está claro. CORDIS | European Commission. <https://cordis.europa.eu/article/id/442601-transparent-photovoltaic-cells-the-future-is-clear/es>
- [21]Zavia, M. S. (2023, November 10). Nuevo récord de eficiencia de un panel solar gracias a la perovskita. El "material milagroso" supera ya. . . Xataka. <https://www.xataka.com/energia/nuevo-record-eficiencia-panel-solar-gracias-a-perovskita-material-milagroso-supera-limite-teorico-paneles-convencionales>
- [22]Perovskite solar cells. (n.d.-b). Energy.gov. <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>
- [23]Basengreen, & Basengreen. (2023, December 11). a review of transparent solar photovoltaic technologies › › Basengreen Energy. Basengreen-Quality LiFePO4 | 12V24V48V Solar lithium battery ›. <https://www.basengreen.com/es/a-review-of-transparent-solar-photovoltaic-technologies/>
- [24]De La Plaza, I. M. (2022b, November 3). Células solares de perovskita, una fulgurante historia de éxitos | OpenMind. OpenMind. <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/innovacion/celulas-solares-de-perovskita-historia-de-exitos/>
- [25]Notimerica, & Notimerica. (n.d.). Células solares de perovskita se acercan en eficiencia al silicio. notimerica.com. https://www.notimerica.com/ciencia-tecnologia/noticia-celulas-solares-perovskita-acercan-eficiencia-silicio-20220124121813.html?utm_campaign=smartclip_social&utm_medium=Social&utm_source=Twitter
- [26]Baumann, S., Eperon, G. E., Virtuani, A., Jeangros, Q., Sulas-Kern, D. B., Barrit, D., Schall, J., Nie, W., Oreski, G., Khenkin, M., Ulbrich, C., Peibst, R., Stein, J. S., & Köntges, M. (2024). Stability and reliability of perovskite containing solar cells and modules: degradation mechanisms and mitigation strategies. *Energy & Environmental Science*. <https://doi.org/10.1039/d4ee01898b>
- [27]JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. (2016, January 11). https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [28]GeoPortal. <https://sig.mapama.gob.es/geoportal/geoportal.html>
- [29]Sha_Admin. (2022, March 7). Tipos de invernaderos y sus principales ventajas e inconvenientes. Sistemas Hortícolas Almería. <https://www.sistemashorticolasalmeria.com/blog/tipos-de-invernaderos-y-sus-principales-ventajas-e-inconvenientes/?srsltid=AfmBOoqQCgIG1MTxI6OS--InjKQprJbd1odkO8FRE6iODLiHBd9hSmDE>

- [30]D. L. Valera, L. J. Belmonte, F. D. Molina y A. López, «Los invernaderos de Almería. Análisis de su tecnología y su rentabilidad,» Cajamar Caja Rural, Almería, 2014. https://www.researchgate.net/publication/281062365_Los_invernaderos_de_Almeria_Analisis_de_su_Tecnologia_y_rentabilidad
- [31]Ministerio de agricultura y pesca (2024). mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/caminos-naturales/detalle_punto_interes.aspx?tcm=tcm:30-561254&id_camino=051500&topologia=Vegetación&origen=Destacado
- [32]Energía fotovoltaica en invernaderos: Rentabilidad de dos dígitos - Noticias - fhalmería. (2024 May 6). fhalmeria.com. <https://www.fhalmeria.com/noticia-34721-28/energia-fotovoltaica-en-invernaderos-rentabilidad-de-dos-digitos>
- [33]Hernández, C., Del Sagrado, J., Rodríguez, F., Moreno, J. C., & Sánchez, J. A. (2015). Modeling of energy demand of a High-Tech greenhouse in warm climate based on Bayesian networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/201646>
- [34]Rocamora, M. C.; Tripanagnostopoulos, Y. Aspects of PV/T solar system application for ventilation needs in greenhouses. *Acta Hort.* (2006) https://www.actahort.org/books/719/719_26.htm
- [35]Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) Ahorro y eficiencia energética en invernaderos (Abril 2008)<https://www.idae.es/publicaciones/ahorro-y-eficiencia-energetica-en-invernaderos>
- [36]Solar glass. (s. f.). <https://www.britesolar.com/solar-glass>
- [37]Request for Information: Performance Targets for Perovskite Photovoltaic Research, Development, and Demonstration Programs. (s. f.). Energy.gov. <https://www.energy.gov/eere/solar/request-information-performance-targets-perovskite-photovoltaic-research-development-and>
- [38]Vallejo, A. (2024, 4 febrero). Una ventana que también es un panel solar: así funciona este nuevo vidrio que transforma la luz en. . . Xataka Smart Home. <https://www.xatakahome.com/iluminacion-y-energia/ventana-que-tambien-panel-solar-asi-functiona-este-nuevo-vidrio-que-transforma-luz-energia-electrica>
- [39]Thompson, V. (2024, 20 agosto). Una célula solar monolítica de perovskita orgánica en tándem alcanza una eficiencia del 24,27%. Pv Magazine España. <https://www.pv-magazine.es/2024/08/20/una-celula-solar-monolitica-de-perovskita-organica-en-tandem-alcanza-una-eficiencia-del-2427/>
- [40]ENERGY. (2023, 17 septiembre).Paneles solares transparentes o traslúcidos en 2024. *Enenergy*. <https://enenergy.es/blog/paneles-solares-transparentes/>
- [41]IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2023* (septiembre 2024) ISBN: 978-92-9260-621-3. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023_executive_summary.pdf
- [42]El tejado solar.com (2024, October 2). *Batería Tesla 13.5 KWh Powerwall INCLUYE Gateway* - . <https://eltejadosolar.com/producto/bateria-tesla-13-5-kwh-powerwall-incluye-gateway/#:~:text=Bater%C3%ADa%20Tesla%2013.5%20KWh%20Powerwall%20INCLUYE%20Gateway,8.850%2C00%20%E2%82%AC%208.324%2C80%20%E2%82%AC%20%28IVA%2021%25%29%20INCUIDO>
- [43]Preciogas. (2024, October 11). <https://preciogas.com/suministro-luz/tarifas-luz/precio-luz-hoy#:~:text=Seg%C3%BAn%20los%20datos%20de%20Red%20El%C3%A9ctrica%20Espa%C3%B1ola%2C%20el,m%C3%A1s%20cara%20de%202021%20horas%20a%200%2C2226%20%E2%82%AC%2FkWh>
- [44]Submedida 4.1. Apoyo a las inversiones en explotaciones agrícolas - Junta de Andalucía. (s.f.). <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/agriculturapescaaguaydesarrollorural/areas/infraestructuras-agrarias/modernizacion/paginas/submedida-4-1.html>

7. ANEXOS

7.1. Anexo I – Fichas técnicas equipos

7.2. Anexo II – Informes PVSyst sistemas fotovoltaicos