



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid  
Tel.: 91 336 3060  
info.industriales@upm.es

[www.industriales.upm.es](http://www.industriales.upm.es)



TRABAJO FIN DE MASTER

# ESTUDIO COMPARATIVO DE SOLUCIONES FOTOVOLTAICAS EN UN INVERNADERO EN MALAGA

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

JUNIO 2024

TRABAJO FIN DE  
MÁSTER PARA LA  
OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE MÁSTER EN  
INGENIERÍA DE LA  
ENERGÍA

**Pablo López Hernando**

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:

**Luis Dávila Gómez**



POLITÉCNICA



# AGRADECIMIENTOS

*A mis padres por su apoyo diario tanto durante la elaboración de este proyecto como durante todo mi periodo universitario.*

*A mi hermano por estar presente siempre y ayudarme en lo que he necesitado.*

*A mis amigos por los grandes momentos que hemos vivido y que me han ayudado a realizar este proyecto.*

*A ETSI Industriales, a todos y todas los profesores y trabajadores que he conocido durante el máster y en especial al tutor de este trabajo, Luis Dávila sin el que su guía y confianza hubiera sido imposible realizar este proyecto de fin de grado.*

## Resumen

En el siguiente trabajo fin de máster se examina la problemática del suministro energético en la agricultura bajo invernadero en el sudeste español. Se realiza un estudio sobre cómo la utilización de energía solar fotovoltaica puede contribuir a hacer que este suministro eléctrico sea más económico y sostenible, promoviendo de esta manera el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El trabajo comienza con una breve introducción acerca de los antecedentes de los invernaderos así como los Objetivos de Desarrollo Sostenible que se mejorarían en el caso de llevar a cabo las propuestas que se van a analizar.

Posteriormente se analiza de manera detallada la situación actual de los invernaderos en España utilizando referencias bibliográficas para entender la importancia del cultivo bajo invernadero en la economía española.

El trabajo continua con una descripción detallada de los tipos de invernaderos que existen así como de los distintos sistemas que los forman, prestando especial atención a los sistema de riego, calefacción y refrigeración que más adelante se dimensionarán.

Una vez realizado el estudio previo se procede al dimensionamiento de los invernaderos. En este trabajo se van a dimensionar dos invernaderos del tipo raspa y amagado de 8000 m<sup>2</sup> cada uno en el término municipal de Algarrobo situado en la provincia de Málaga.

Para realizar una comparativa entre distintos invernaderos se van a analizar dos casos: uno en el que ambos invernaderos están dedicados al cultivo de tomates, cuyo ciclo de cultivo abarca desde septiembre hasta junio, y el otro caso en el que se en un invernadero se cultivan tomates y en el otro pimientos, que se cultivan desde mediados de junio hasta el mes de enero.

En cada uno de los casos y basándose en referencias bibliográficas, se analizan, mediante hojas de cálculo, los consumos del sistema de riego, de calefacción y de refrigeración. Para realizar estos cálculos se tiene en cuenta la fase en la que se encuentra el cultivo respecto de su ciclo y el periodo del año en el que se encuentra.

La primera propuesta que se realiza consiste en el dimensionamiento de una instalación fotovoltaica conectada a la red eléctrica mediante el software PVsyst que proporcione electricidad al sistema de riego. Los resultados del balance consumo-generación indican que la instalación fotovoltaica no se adecua correctamente al consumo del sistema de riego, puesto que se tienen elevados excedentes en verano pero desde el punto de vista económico la propuesta es viable para ambos invernaderos debido a la baja inversión inicial que se debe realizar.

La segunda propuesta estudiada consiste en el dimensionamiento de una instalación fotovoltaica de 97 kWp conectada a la red eléctrica que alimente una bomba de calor aerotérmica que cubra las necesidades de calefacción y refrigeración del invernadero para asegurar el correcto desarrollo del cultivo. Esta propuesta resulta más viable para el invernadero en el que se cultivan tomates y pimientos conjuntamente ya que en los meses de verano en los que la demanda del sistema de refrigeración es mayor también es mayor la producción fotovoltaica y se adecua de manera más eficiente al consumo.

### *Palabras clave*

*Energía solar fotovoltaica      Invernadero      tomates      pimientos*  
*riego      calefacción      autoconsumo      refrigeración      PVsyst*

### *Códigos Unesco*

*310205    310299    332202    332205    531205*

## Índice de contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Objetivo y alcance.....	1
1.2.	Antecedentes de los invernaderos.....	1
1.3.	Estudio de necesidades.....	2
1.4.	Revisión bibliográfica técnica.....	4
2.	Revisión del estado del arte .....	9
2.1.	Historia de los invernaderos en España .....	9
2.2.	Situación de los invernaderos en España.....	10
2.3.	Tipos de invernaderos.....	12
2.3.1.	Cubiertas.....	16
2.3.2.	Área de crecimiento del cultivo.....	19
2.3.3.	Sistema de riego y drenaje .....	20
2.3.4.	Sistema ventilación.....	21
2.3.5.	Sistema de calefacción .....	22
2.3.6.	Sistema de control.....	23
2.3.7.	Sistema de iluminación.....	29
2.3.8.	Sistemas auxiliares.....	30
3.	Definición de la instalación .....	31
3.1.	Ubicación .....	31
3.2.	Condiciones climáticas de la zona.....	33
3.3.	Descripción de la instalación .....	34
3.3.1.	Estructura y cubierta .....	34
3.3.2.	Área de crecimiento del cultivo.....	35
3.3.3.	Sistema de riego .....	35
3.3.4.	Sistema de ventilación.....	36
3.3.5.	Sistema de calefacción .....	37
3.3.6.	Sistema de control.....	37
3.3.7.	Sistema de iluminación.....	38
3.3.8.	Sistemas auxiliares.....	38
3.4.	Tipos de cultivos .....	38
3.4.1.	Cultivo de tomate .....	38
3.4.2.	Factores agronómicos del cultivo de tomate en invernadero .....	41
3.4.3.	Cultivo de pimientos.....	43

3.4.4.	Factores agronómicos del cultivo de pimientos en invernadero.....	43
4.	Consumos.....	45
4.1.	Cálculo superficie útil del invernadero .....	45
4.2.	Sistema de riego.....	45
4.3.	Sistema de calefacción .....	48
4.4.	Sistema de refrigeración .....	51
5.	Descripción de escenarios.....	56
5.1.	Estudio del recurso solar en Algarrobo.....	56
5.2.	Análisis Real Decreto 244/2019 .....	60
5.3.	Riego fotovoltaico .....	61
5.3.1.	Invernadero de tomates .....	61
5.3.2.	Invernadero de tomates y pimientos .....	62
5.4.	Bomba de calor .....	63
6.	Análisis de resultados.....	67
6.1.	Metodología.....	67
6.2.	Riego fotovoltaico .....	68
6.3.	Bomba de calor .....	73
7.	Conclusiones.....	76
8.	Bibliografía.....	78
<b>ANEXOS</b>	.....	<b>82</b>

## Índice de figuras

Figura 1. The Crystal Palace [Fuente: Archdaily] .....	2
Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (Fuente: Naciones Unidas) .....	3
Figura 3. Evolución de los invernaderos en la zona de Almería (Fuente: Diario de Almería).....	9
Figura 4. Distribución de invernaderos en Andalucía (Fuente: Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología) .....	11
Figura 5. Invernadero tipo parral plano (Fuente: Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología).....	13
Figura 6. Invernadero tipo raspa y amagado (Fuente: Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología).....	14
Figura 7. Invernadero asimétrico (Fuente: F. Martín Rodríguez).....	14
Figura 8. Invernadero multitúnel (Fuente: Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología).....	15
Figura 9. Distribución de invernaderos en la provincia de Málaga (Fuente: Junta de Andalucía) .....	31
Figura 10. Imagen satélite de Algarrobo (Fuente: Google Maps) .....	32
Figura 11. Invernaderos en Algarrobo (Fuente: Google Earth) .....	33
Figura 12. Invernaderos en Algarrobo (Fuente: Google Maps) .....	33
Figura 13. Invernadero raspa y amagado (Fuente: Infoagro) .....	35
Figura 14. Evolución de la superficie total de tomate (ha) (Fuente: M. Merino-Pacheco) .....	39
Figura 15. Evolución de la producción de tomate (M. Merino-Pacheco).....	39
Figura 16. Ciclos de cultivo de tomate en invernaderos (Fuente: F. Camacho Ferre) .....	41
Figura 17. Necesidades de riego de un cultivo de tomates en litros por día (Fuente: Elaboración propia) .....	46
Figura 18. Energía consumida por el sistema de riego de tomates en kWh (Fuente: Elaboración propia) .....	48
Figura 19. Temperatura máxima y mínima de un año meteorológico típico en Algarrobo en ° C (Fuente: Aemet) .....	49
Figura 20. Temperatura mínima en Algarrobo y temperatura mínima del tomate en ° C (Fuente: Elaboración propia) .....	49
Figura 21. Necesidades energéticas del sistema de calefacción del cultivo de tomates expresadas en kWh. (Fuente: Elaboración propia) .....	51
Figura 22. Temperatura máxima Algarrobo y temperatura máxima tomate en ° C (Fuente: Elaboración propia) .....	51
Figura 23. Necesidades energéticas del sistema de refrigeración del cultivo de tomates expresadas en kWh. (Fuente: Elaboración propia) .....	53
Figura 24. Necesidades energéticas del sistema de calefacción y de refrigeración del cultivo de tomates expresadas en kWh. (Fuente: Elaboración propia) .....	54
Figura 25. Energía consumida por el sistema de riego en kWh en el cultivo de pimientos (Fuente: Elaboración propia) .....	54
Figura 26. Necesidades energéticas del sistema de calefacción y de refrigeración del cultivo de pimientos expresadas en kWh. (Fuente: Elaboración propia) .....	55
Figura 27. Disposición de módulos fotovoltaicos sobre la cubierta de un invernadero raspa y amagado (Fuente: R. López-Luque, J. Martínez, J.Reca y R. Ruiz).....	56
Figura 28. Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT (Fuente: Aemet) .....	57

Figura 29. Tipos de radiación solar (Fuente: J.A Guerra) .....	57
Figura 30. Irradiación media diaria directa y difusa sobre plano horizontal en Algarrobo (Fuente: Elaboración propia) .....	59
Figura 31. Irradiación global media diaria sobre plano horizontal y sobre plano inclinado 20° (Fuente: PVGIS) .....	60
Figura 32. Comparación de la energía del sistema de riego del Invernadero T y T + P expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia) .....	63
Figura 33. Comparación de la energía consumida por el sistema de calefacción del Invernadero T y T + P expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia).....	65
Figura 34. Comparación de la energía consumida por el sistema de refrigeración del Invernadero T y T + P expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia).....	65
Figura 35. Comparación de la energía eléctrica consumida por la bomba de calor del Invernadero T y T+ P expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia).....	66
Figura 36. Metodología utilizada en el estudio comparativo (Fuente: Elaboración propia) .....	67
Figura 37. Consumo de energía del sistema de riego del Invernadero T frente a la producción fotovoltaica de 1,2 y3 módulos expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia) .....	68
Figura 38. Balance de excedentes y energía consumida de la red con dos módulo para el Invernadero T, expresada en kWh (Fuente: Elaboración propia).....	69
Figura 39. Balance de excedentes y energía consumida de la red con un módulo para el Invernadero T, expresada en kWh (Fuente: Elaboración propia).....	69
Figura 40. Tiempo de retorno de la inversión inicial con un módulo para el Invernadero T (Fuente: Elaboración propia) .....	71
Figura 41. Tiempo de retorno de la inversión inicial con dos módulos para el Invernadero T (Fuente: Elaboración propia).....	71
Figura 42. Balance de excedentes y energía consumida de la red con dos módulo para el Invernadero T + P, expresada en kWh (Fuente: Elaboración propia) .....	71
Figura 43. Balance de excedentes y energía consumida de la red con un módulo para el Invernadero T+ P, expresada en kWh (Fuente: Elaboración propia) .....	71
Figura 44. Tiempo de retorno de la inversión inicial con dos módulo para el Invernadero T + P (Fuente: Elaboración propia).....	72
Figura 45. Tiempo de retorno de la inversión inicial con un módulo para el Invernadero T + P (Fuente: Elaboración propia).....	72
Figura 46. Consumo de energía del Invernadero T frente a la producción fotovoltaica en kWh. (Fuente: Elaboración propia).....	73
Figura 47. Consumo de energía del Invernadero T + P frente a la producción fotovoltaica en kWh. (Fuente: Elaboración propia).....	74
Figura 48. Balance de excedentes y energía consumida de la red para el Invernadero T+ P, expresada en MWh (Fuente: Elaboración propia) .....	74
Figura 49.. Balance de excedentes y energía consumida de la red para el Invernadero T, expresada en MWh (Fuente: Elaboración propia).....	74

## Índice de tablas

Tabla 1. Hectáreas cultivas bajo invernadero según Comunidad Autónoma en España (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) .....	10
Tabla 2. Tipos de cultivo desarrollados en España (Fuente: Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos).....	11
Tabla 3. Condiciones climáticas en Algarrobo en un año meteorológico típico (Fuente: Weather Spark) .....	34
Tabla 4. Tiempo de riego diario según las fases del ciclo (Fuente: Proain) .....	47
Tabla 5. Tiempo de uso del sistema de calefacción diario por meses en horas (Fuente: IDAE)..	50
Tabla 6. Tiempo de uso del sistema refrigeración diario por meses en horas (Fuente: IDAE) ....	52
Tabla 7. Valores de irradiación media diaria directa, difusa y global sobre plano horizontal en Algarrobo (Fuente: PVGIS).....	58
Tabla 8. Irradiación global media diaria sobre plano inclinado 20°. (Fuente: PVGIS) .....	59
Tabla 9. Resultados económicos Invernadero T (Fuente: Elaboración propia) .....	70
Tabla 10. Resultados económicos Invernadero T + P (Fuente: Elaboración propia) .....	72
Tabla 11. Resultados económicos del escenario de la bomba de calor (Fuente: Elaboración propia) .....	75

# 1. Introducción

## 1.1. Objetivo y alcance

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster consiste en analizar la viabilidad energética y económica de una serie de mejoras mediante energía solar fotovoltaica en distintos sistemas convencionales en invernaderos. Para ello será necesario analizar los consumos de todos los sistemas de un invernadero convencional y evaluar las distintas propuestas fotovoltaicas analizando tanto la producción, como la viabilidad económica de cada una de las propuestas.

Antes de comenzar este caso práctico se va a establecer el alcance del mismo:

- Estudiar los antecedentes y el estado del arte actual de los invernaderos en la zona sureste de España realizando un estudio exhaustivo de cada uno de los sistemas que forman parte del invernadero.
- Revisar artículos e informes ya realizados acerca de la inclusión de tecnologías fotovoltaicas en invernaderos en la península ibérica.
- Dimensionar un invernadero en la provincia de Málaga basándose en literatura bibliográfica y adaptándola a las condiciones de Málaga.
- Realizar simulaciones mediante un software con el objetivo calcular la producción fotovoltaica de las distintas variantes estudiadas.
- Justificar mediante cálculos energéticos y económicos la viabilidad o no de las variantes estudiadas.

## 1.2. Antecedentes de los invernaderos

Los primeros invernaderos datan del siglo I a.C. cuando los romanos diseñaron una serie de estructuras que tenían como principal objetivo proteger las plantaciones de las condiciones climatológicas en zonas donde eran más severas. (1)

Los primeros invernaderos con cubiertas de vidrio aparecieron en Italia durante la Edad Media principalmente para almacenar las plantas exóticas que venían desde el extranjero, principalmente frutos cítricos como las naranjas.

Fue tras la revolución industrial cuando se desarrollaron sistemas internos de calefacción a partir de estufas o calderas que quemaban materia orgánica para poder alcanzar cierta temperatura dentro del invernadero. Además, gracias a la revolución industrial se comenzaron a utilizar nuevos materiales de construcción como el vidrio y el hierro. Estos invernaderos no sólo servían para cultivar plantas fuera de su temporada habitual, sino que también servían como museo de plantas exóticas que solo se podían ver en su interior. El claro ejemplo de estos invernaderos con innovaciones tecnológicas es 'The Crystal Palace' que fue construido en Londres en 1851 y se muestra en la Figura 1. (2)

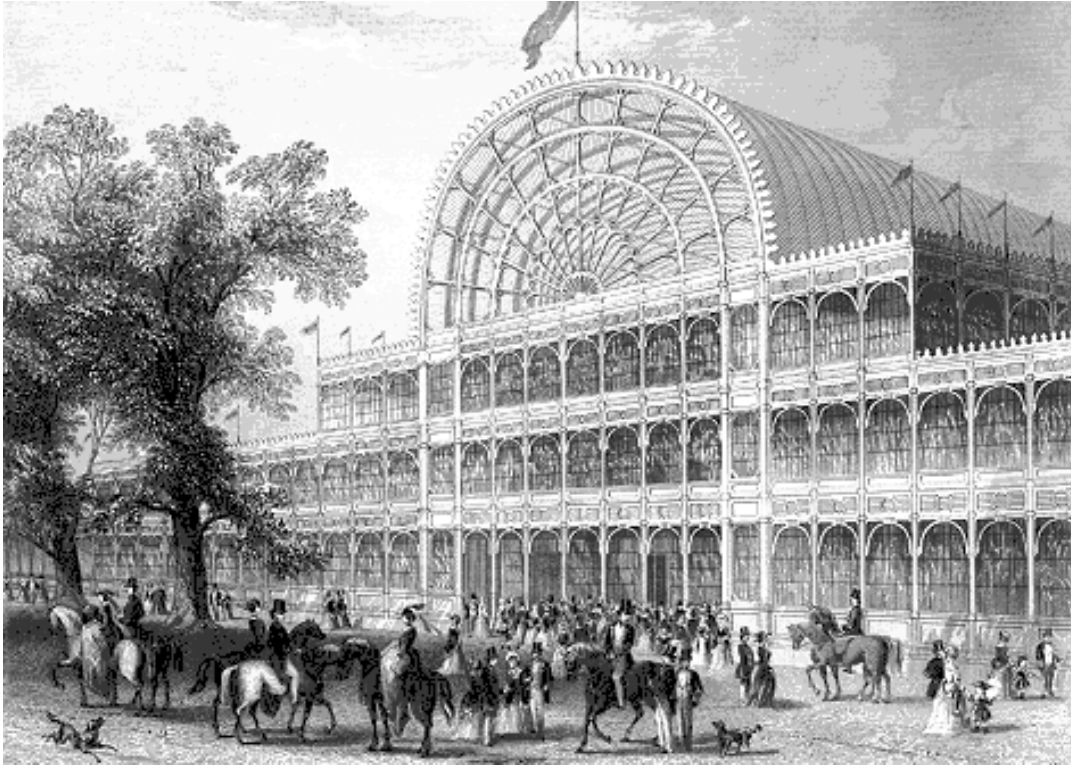


Figura 1. The Crystal Palace [Fuente: Archdaily]

Durante el siglo XX continuó la expansión de los invernaderos a lo largo y ancho del mundo, pero con pocas mejoras tecnológicas, la única destacable en la mitad del siglo XX en Estados Unidos, se comenzaron a fabricar los primeros invernaderos que estaban cubiertos de celulosa en vez de vidrio.

La evolución de los invernaderos ha continuado avanzando y en la actualidad se han incorporado las tecnologías más punteras en el mercado con el principal objetivo de cultivar hortalizas y plantas fuera de su temporada, pero conservando su calidad para poder abastecer la demanda de los consumidores.

### 1.3. Estudio de necesidades

Los objetivos de desarrollo sostenible son un conjunto de objetivos acordados conjuntamente por líderes mundiales en 2015 y que forman parte de la agenda 2030 con el fin de proteger el planeta, erradicar la pobreza y asegurar la prosperidad de los habitantes de la Tierra. (3)

En la Figura 2 se recogen estos objetivos y a continuación se detalla cuál de ellos está estrechamente relacionado con este proyecto.



Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (Fuente: Naciones Unidas)

### 1. Hambre cero

Gracias al uso de invernaderos se permite cultivar hortalizas y frutas fuera de su temporada habitual y de esta manera proporcionar comida continuamente a la población y participar de manera directa en la erradicación del hambre.

### 2. Salud y bienestar

Mediante la producción de verduras y hortalizas saludables se contribuye a la mejora de la nutrición de las personas, así como a la reducción de enfermedades relacionadas con la alimentación.

### 7. Energía asequible y no contaminante

Debido al uso de módulos fotovoltaicos integrados en la estructura del invernadero se proporciona la energía necesaria para el funcionamiento del invernadero, por lo que se fomenta la descarbonización y la reducción de fuente fósiles.

### 8. Trabajo decente y crecimiento económico

Tanto la construcción como operación del invernadero generará puestos de trabajos decentes para los habitantes locales y mejorará el crecimiento económico de la región aportando competitividad frente a los productos extranjeros.

### 9. Industria, innovación e infraestructuras

La puesta en marcha de propuestas como un invernadero solar promueve la industrialización sostenible y fomenta la innovación en el sector agrícola generando un crecimiento económico sostenible.

### 12. Producción y consumos responsables

El uso de invernaderos para producir alimentos promueve técnicas de cultivo más eficientes como el riego por goteo o el uso de insecticidas que derivan en una agricultura más responsable y sostenible

### 13. Acción por el clima

Gracias al uso de tecnología fotovoltaica y renovable para el funcionamiento del invernadero, se reduce el uso de combustibles fósiles y electricidad de la red que puede provenir de fuentes de generación contaminantes.

### 15. Vida de ecosistemas terrestres

Con la adecuada gestión de un invernadero se puede promover la conservación tanto del suelo como de la biodiversidad de la zona ya que se reduce las necesidades de ocupar grandes parcelas de terreno en áreas naturales para cultivar.

## 1.4. Revisión bibliográfica técnica

### 1. Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos (IDAE) (4)

Los autores Diego L. Valera, Francisco D. Molina y Antonio J. Álvarez de la Universidad de Almería con la colaboración del Departamento de Biomasa del CENER realizaron en 2008 este documento para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

En el primer apartado se evalúa la situación de entonces de los invernaderos en la que los sistemas energéticos asociados al cultivo bajo invernadero eran escasos y poco avanzados. En este apartado se calculan también las necesidades energéticas que se tienen en un invernadero, en concreto se analizan las condiciones meteorológicas y climáticas que afectan al invernadero. Posteriormente se realiza un balance energético en el que se tiene en cuenta la energía perdida por el aire en el invernadero y la energía ganada.

En este documento se evalúan dos casos prácticos, el primero de ellos es un invernadero situado en Mendigorria (Navarra) tipo multitúnel y con unas dimensiones de 64 metros x 110 metros y 4 metros de ancho. El segundo invernadero está situado en Almería y también es de tipo multitúnel de dimensiones 24 metros x 45 metros y una altura de 4,5 metros bajo canal. En ambos casos se evalúan los datos climáticos de la zona y en función de estos se calculan las necesidades energéticas de cada invernadero.

En el segundo apartado del documento se analizan las técnicas de ahorro energético en invernaderos. En primer lugar se evalúan las mejoras de aislamiento térmico entre las que destacan las pantallas térmicas, los invernaderos con paredes dobles y los micro túneles entre otras. En segundo lugar se analizan las mejoras respecto a la generación del calor, en este apartado destacan el aumento de la eficiencia de combustión, el uso de recuperadores de calor en los humos de escape y la instalación de turbuladores. En los siguientes puntos del segundo apartado se analizan las mejoras en cuanto a la emisión y distribución del calor, la optimización del rendimiento de las calderas, la mejora de los generadores de aire caliente por combustión directa, el aumento de la superficie útil de los invernaderos y el análisis detallado de los sistemas de iluminación y refrigeración.

En el último apartado de Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos se estudia la aplicación de distintas energías renovables en invernaderos. La energía solar se puede aplicar sobre los invernaderos de dos maneras: la primera de ellas como fuente de precalentamiento del agua de calefacción mediante colectores solares y un sistema solar térmico con acumuladores. La segunda opción es mediante energía solar fotovoltaica en la que una instalación fotovoltaica cubre el consumo del invernadero y junto a un sistema de baterías proporcionan una autonomía de 5 días. A continuación, se analiza el uso de calderas de biomasa como fuente de calefacción

en los invernaderos y se realiza un análisis detallado de la demanda térmica en los dos invernaderos descritos anteriormente. En el último punto de este apartado se estudia la posibilidad de cubrir los consumos térmicos del invernadero mediante energía geotérmica.

## 2. Experiencias sobre aprovechamiento fotovoltaico de las cubiertas de los invernaderos (5)

Los autores M. Pérez, J.A Sánchez, J. Pérez y A. Callejón pertenecientes a la Universidad de Almería y al Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario realizan un estudio sobre las afecciones y la posible integración de dispositivos fotovoltaicos en las cubiertas de los invernaderos en la zona de Almería.

El uso de energías renovables en los invernaderos es necesario de cara a la descarbonización del sector agrario y reportará beneficios medioambientales que podrían añadirse al valor añadido de la producción hortícola.

Los autores comentan que en ningún caso la instalación de módulos fotovoltaicos en la cubierta debe afectar a la función básica del invernadero, que no es otra que mejorar las condiciones del cultivo que se esté plantando. Existen técnicas para reducir la radiación incidente sobre el invernadero como pueden ser el encalado de la cubierta o las mallas de sombreo, pero no se pueden comparar con los módulos fotovoltaicos ya que estos deben permanecer fijos en su estructura.

Para realizar la adecuación de la instalación fotovoltaica al invernadero se deben realizar un estudio exhaustivo de la demanda eléctrica de la explotación, de la que señalan su dificultad de cuantificar debido a la gran cantidad y variedad de estructuras, sistemas y equipamientos que hay en los invernaderos.

En el estudio diferencian las dos modalidades de instalaciones fotovoltaicas: aisladas de la red, en la que se hace imprescindible el uso de sistemas de almacenamiento de energía como son las baterías, y las instalaciones conectadas a red que se pueden ver beneficiadas por la inyección de la energía no consumida a la red.

Posteriormente evalúan la disposición estructural de los módulos fotovoltaicos sobre la cubierta del invernadero y se estudian 4 opciones.

La primera de ellas son módulos completamente opacos que pueden ser flexibles o rígidos. En esta opción dada la opacidad de los módulos se debe intentar minimizar los efectos de sombreo sobre el cultivo, por ello se plantea una disposición de los módulos con un alineamiento al tresbolillo del cultivo o en zona del invernadero inactivas como pueden ser pasillos o zonas perimetrales.

La segunda opción es el uso de módulos con células opacas discontinuas, que están formadas por células individuales entre dos cubiertas transparentes. En esta opción se estudia la disposición y separación de las células que permite tener distintos niveles de transparencia.

La tercera opción consiste en el uso de módulos semitransparentes continuos que están formados por células de lámina delgada y por lo tanto producen una malla de alta densidad con aperturas puntuales que permite el paso de la luz a través de ella. En este caso se estudia la densidad de la malla que influye directamente en la transparencia del módulo.

La cuarta y última opción consiste en módulos convencionales dispuestos en zonas focales de concentradores solares que se sitúan en las cubiertas de los invernaderos.

La primera opción es la más funcional y más sencilla, aunque es la que más elementos que producen sombra introducen en la cubierta. La segunda y tercera opción evitan el problema del sombreado, pero es tecnología costosa y poco disponible y la última opción tiene ventajas ya que es un sistema que aprovecha la energía solar concentrada pero la disposición geométrica de la cubierta la convierte en una opción poco viable.

En este estudio se toma como referencia un invernadero tipo multitúnel de 22500 m<sup>2</sup> situado en la región de Murcia que tiene un consumo anual de 150000 kWh. El mayor consumo se da en el mes de enero con 1,73 kWh/m<sup>2</sup> mientras que en agosto solo se consumen 0,25 kWh/m<sup>2</sup>. En este invernadero se ha ocupado el 10% de la superficie de las cubiertas orientadas al sur y han estimado que el porcentaje de sombreado en días despejados es el 8%. Teniendo en cuenta que las células tienen un rendimiento del 10%, las conclusiones son que mediante este sistema se genera la energía suficiente consumida por el invernadero y se tiene un 12% de excedentes.

Se ha considerado una ocupación del 10 % de las cubiertas sur, lo que significa un 5% de ocupación de la superficie de cubierta total, estimándose el porcentaje de sombreado interior por efecto de la geometría solar para días despejados en un 8%. La aplicación de las condiciones climáticas tipo para este emplazamiento y un rendimiento de las células de un 10% determinan que la producción de electricidad en estas condiciones excede en un 12 % el consumo propio del invernadero.

Adicionalmente comentan otro estudio sobre un invernadero situado en Japón en el que se estudian dos posibles distribuciones de los módulos fotovoltaicos sobre la cubierta de un invernadero multitúnel. Los resultados de este estudio son que la distribución en la que el efecto reductor de la radiación es menor es la distribución con un alineamiento al tresbolillo.

Otro estudio llevado a cabo en la Fundación UAL-ANECOOP situada en Almería en un invernadero raspa y amagado estudia la distribución de los módulos fotovoltaicos en tres zonas diferenciadas. En la primera zona no se colocaron módulos, en la segunda zona se colocaron 12 módulos individuales con un alineamiento al tresbolillo y en la tercera zona se colocaron 12 módulos apareados también al tresbolillo. Las conclusiones de este estudio son que la producción agrícola entre las zonas sombreadas por los módulos y la zona no sombreada es prácticamente similar, por lo que no resulta relevante la colocación de módulos fotovoltaicos sobre la cubierta del invernadero.

Las conclusiones del artículo "Experiencias sobre aprovechamiento fotovoltaico de las cubiertas de los invernaderos" son que no existe en la actualidad una solución estructural generalizable para la integración de módulos fotovoltaicos en las cubiertas de los invernaderos. De la misma manera concluyen que en el caso de los experimentos realizados en Almería, en invernaderos en los que hay una ocupación de módulos fotovoltaicos del orden del 10% de la cubierta, no afecta a la producción del invernadero, pero sí que son viables energéticamente ya que poseen unos valores de producción eléctrica del orden de 8 kWh/m<sup>2</sup>.

3. An integrated transient model in TRNSYS for thermal management of the tomato growth process in a greenhouse with a PV-aided heat pump-assisted HVAC system (6)

Los científicos turcos y cataríes simularon el crecimiento de un cultivo de tomates en un invernadero con un sistema HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) alimentado por una instalación fotovoltaica y una bomba de calor de aerotermia.

En este artículo se analizó un invernadero de 24 metros x 45 metros y 4,2 metros de altura dedicado al cultivo de tomates con un sistema compuesto por un ventilador, dos válvulas de control, un humidificador, un deshumidificador, una batería de refrigeración y una batería de calefacción para controlar las condiciones climáticas en el interior del invernadero.

La simulación se realizó mediante los softwares TRNSYS y MATLAB y se estudió la misma instalación, pero en cuatro ciudades distintas: Izmir (Turquía), Casablanca (Marruecos), Túnez (Túnez) y Valencia (España). El modelo utilizado por los científicos simulaba un año entero en el que hay tres estaciones de crecimiento del cultivo: de enero a abril, de mayo a agosto y de septiembre a diciembre, para simular los distintos ciclos de cultivo del tomate. En este modelo se consideró que el invernadero debía estar entre 20 y 27 °C durante todo el año y que la humedad relativa debía situarse entre el 40 y el 60%.

Para este estudio se utilizaron 450 módulos fotovoltaicos del fabricante HSA Enerji con una potencia de 247,5 kWp y se supuso que estos módulos alimentaban a una bomba de calor que consumía energía de la red cuando la generada por la instalación fotovoltaica no era suficiente.

Los resultados arrojados por este estudio son claros: la instalación que más consumo tuvo durante el periodo estudiado fue la de Izmir, en la que se consumieron 723980 kWh de los cuales 376030 kWh fueron a través de la instalación fotovoltaica. Para esta instalación el periodo de amortización del sistema fue de 13,55 años. Mientras que en Valencia, que fue la instalación con menor consumo (697400 kWh de los cuales 379780 kWh fueron fotovoltaicos) el periodo de amortización se reduce hasta los 2,9 años convirtiendo en la instalación con mayor rentabilidad de las cuatro casos estudiados. En la instalación en Valencia se consigue reducir la temperatura media anual del invernadero de 33,3 °C, en un invernadero sin sistema de climatización, a 23,5 °C.



## 2. Revisión del estado del arte

### 2.1. Historia de los invernaderos en España

La historia de los invernaderos en España y más concretamente en el sudeste de la península ibérica comienza en torno al 1960 cuando debido a la creciente demanda en Europa de productos agrícolas fomentó la construcción y el desarrollo de los invernaderos.

Se data en 1961 el primer invernadero tipo en la zona de Almería con una estructura y forma características que darán lugar a lo que hoy en día se conoce como invernadero tipo parral. (7)

En las décadas de los 80 y 90 este tipo de plantaciones se asentaron como sistema productivo y comercial debido principalmente a la alta rentabilidad económica que ofrecían. Fue en la zona de Almería, concretamente en los términos municipales de El Ejido y Dalías, donde mayor impacto tuvieron ya que como se observa en la Figura 3 se han asentado en prácticamente todo su territorio.

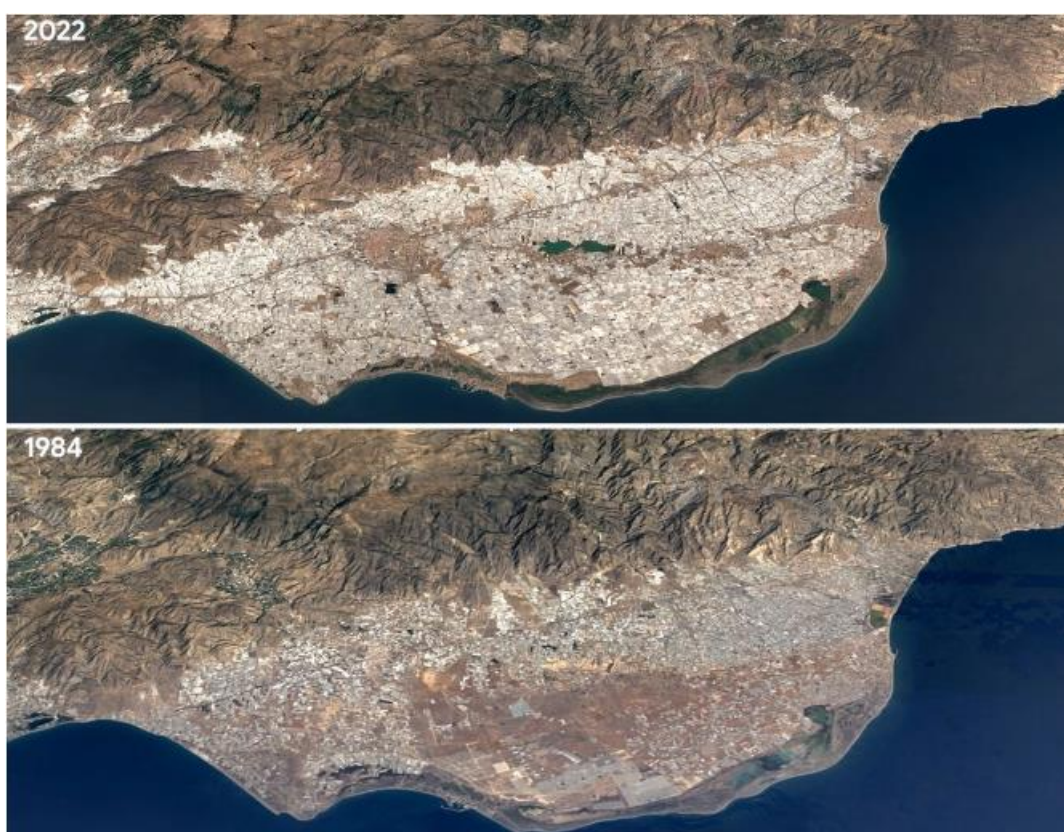


Figura 3. Evolución de los invernaderos en la zona de Almería (Fuente: Diario de Almería)

Durante el siglo XXI los invernaderos españoles se han modernizado y se han implantado numerosos avances tecnológicos entre los que destacan el riego automatizado y el control de condiciones ambientales mediante los que se ha optimizado la producción.

Además, en los últimos años se ha puesto el foco sobre la sostenibilidad de los invernaderos ya que debido a los productos químicos y a las abundantes necesidades de agua suponen un problema para el medioambiente.

## 2.2. Situación de los invernaderos en España

En este apartado se analizará la situación actual de los invernaderos en España, examinando tanto su distribución territorial como los diferentes tipos de invernaderos presentes en el país. Además, se estudiarán los diversos tipos de cultivos que se plantan en estos invernaderos.

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 1, Andalucía es la región de España con más superficie ocupada por invernaderos representando un 78,41 % del total de la superficie en España, y seguido de Murcia, región en la que se sitúan 8,28 % de los invernaderos españoles y Canarias con un 7,05%. (8)

	ha	%
Galicia	434	0,56
Asturias	130	0,17
Cantabria	2	0,00
País Vasco	276	0,35
Navarra	519	0,67
La Rioja	56	0,07
Aragón	253	0,32
Cataluña	779	1,00
Baleares	136	0,17
Castilla y León	833	1,07
Comunidad de Madrid	131	0,17
Castilla - La Mancha	94	0,12
Comunidad Valenciana	1141	1,46
Murcia	6449	8,28
Extremadura	94	0,12
Andalucía	61099	78,41
Canarias	5495	7,05
Total	77921	

*Tabla 1. Hectáreas cultivadas bajo invernadero según Comunidad Autónoma en España (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)*

De las aproximadamente 61000 hectáreas que se cultivan en Andalucía mediante invernaderos, el 82,5% de los invernaderos se concentran en la provincia de Almería seguida de la provincia de Granada y después Cádiz.

El 68% de los invernaderos instalados en la región de Almería se sitúan en lo que se conoce como el campo de Dalías (en torno a 22.000 hectáreas) y el 32% en la zona de Campo de Níjar y Bajo Andarax. En la Figura 4 se muestran las zonas del sureste español en los que mayor cultivo bajo invernadero hay.



Figura 4. Distribución de invernaderos en Andalucía (Fuente: Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología)

En la Tabla 2 se muestran los tipos de cultivos de las tres comunidades autónomas con más superficie de invernaderos instalados y el porcentaje que representa respecto al global.

	España [ha]	% de ha respecto a la superficie total	Murcia [ha]	% de ha respecto al cultivo	Islas Canarias [ha]	% de ha respecto al cultivo	Andalucía [ha]	% de ha respecto al cultivo
Tomate	7713	9,90	1599	20,73	933	12,10	4500	58,34
Pimiento	4320	5,54	1504	34,81	0	0	2165	50,12
Pepino	1526	1,96	6	0,39	0	0	1278	83,75
Sandía	746	0,96	0	0	0	0	739	99,06
Calabacín	545	0,70	0	0	73	13,39	468	85,87
Melón	357	0,46	131	36,69	0	0,00	179	50,14
Berenjena	758	0,97	12	1,58	0	0	726	95,78
Judía Verde	134	0,17	0	0	0	0	78	58,21
Lechuga	118	0,15	0	0	31	26,27	0	0
Fresa	10054	12,90	0	0	0	0	9264	92,14
Flor	682	0,88	0	0	22	3,23	333	48,83
Aguacate	200	0,26	0	0	184	92,00	16	8,00
Platanera	2788	3,58	0	0	2788	100,00	0	0,00
Mango	301	0,39	0	0	114	37,87	187	62,13
Papaya	451	0,58	0	0	442	98,00	9	2,00
Frambueso	2724	3,50	0	0	0	0	2693	98,86
Arándano	4512	5,79	0	0	0	0	4512	100,00
Invernadero vacío	36962	47,44	2760	7,47	435	1,18	33030	89,36
Total	77921							

Tabla 2. Tipos de cultivo desarrollados en España (Fuente: Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos)

El dato más llamativo de esta Tabla 2 es que el 47% de los invernaderos construidos en España están vacíos, pero se debe a que el estudio realizado por ESYRCE (Encuesta sobre Superficies y

Rendimientos Cultivos) sólo muestran la ocupación de los invernaderos en el momento de la investigación que corresponde con los meses de verano, por lo que la gran parte de los invernaderos del sureste español se encuentran vacíos. Se ha comprobado que obviando los invernaderos que cuando se realizó el estudio estaban vacíos los resultados no varían en exceso.

En cuanto a los tipos de cultivo en España la fresa (12,9%), el tomate (9,9%) y el pimiento (5,54%) son las frutas y hortalizas más cultivadas durante el año 2023.

Respecto a los cultivos, Andalucía lidera el cultivo de prácticamente todos los tipos de fruta y verdura cultivados bajo invernadero a excepción del aguacate y la platanera en los que Canarias supera con amplia claridad.

### 2.3. Tipos de invernaderos

En este apartado se pretende analizar el estado del arte de los tipos de invernaderos más utilizados en España, así como los distintos sistemas que los forman, poniendo especial atención en aquellos que serán objeto del dimensionamiento de este caso práctico.

#### - Parral plano o parral simple

Los invernaderos tipo parral plano se caracterizan por tener una estructura exterior muy liviana y una cubierta que no llega a los 2 metros de altura y generalmente es de plástico por lo que no es una opción viable para climas en los que las precipitaciones sean regulares.

Al tener una cubierta plana podría suponer un problema debido a la acumulación de agua en caso de lluvias. Por ello cuenta con unas perforaciones en el recubrimiento de plástico que filtran esta agua hacia el interior del invernadero. El principal defecto de estas perforaciones es que evita la estanqueidad del invernadero, lo que puede dar lugar a la entrada de plagas y proporciona un control de las condiciones climáticas muy deficiente. (9)

Respecto a la estructura, los invernaderos planos están formados por una estructura vertical rígida, generalmente de hormigón, y otra horizontal formada por mallas de alambre de acero galvanizado cuya principal función es sujetar la cubierta de plástico.

En los años 60 fue el modelo más utilizado en la zona de Almería, sin embargo, a día de hoy debido a la deficiencias detalladas anteriormente este tipo de invernaderos se considera obsoletos.

En la Figura 5 se puede apreciar de manera esquemática un invernadero tipo parral plano.

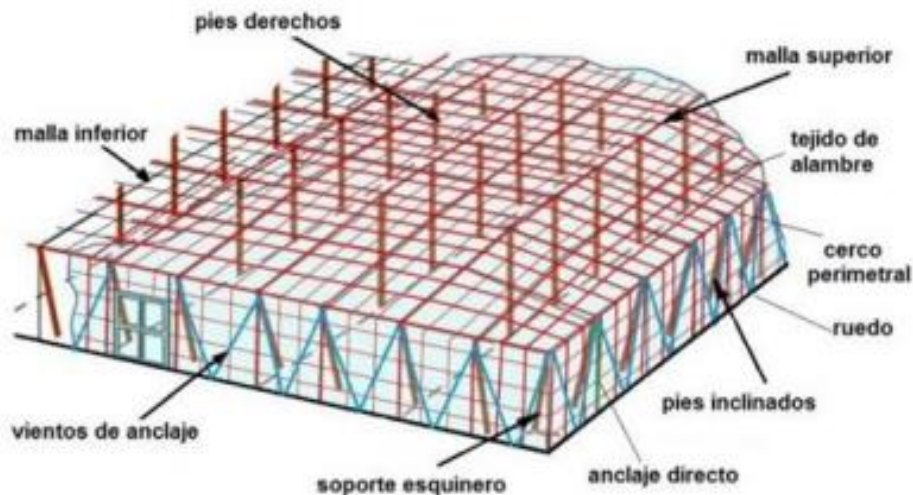


Figura 5. Invernadero tipo parral plano (Fuente: Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología)

#### - Raspa y amagado

Los invernaderos de raspa y amagados son similares a los invernaderos de parral plano, ya que la única modificación que existe es la forma de la cubierta. En este tipo de invernaderos la cubierta es a “dos aguas” con una inclinación entre 6 y 20 ° de manera que la zona de altura máxima se conoce como “raspa” y la zona de menor altura como “amagado”. (10)

El desarrollo de los últimos años en esta tipología de invernaderos se ha centrado en el incremento de volumen útil, así como la estanqueidad y la superficie de ventilación. En la misma línea han evolucionado los materiales de su estructura proporcionando un buen comportamiento frente a fenómenos meteorológicos adversos como fuertes vientos.

Las principales ventajas de los invernaderos tipo raspa y amagado son la elevada estanqueidad que genera un mejor control de las condiciones climáticas interiores, así como el bajo coste de la estructura y la facilidad de montaje ya que no son necesarias soldaduras.

El uso de esta tipología de invernaderos no se recomienda en zonas con climas fríos por la alta capacidad de estanqueidad. Sin embargo, es recomendable en zonas con climas templados ya que permite un control eficiente de las condiciones climáticas y en caso de fuertes ráfagas de viento podrá aguantar gracias a la robustez de su estructura.

En la Figura 6 se puede apreciar la configuración esquemática de un invernadero raspa y amagado



Figura 6. Invernadero tipo raspa y amagado (Fuente: Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología)

#### - Invernadero asimétrico o tropicales

El invernadero asimétrico, que se muestra en la Figura 7, se considera una variación del invernadero 'raspa y amagado' ya que únicamente se modifica la cubierta con el objetivo de incrementar la captación de la radiación solar incidente en el invernadero. La inclinación de la cubierta se calcula para maximizar la incidencia de los rayos solares en el mediodía de invierno y garantizar el aprovechamiento de la energía solar. (11)

Estos invernaderos se caracterizan por un eficiente aprovechamiento de luz en el periodo invernal, donde las horas solares son menores, una buena estanqueidad y ventilación debido a su gran altura y una elevada inercia térmica que permite que las variaciones climatológicas en el interior del invernadero sean menores.

La ventilación más habitual en los invernaderos asimétricos es de manera natural mediante unas ventanas que se ubican en el centro de los arcos del techo.

Los invernaderos asimétricos se recomiendan para climas tropicales donde la humedad es elevada y las temperaturas son cálidas. Además, debido a la ventilación cenital la estructura presenta una protección contra fuertes vientos, así como un control eficaz del flujo de aire.

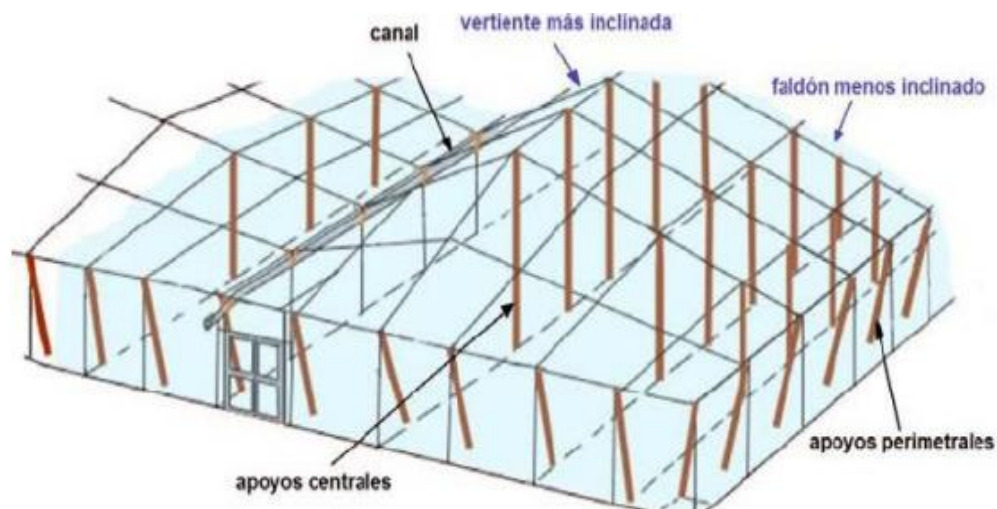


Figura 7. Invernadero asimétrico (Fuente: F. Martín Rodríguez)

#### - Invernadero multitúnel

La característica principal de estos invernaderos es la forma semicircular de la cubierta, conocida como túnel. Existe otra variación de esta tipología de invernaderos conocida como ojival en la que la cubierta en vez de ser semicircular es apuntada, por lo que las pendientes de la cubierta son mayores, proporcionando una mayor captación de radiación solar y facilitando la ventilación interior. (12)

Gracias a la estructura metálica de la base los invernaderos multitúnel pueden soportar eventos meteorológicos extremos como lluvias torrenciales o incluso fuertes granizadas. Se debe destacar la estanqueidad y la gran superficie útil que son claves frente a la entrada de plagas de insectos, así como de favorecer el control climático interior.

Las principales ventajas de estos invernaderos son que presentan pocos obstáculos en su estructura, lo que facilita la movilidad de la maquinaria y de los trabajadores dentro del invernadero. De la misma manera, destacan por la buena ventilación y estanqueidad a la lluvia y al aire, así como la facilidad de su instalación.

Entre las desventajas de los invernaderos multitúnel destacan el alto coste que tienen además de la poca ventilación cuando se instalan varios invernaderos en batería y que aumenta el número de elementos que generan sombreado sobre los cultivos.

Este tipo de invernaderos están diseñados para climas fríos ya que debido a la robustez de su estructura permiten soportar fuertes rachas de viento, así como fuertes tormentas. Con las mejoras oportunas en la estructura y en la cubierta los invernaderos multitúnel se pueden adaptar a climas más cálidos y en ciertos contextos pueden ser ventajosos gracias a su facilidad en el montaje.

En la Figura 8 se presenta la configuración típica de un invernadero tipo multitúnel.

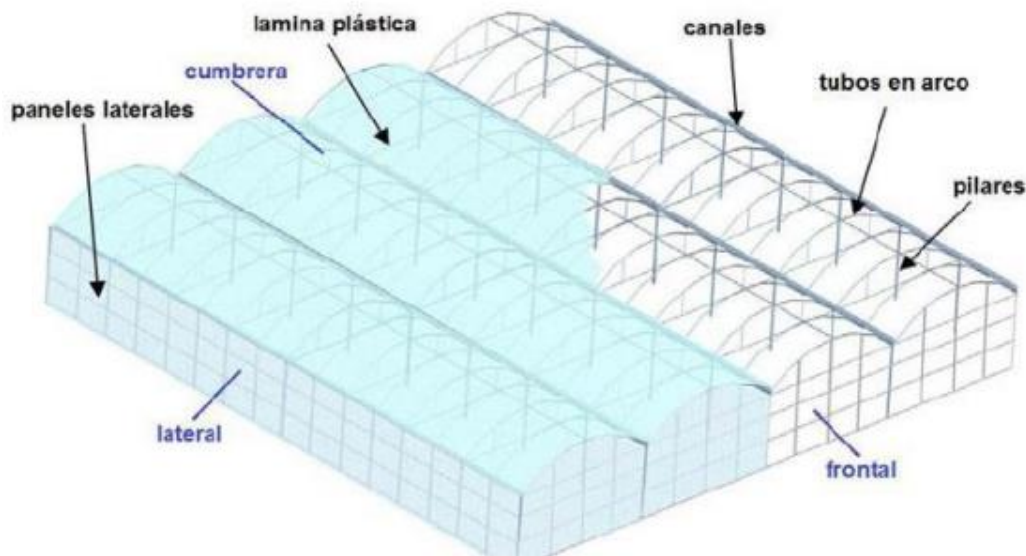


Figura 8. Invernadero multitúnel (Fuente: Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología)

### 2.3.1. Cubiertas

La cubierta de un invernadero es la estructura que recubre el cultivo tanto en la parte lateral como cenital y se considera un elemento fundamental en los invernaderos debido a las numerosas funciones que tiene, entre las que destacan el control de temperatura dentro del invernadero y la protección del cultivo en situaciones meteorológicas adversas y contra plagas.

Para el correcto dimensionamiento del invernadero se deben estudiar las propiedades de cada cubierta y escoger el material según las necesidades del cultivo. Las propiedades de las cubiertas se separan en tres grandes grupos: físicas y mecánicas, ópticas y térmicas. (13)

Respecto a las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de las cubiertas destacan las siguientes:

El peso de los materiales utilizados en las cubiertas es conveniente que sea lo más bajo posible para generar una menor exigencia de esfuerzos a la estructura y aumentar la transmisión de la luz uniforme.

El espesor de la cubierta se relaciona directamente con la transmisión de calor por conducción desde la parte interna del invernadero hacia la parte exterior ya que la conducción de los materiales depende tanto del coeficiente de transmisión térmica como del espesor.

La densidad juega un papel fundamental en la elección del tipo de material de la cubierta ya que influye en la cristalinidad de los polímeros, la flexibilidad, las propiedades térmicas y la permeabilidad.

En cuanto a las propiedades ópticas de la cubierta estas son las más importantes:

La transmitancia se define como la transmisión de la radiación solar incidente y está relacionada con el material, el espesor y la limpieza de la cubierta, entre otros factores

El índice de refracción evalúa cuanta es la reducción de la velocidad de la luz cuando pasa a través del material.

La difusión mide la dispersión de la radiación solar incidente ya que, debido a la adición de materiales a los plásticos, estos pueden difundir la radiación consiguiendo eliminar el efecto sombra sobre el cultivo.

Por último, a la hora de escoger una cubierta se deben evaluar sus propiedades térmicas.

La propiedad térmica más importante es la transmitancia térmica que se define como la capacidad de retención del calor dentro del invernadero. Cuanto mayor sea la transmitancia térmica mayor será la retención del calor en el interior del invernadero puede resultar muy beneficioso en climas fríos.

Los materiales de la cubierta se dividen en tres grandes grupos:

- Cubiertas de vidrio

El vidrio fue el primer material en utilizarse en cubiertas y destaca por su alto valor estético y por la constante luminosidad durante toda su vida útil, si bien es cierto que en caso de condiciones extremas puede sufrir daños y tener que ser reemplazado. (14)

Por este motivo el vidrio más utilizado como cubierta en los invernaderos es el templado, que consiste en vidrio sometido a un proceso de temple para aumentar su durabilidad y resistencia.

La principal ventaja de usar vidrio como material de construcción de la cubierta es la excelente transmisión óptica y térmica que presenta, así como la resistencia a la radiación ultravioleta y la facilidad a la hora de realizar el mantenimiento y limpieza.

Por otra parte, la mayor desventaja de este material es el alto precio que lo convierte en uno de los menos utilizados en los invernaderos. Se debe destacar el elevado peso de este material por lo que se necesitan estructuras rígidas que provocan sombreado sobre el cultivo.

El vidrio se suele utilizar en cubiertas en invernaderos que se encuentran en zonas extremadamente frías o en cultivos en los que se requiere una temperatura elevada y estable.

#### - Cubiertas de plástico rígido (13)

Dentro de los plásticos rígidos destacan los siguientes materiales

##### · Poliéster con fibra de vidrio:

Se fabrica a partir de poliésteres insaturados de los cuales el 65% son resinas termoendurecibles y el 35% fibra de vidrio.

Este material se caracteriza por la alta difusión de la luz incidente lo que produce una iluminación uniforme sobre el cultivo. Además, gracias a su flexibilidad se puede adaptar a distintas estructuras curvas.

Uno de los inconvenientes de estos poliésteres es la facilidad a la erosión por fenómenos atmosféricos como arena, viento o granizo lo que provoca una disminución de la difusión de la luz y pérdida de transparencia. Para evitar esta erosión se añade una capa de gel que protege la lámina y aumenta su vida útil.

##### · Policarbonato (PC)

Las láminas de policarbonato se fabrican a partir de un polímero termoplástico y dan como resultado un material termoplástico transparente y resistente.

La principal ventaja de los policarbonatos es su bajo peso, que sumado a la gran resistencia a impactos que presenta lo convierte en uno de los materiales más utilizados en las cubiertas de los invernaderos.

Entre las desventajas a destacar de los policarbonatos está su coste, que no es excesivamente elevado, pero en comparación con otros materiales plásticos como el polietileno sí lo es. También, presentan una alta degradabilidad ante rayos ultravioleta lo que puede provocar una rápida degradación. Si bien es cierto que es común utilizar una capa protectora contra las radiaciones ultravioletas normalmente aumenta de manera considerable el grosor de la lámina.

##### · Polimetacrilato de metilo (PMM)

Este material se produce de la formación de acrilato de metilo a partir del acetileno y proporcionan un polímero termoplástico transparente con buenas condiciones ópticas y mecánicas.

Entre las ventajas del polimetacrilato destaca la elevada resistencia a fenómenos atmosféricos extremos que minimiza las roturas de las láminas y por tanto el gasto en mantenimiento. La elevada transparencia que tiene permite el paso de la mayor parte de los rayos ultravioletas incidentes, aunque su nivel de difusión es bajo.

El elevado coste de este material es la principal desventaja puesto que en comparación con otros material su precio es considerablemente alto.

- Cubiertas de plástico flexible (13)

· Policloruro de vinilo (PVC)

Se obtiene a partir del acetileno y el etileno y destaca por ser un material rígido al que se le añaden plastificantes para aumentar la flexibilidad de las láminas y otros compuestos para mejorar la transmitancia.

Este material se caracteriza por su elevada capacidad de transmitancia que permite el paso de la mayoría de los rayos ultravioleta, pero con una baja dispersión y una buena opacidad a la radiación térmica.

Uno de los principales inconvenientes es la facilidad de la adhesión de polvo en su superficie externa que se traduce en una bajada de la transmitancia.

· Polietileno (PE)

El polietileno se obtiene de la hulla y del petróleo mediante la polimerización del etileno y se le añaden distintas sustancias con el fin de mejorar sus propiedades.

En la actualidad es el material más utilizado en las cubiertas de los invernaderos debido a sus óptimas cualidades mecánicas, pero principalmente a su bajo coste.

El polietileno destaca por una transparencia alta (entre el 70 y el 85%) y un bajo poder de reflexión y de absorción. Además, de todos los materiales plásticos utilizados para cubiertas, el polietileno es el que menor densidad tiene y por tanto menor peso, lo que permite una estructura más ligera.

Dentro del mercado existen tres tipos de polietileno: polietileno normal, polietileno normal de larga duración y polietileno térmico de larga duración. Este último es el que mejores propiedades presenta, pero su coste es más elevado que los dos anteriores.

· Copolímero etil-acetato de vinilo (EVA)

Se fabrica utilizando copolímeros de etileno y acetato de vinilo modificados mediante un tratamiento térmico. Debido a la combinación de estos elementos se consiguen unas buenas propiedades térmicas y mecánicas.

Los copolímeros EVA presentan una elevada transmitancia de la luz visible, así como una buena resistencia a impactos y a ser rayado.

Las principales desventajas de estos materiales son la gran adherencia al polvo que reduce de manera considerable la transmitancia y la excesiva plasticidad que les impide recuperar su forma natural una vez estirados.

Este tipo de materiales es recomendable para invernaderos situados en climas con temperaturas elevadas y excesiva luminosidad.

### 2.3.2. Área de crecimiento del cultivo

El área de crecimiento del cultivo hace referencia al sustrato en el que se van a desarrollar las plantas. Las funciones principales del sustratos son dos: contener los nutrientes, el aire y el agua que necesitan las plantas y anclar las raíces al suelo para dar firmeza a la planta. Es fundamental tener un terreno fértil para poder desarrollar el cultivo bajo invernadero, por ello se han desarrollado distintas técnicas y materiales que favorecen el desarrollo de los cultivos. (15)

A continuación, se describen los tipos de área de crecimiento de cultivos más comunes en la en el sudeste de la península ibérica.

#### -Enarenado (16)

El enarenado consiste en la aplicación de distintas capas de materiales con el fin de mejorar las condiciones del suelo donde se van a cultivar las plantas. En la técnica del enarenado se colocan tres estratos con diferentes funciones. El primero de los estratos, que no siempre se aplica pues depende del tipo de suelo que se tenga, es una tierra de cañada de unos 30 cm de espesor. Sobre esta capa de arena se coloca una capa de estiércol que varía no llega a 1 cm de espesor. El último estrato es una capa de arena de entre 8 y 10 cm de espesor que se coloca sobre un suelo ya nivelado y con índices de fertilidad normales.

La capa de tierra de cañada tiene como principal función la impermeabilidad del suelo para mejorar la retención de agua del suelo para mantener la humedad del suelo durante un periodo más largo de tiempo. La capa de estiércol es clave para favorecer el crecimiento del cultivo, especialmente de las raíces, ya que es rico en nutrientes y permite un desarrollo más rápido que otro tipo de suelos. La última capa de arena aporta al suelo del invernadero la estabilidad suficiente para permitir el desarrollo de los cultivos y protegerlos. Además, debido a su bajo calor específico hace que se caliente y enfríe con celeridad.

La principal ventaja de la técnica del enarenado reside en sus buenas prestaciones para desarrollar los cultivo en relación con su bajo coste de implantación y mantenimiento.

#### - Cultivo hidropónico (17)

El cultivo hidropónico es una técnica innovadora para el desarrollo de los cultivos que en los últimos años se está asentando como una de las más utilizadas en los invernaderos modernos.

Esta técnica consiste en el cultivo de las plantas en una disolución acuosa que contiene los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas. La disolución acuosa se aplica directamente sobre las raíces de las plantas, que generalmente se colocan sobre un sustrato inerte como perlita o lana de roca, o pueden estar suspendidas en la disolución.

Este tipo de cultivos es común en zonas donde la fertilidad del suelo es baja y pobre en nutrientes o tiene un índice elevado de contaminación. Entre las ventajas del cultivo hidropónico destaca la eficiencia de uso del agua pues se trata de un circuito cerrado en el que el agua se recircula y también destaca el control preciso del crecimiento del cultivo ya que se aplican los nutrientes de manera controlada en función de la etapa de crecimiento en la que se encuentre el cultivo. Por otra parte, la principal desventaja de este tipo de cultivo es el elevado coste de la infraestructura.

#### -Cultivo de turba (18)

La turba es un material orgánico que se forma a partir de la descomposición de materia vegetal en unas condiciones ambientales con poco oxígeno y un exceso de agua. La turba se caracteriza

por tener alta capacidad de retención de nutrientes y de agua, además gracias a su estructura porosa permite el desarrollo de las raíces de los cultivos.

Generalmente la turba se mezcla con otros sustratos como la perlita o la fibra de coco para mejorar las propiedades físicas como la aireación o el drenaje.

Respecto a las otras dos técnicas descritas en este apartado el uso de la turba en invernaderos es menor debido a la dificultad de su extracción y a su elevado coste.

### 2.3.3. Sistema de riego y drenaje

Existen diversas modalidades de riego que según el tipo de cultivo y el tipo y tamaño del invernadero son más adecuados que otros. A continuación, se describen los sistemas de riego más utilizados en invernaderos. (19)

#### - Riego por goteo

La principal característica de este tipo de riego es que se realiza gota a gota de manera que se aprovecha completamente el recurso hídrico. El agua se infiltra en el suelo directamente en la raíz de cada planta mediante un sistema de tuberías.

El riego por goteo es ventajoso ya que se ahorran grandes cantidades de agua y permite mantener constante el nivel de humedad del suelo dentro del invernadero sin que se generen estancamientos de agua. Se debe mencionar que el riego por goteo se puede integrar con sistemas de fertirrigación que permite suministrar de manera simultánea agua y nutrientes al cultivo.

#### - Riego por aspersión

El riego por aspersión consiste en una distribución del agua mediante aspersores distribuidos sobre la estructura del invernadero.

La principal ventaja de este sistema de riego es la amplia cobertura que proporciona, pues si se distribuyen de manera correcta los aspersores se puede conseguir cubrir grandes extensiones de cultivo. Aunque el riego por aspersión también presenta desventajas entre las que destacan una pérdida de la evaporación y poca uniformidad de riego sobre las plantas por lo que se debe diseñar cuidadosamente la distribución de los aspersores dentro del invernadero.

#### - Riego por microaspersión

Este sistema de riego consiste en una variante del riego por aspersión, pero el riego por microaspersión se caracteriza por tener menos alcance y un menor diámetro de gota, por lo que se reducen las pérdidas por evaporación. Gracias a los aspersores colocados estratégicamente en el invernadero se consigue una distribución uniforme de agua que permite maximizar la eficiencia hídrica del sistema.

El riego por microaspersión es ideal para cultivos de plantas y hortalizas de baja altura como la espinaca o la lechuga ya que requieren una distribución uniforme de agua.

#### - Riego por difusión

En el riego por difusión se tiene un deflector fijo con una cobertura relativamente baja, por lo que este tipo de riegos se utiliza en invernaderos que tienen forma de pasillo.

Con el deflector se puede regular la presión de salida del agua y por tanto se puede regular tanto el ángulo de salida como la distancia y el área cubierta por cada deflector.

#### - Riego subterráneo

En el riego subterráneo se dispone de un sistema de tuberías enterrado entre 10 y 50 centímetros que permite que el agua llegue directamente a la raíz de la planta aprovechando de manera más efectiva los recursos.

La ventajas de este tipo de sistema de riego son la distribución uniforme del agua que asegura que todas las plantas reciben la misma cantidad de agua, la optimización del espacio pues al estar enterrado el sistema de riego permite distribuir mejor el espacio y la reducción de evaporación ya que al contar con tuberías el agua no entra en contacto con el ambiente.

#### - Riego por manguera

Este tipo de sistema de riego es el más clásico y antiguo ya que de manera manual y a través de una manguera conectada a una toma de agua se riega el cultivo del invernadero.

El coste del riego con manguera es muy bajo, pero en este sistema de riego predominan las desventajas ya que se debe realizar de manera manual con el esfuerzo que ello supone. Además, no se consigue una uniformidad en el riego por lo que habrá zonas que estén más regadas que otras y las pérdidas por evaporación de agua son mayores.

#### - Riego por nebulización

El riego por nebulización consiste en la expulsión de agua a presión pulverizada mediante unos orificios pequeños de manera que se distribuye en forma de niebla.

Este tipo de sistema de riego se utiliza para aumentar el nivel de humedad relativa y disminuir la temperatura dentro del invernadero, por lo que no es muy común como único sistema de riego en invernaderos.

### 2.3.4. Sistema ventilación

El sistema de ventilación en los invernaderos juega un papel esencial en su dimensionamiento ya que mediante este sistema se pueden controlar variables climáticas como la temperatura y la humedad, pues al ventilar el invernadero se consigue disminuir la temperatura ambiente y la humedad relativa del interior del invernadero. (20)

A continuación, se describen los tipos de ventilación más comunes en los invernaderos:

#### - Ventilación natural:

Este sistema consiste en la abertura manual o automática de ventanas ubicadas en las paredes laterales o en el techo del invernadero y aprovecha las diferencias de presión y temperatura entre el interior y el exterior del invernadero para generar corrientes de convección que permitan la ventilación del invernadero.

La ventajas de la ventilación natural son principalmente su bajo coste, así como su simplicidad. Aunque presenta inconvenientes como la poca precisión en la regulación de los parámetros climáticos ya que no se puede ajustar la humedad y la temperatura deseadas, la dependencia del clima exterior puesto que en días sin viento no es posible realizar una ventilación de este tipo

y la última desventaja es que al abrir las ventanas se pueden introducir en el invernadero contaminantes e insectos que afecten al cultivo.

#### - Ventilación forzada

En la ventilación forzada se utilizan extractores o ventiladores con el fin de mover el aire de dentro del invernadero. Cuando la temperatura y/o la humedad interior del invernadero es elevada los ventiladores se ponen en funcionamiento expulsando el aire caliente hacia el exterior e introduciendo aire desde el exterior.

Entre las ventajas de este tipo de sistemas de ventilación está la precisión de los valores climáticos dentro del invernadero ya que los ventiladores pueden encenderse o apagarse cuando sea necesario. Mientras que entre las desventajas destacan el coste de operación y mantenimiento que en comparación con la ventilación natural es mayor.

### 2.3.5. Sistema de calefacción

Al igual que el sistema de ventilación, es importante dimensionar correctamente el sistema de calefacción para maximizar el rendimiento del cultivo.

El sistema de calefacción permite mantener constante la temperatura óptima del cultivo en las diferentes épocas del año e independientemente de la temperatura exterior. De la misma manera permite el control de la humedad del invernadero que es fundamental para el crecimiento del cultivo. (21)

Entre los sistemas de calefacción más comunes destacan los siguientes:

#### - Calefacción mediante caldera de gas

El sistema de calefacción mediante una caldera de gas es el método de calefacción más tradicional en los invernaderos. Este sistema consta de calderas o calentadores que utilizan gas natural o propano como combustible y mediante un sistema de distribución el aire calentado llega al invernadero aumentando su temperatura.

Adicionales al sistema de calefacción puede haber termostatos que controlan la temperatura interior del invernadero activando o desactivando la caldera en función de las necesidades.

Las principales ventajas de este tipo de sistemas son el bajo coste de la instalación y la rápida actuación de la caldera ya que en cuestión de minutos se puede llegar a la temperatura deseada. Sin embargo, los sistemas de calefacción mediante caldera de gas requieren un mantenimiento regular para asegurar el correcto funcionamiento y generan emisiones contaminantes a la atmósfera.

#### - Calefacción por agua caliente

La principal diferencia entre el sistema de gas y el de agua caliente reside en el fluido caloportador ya que en este sistema se utiliza el agua. Al igual que el sistema descrito anteriormente, una caldera alimentada por un combustible calienta el agua que, a través de un sistema de tuberías generalmente localizadas en el suelo, aunque pueden estar situadas en las paredes, aumentan la temperatura interior del invernadero. Estos sistemas cuentan con termostatos que regulan la temperatura y activan o desactivan la caldera según sea necesario.

Entre las ventajas del sistema de agua caliente está la distribución uniforme del calor ya que al usar el sistema de tuberías es más sencillo crear la uniformidad. Así como el control preciso de

la temperatura puesto que mediante los termostatos es relativamente sencillo ajustar la temperatura interior del invernadero. Una de las principales desventajas de este tipo de sistema de calefacción es el alto coste inicial que tiene, que sumado a la dificultad de la instalación tiene como consecuencia que no sea muy habitual su uso en invernaderos.

### 2.3.6. Sistema de control

El control climático dentro de los invernaderos es esencial para asegurar el correcto crecimiento y desarrollo del cultivo. De la misma manera se debe monitorizar con sensores específicos para proteger el cultivo de condiciones climáticas adversas y de plagas y enfermedades que puedan afectar al cultivo. A continuación, se detallan las variables climáticas más importantes a la hora de dimensionar un invernadero y los sensores que las monitorizan.

#### - Temperatura ambiental (22)

El control de la temperatura es fundamental para el buen funcionamiento del invernadero ya que la temperatura tiene un impacto directo en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La temperatura influye en la fotosíntesis, la respiración, la absorción de agua y nutrientes, y la transpiración, entre otros factores.

En el ámbito de la agricultura se diferencian tres temperaturas que varían en función del tipo de cultivo y que a continuación se detallan.

- Temperatura mínima: Es la temperatura a la que una planta deja de crecer, por debajo de esta temperatura la planta no se puede desarrollar y muere. En los invernaderos españoles la temperatura mínima ronda los 10-15 °C y depende del tipo de cultivo.

- Temperatura óptima: Se conoce como temperatura óptima a la temperatura en la que el desarrollo de la planta es más rápido y eficiente. El principal objetivo de los invernaderos es mantener esta temperatura óptima el mayor tiempo posible para acortar los plazos de crecimiento de las plantas y para poder plantar cultivos fuera de su temporada habitual de plantación. Esta temperatura en los invernaderos españoles se sitúa en torno a 18- 25 °C

- Temperatura máxima: La temperatura máxima que soportan las plantas marca el límite superior de temperatura que puede alcanzarse en los invernaderos y en el caso de España muy ocasionalmente supera los 30 °C.

Un factor clave que se debe estudiar a la hora de dimensionar un invernadero es la diferencia de temperatura diurna y nocturna (23), que se conoce como DIF y puede ser negativo, cero o positivo. Estudiando el valor de esta diferencia se puede controlar la altura de la planta y el número de hojas, entre otros factores. Cuanto mayor es el valor del DIF mayor es la altura de planta, por ello en los invernaderos se tiende a cultivar con una DIF positiva. Sin embargo, para obtener un mayor número de hojas en un tallo se debe aumentar la temperatura media diaria. Al modificar el DIF se modifica también la temperatura media que también influye en el crecimiento de los cultivos. Si se eleva la temperatura media los cultivos se favorece el crecimiento y la floración y es el principal objetivo de los invernaderos.

Se conoce como termoperiodismo a la capacidad de las plantas de diferenciar la temperatura diurna y nocturna y responder de distinta manera ante ellas. Cuando se varían estas temperaturas de manera controlada y estudiada se puede influir en las etapas de crecimiento de las plantas como la germinación, la floración y la maduración de sus frutos.

#### - Temperatura del cultivo (12)

Conociendo la temperatura del cultivo se puede estudiar su comportamiento fisiológico y como mejorarlo. En el periodo diurno las plantas reciben la energía solar y pierden calor por el proceso de la transpiración, que consiste en que los tejidos de la planta liberan agua y cuando esta agua se evapora absorbe gran cantidad de calor latente. Sin embargo, por la noche la planta pierde energía en forma de radiación infrarroja por lo que se reduce el proceso de transpiración.

La temperatura de la planta depende de diversos factores entre los que destacan la temperatura ambiental, la humedad relativa y la luz incidente en el cultivo. El cultivo se debe encontrar en una temperatura de equilibrio que no supere unos ciertos valores.

Dependiendo de las condiciones ambientales dentro del invernadero, el intercambio energético de la planta con el ambiente puede ser positivo o negativo. En el caso de que la radiación solar incidente sobre el cultivo sea alta y la planta no pueda eliminar suficiente calor latente por medio de la transpiración, por tener una superficie de sus hojas baja o no disponer de suficiente agua, puede desembocar en una situación de estrés térmico, en la que la planta se calienta en exceso para ser capaz de perder calor.

En la época invernal en la que la radiación solar incidente es menor y por tanto la temperatura ambiental también, la planta reduce la transpiración con el objetivo de mantener la temperatura lo más elevada posible. Para ello, la planta cierra los estomas para reducir la pérdida de agua, pero ello supone una menor actividad fotosintética y por tanto un menor crecimiento.

#### - Temperatura del suelo (12)

La temperatura del suelo es otro factor climático que se debe monitorizar y controlar para asegurar un correcto funcionamiento del invernadero debido a las numerosas interacciones existentes entre el suelo y el cultivo, ya que la temperatura del suelo influye en la germinación de las semillas, el crecimiento de los cultivos, entre otros factores.

La temperatura del suelo varía de manera diaria y anual debido al intercambio de calor por convección entre el ambiente y el suelo. Los factores más influyentes en la temperatura a la que se encuentra el suelo son los siguientes: el contenido en materia orgánica, el color del suelo, la cantidad de agua que se evapora y la cantidad de radiación solar que incide sobre el suelo.

La temperatura del suelo, al igual que el resto de las temperaturas ya explicadas depende del tipo de cultivo, pero generalmente se sitúa entre 25 y 30 °C.

#### - Radiación neta (12)

La radiación neta se define como la diferencia entre la radiación solar incidente en el invernadero y la que sale de él. La radiación neta depende de la climatología de la zona, así como de los coeficientes de reflexión y de absorción de la cubierta del invernadero, de las plantas y del suelo.

Mediante la radiación neta se puede realizar un balance de energía dentro del invernadero pues existe un equilibrio entre la energía de la radiación solar incidente y las pérdidas energéticas por convección y conducción, la absorción de calor del suelo, el intercambio energético con el aire exterior y la transpiración de las plantas.

En la zona mediterránea principalmente en los meses de verano donde la radiación neta es mayor, una práctica habitual para reducir y controlar la temperatura dentro del invernadero

consiste en aplicar una solución acuosa de carbonato cálcico sobre la cubierta para reducir la transmisividad y por tanto la radiación entrante en el invernadero.

#### - Radiación fotosintéticamente activa (12)

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) es aquella cuya longitud de onda se encuentra entre 400 y 700 nm y por tanto es útil para las plantas a la hora de realizar la fotosíntesis. Esta radiación se considera la más importante para las plantas por lo que debe ser medida y evaluada de manera constante ya que si tiene un valor excesivamente elevado o bajo puede causar alteraciones al proceso fotosintético y por tanto empeorar el rendimiento del cultivo.

Mediante los elementos de la cubierta y el uso de blanqueadores en la parte exterior de la cubierta, se consigue filtrar la radiación incidente y dejar pasar solo la fotosintéticamente activa.

#### - Velocidad del aire (12)

El movimiento del aire dentro de los invernaderos se produce principalmente debido a dos procesos: la convección natural y a la convección forzada, en la que el aire del interior del invernadero se mueve mediante ventiladores (ventilación forzada) o por el impulso del viento (ventilación natural).

Los intercambios de energía y materia se relacionan directamente con el movimiento del aire. Por ello, si la velocidad del aire es demasiado baja se produce un fenómeno de estancamiento que tiene como consecuencia una disminución del vapor de agua, que disminuye el proceso de transpiración, de los niveles de CO<sub>2</sub>, que reducen la actividad fotosintética, y del intercambio de energía con el suelo.

En el caso contrario en el que la velocidad del aire es elevada se pueden producir situaciones de estrés hídrico por una elevada transpiración de la plantación.

#### - Humedad relativa (24)

La humedad relativa indica la cantidad de vapor de agua presente en aire en relación la máxima cantidad de vapor de agua que dicho aire puede contener para unas condiciones de temperatura y presión determinadas.

La temperatura se relaciona de manera inversamente proporcional con la humedad relativa, de manera que cuando aumenta la temperatura, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto la humedad relativa disminuye. Y de manera inversa, a temperaturas bajas la humedad relativa aumenta.

Controlar la humedad relativa es esencial para mejorar el rendimiento de los cultivos ya que si la humedad relativa es demasiado alta, las plantas pueden reducir su transpiración y por tanto reducir su crecimiento. También afecta de manera contraria ya que si la humedad relativa es muy baja las plantas transpiran en exceso y puede llegar a deshidratarse.

Por ello se debe monitorizar y controlar constantemente la humedad relativa dentro del invernadero. Cuando hay un exceso de humedad relativa se puede disminuir el porcentaje mediante la ventilación y el aumento de temperatura con sistemas de calefacción y la falta de humedad relativa se puede corregir mediante la pulverización de agua con sistemas de riego.

#### - Déficit de presión de vapor (23)

El déficit de presión de vapor (DPV) se define como la diferencia de contenido de vapor de agua entre el aire y el punto de saturación del ambiente. Por ello, el DPV depende directamente de la humedad relativa, de la temperatura ambiental y de la temperatura de la planta. Si el valor de DPV es elevado la planta podrá eliminar más agua por transpiración, pero si el DPV es bajo la planta puede llegar a estresarse debido a que no es capaz de reemplazar el agua que pierde por transpiración.

Es común que el valor del DPV varíe entre la noche y el día, pero siempre en un rango de valores determinado ya que si los valores del DPV se mantienen altos durante un periodo continuado pueden afectar de manera negativa a la planta que no va a ser capaz de recuperar el agua suficiente por la noche y derivará en pérdida de hojas o de pétalos.

La transpiración (25) es el proceso mediante el que las plantas regulan su comportamiento en función de las condiciones climáticas del medio. La transpiración consiste en la apertura o cierre de pequeñas aberturas en las hojas que se conocen como estomas. Cuanto mayor sea la temperatura más agua se evaporará debido a la apertura del estoma y por lo tanto más gases serán capaces de entrar y salir de la hoja. Debido a que es difícil medir cuando los estomas están abiertos o cerrados, la transpiración se mide en función de la DPV. Mediante la transpiración las plantas pueden regular su temperatura interna y la absorción de nutrientes del suelo y la pérdida de agua, entre otras cosas.

#### - Iluminación (26)

Al igual que el resto de los factores descritos en este apartado, la iluminación en los invernaderos se debe controlar para maximizar el rendimiento y la producción del cultivo. Si la iluminación aumenta deben aumentar también la humedad relativa y la concentración de CO<sub>2</sub> para maximizar el proceso fotosintético.

Existen medidas tanto para aumentar la luminosidad natural como para disminuirla que se aplican según el periodo anual y las condiciones climatológicas. Generalmente se intenta aumentar en los meses de invierno, en los que las horas de sol son menores para ello se utilizan materiales que reduzcan las sombras y tengan buena transparencia, así como la adecuada orientación del invernadero. Sin embargo, en los meses de verano se toman medidas para reducir la luminosidad ya que esta puede ser perjudicial para el desarrollo de las plantaciones. Entre las medidas que disminuyen la luminosidad destaca el blanqueo de cubierta y las mallas de sombreo.

#### - CO<sub>2</sub> (27)

La concentración de CO<sub>2</sub> en el invernadero desempeña un papel fundamental en el comportamiento de las plantas ya que es esencial para la fotosíntesis de las plantas por lo que repercute en el rendimiento del cultivo y en la calidad de la cosecha.

La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se encuentra en torno al 0,03%, sin embargo, la concentración ideal dentro de los invernaderos es del 0,1-0,2%, dependiendo del tipo de cultivo. Por ello, una práctica común en los invernaderos es la inyección de dióxido de carbono para lograr mejorar el rendimiento en torno al 25%.

Durante los periodos nocturnos en los que la actividad fotosintética es nula, los niveles de CO<sub>2</sub> aumentan de manera considerable debido a la respiración de las plantas, mientras que en los

periodos en los que el cultivo recibe los rayos solares la concentración de CO<sub>2</sub> disminuye debido a la actividad fotosintética.

Se debe destacar que la tasa de absorción de CO<sub>2</sub> de las plantas está estrechamente relacionada con la cantidad de luz recibida, por lo que se debe controlar estos dos parámetros para maximizar el rendimiento de la plantación.

Según lo mencionado en este apartado el control las variables climáticas es esencial para asegurar un correcto dimensionamiento del invernadero y para controlar estas variables climáticas se deben utilizar los sensores adecuados. A continuación, se detallan los tipos de sensores más utilizados en los invernaderos según la variable climática.

#### - Sensores de radiación (28)

A la hora de clasificar los tipos de radiación según la longitud de onda se diferencian tres tipos: radiación ultravioleta (inferior a 380 nm), luz visible por el ojo humano, que incluye la radiación fotosintéticamente activa (380-770 nm) y la radiación infrarroja (superior a 770nm).

En la actualidad en el mercado hay una amplia gama de sensores para medir los tres tipos de radiación anteriormente descritos, pero en la mayoría de los invernaderos se utilizan sensores de radiación de luz visible, de PAR y de radiación solar global.

##### · Piranómetro

Este tipo de sensor mide la radiación global, que es la suma de la directa y la difusa, sobre una superficie horizontal. Existen dos tipos de piranómetros: los basados en sensores termoelectrónicos y los basados en fotocélulas.

Los piranómetros basados en sensores termoelectrónicos están formados por dos detectores de temperatura que pueden ser termistores o termopilas. Uno de estos sensores se utiliza como referencia y está conectado a una superficie protegida de la radiación mientras que el otro está unido a una superficie altamente absorbente. La radiación global en estos piranómetros se mide como la diferencia de temperaturas de los dos sensores.

Los piranómetros basados en fotocélulas están formados por células de silicio que absorben radiación y generan una corriente eléctrica. Este tipo de piranómetros son bastante más precisos que el anteriormente descrito.

#### - Sensores de temperatura (28)

Los sensores de temperatura se caracterizan por generar respuestas de expansión, radiativas o eléctricas a las variaciones de temperatura. Estas respuestas se trasladan a los equipos de control donde son analizadas.

##### · Termómetro de resistencia

Se basa en la medida de la resistencia de una pieza metálica uniforme, generalmente platino, ya que la relación entre la temperatura y la resistencia del metal es prácticamente lineal.

Este tipo de termómetros se caracterizan por su estabilidad, precisión y fiabilidad.

##### · Termistor

La principal diferencia entre el termistor y el termómetro de resistencia es que, en lugar de medir la temperatura en una pieza metálica, lo hacen en un semiconductor, generalmente un óxido

metálico). En estos sensores la relación entre la resistencia y la temperatura es exponencial, de manera que la resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura.

Los termistores se consideran más sensibles que los termómetros de resistencia, aunque el tiempo de respuesta ante un cambio de temperatura depende del tamaño del termistor.

#### · Termopar

Se trata de un circuito compuesto por dos hilos metálicos de diferentes materiales y unidos en sus extremos. Una de las dos uniones sirve como referencia y cuando los hilos se encuentran a diferente temperatura se genera una fuerza electromotriz y un voltaje que queda registrado. En este tipo de sensores el voltaje es proporcional a la diferencia de temperatura.

Las ventajas de estos sensores son la rápida respuesta a cambios de temperatura y el bajo coste que tienen.

#### - Sensores de humedad (28)

Los sensores de humedad en invernaderos son fundamentales para evaluar las condiciones ambientales relacionadas con la humedad relativa en el interior del invernadero. El control de la humedad relativa es muy importante ya que un exceso de humedad puede provocar una reducción del crecimiento de los frutos, mientras que la falta de humedad se traduce en la deshidratación del cultivo.

#### · Psicrómetro

Consta de dos termómetros, que pueden ser termopares, termistores o termómetros de resistencia y que miden la temperatura interior del invernadero. Uno de estos dos termómetros se utiliza como referencia y está cubierto con una camisa y conectado a un depósito de agua destilada para mantenerlo en todo momento húmedo.

En condiciones climáticas de no saturación se produce la evaporación en el termómetro rodeado por la camisa por lo que ese termómetro se enfría hasta alcanzar un equilibrio en el que el aire se satura. Para medir la presión de vapor se debe hacer la diferencia entre el termómetro seco y el húmedo.

El principal inconveniente de los psicrómetros es que debe haber una velocidad del aire superior a los 2 m/s para evitar que la humedad relativa medida sea únicamente la que se encuentra en las proximidades de los termómetros.

#### · Higrómetro de resistencia

El higrómetro de resistencia se compone de un sustrato aislante y cerámico sobre el que se tienen dos electrodos unidos y cubiertos por un polímero que absorbe el agua. Para medir la humedad, se debe evaluar la resistencia eléctrica del polímero que varía de manera exponencial y negativa según el contenido de agua.

Este tipo de higrómetros es recomendable para valores elevados de humedad.

#### · Higrómetro de capacitancia

Los higrómetros de capacitancia miden el cambio de capacitancia de un material dieléctrico debido a la absorción de agua. Estos higrómetros constan de un sensor formado por un sustrato cerámico y recubierto por un polímero dieléctrico que al absorber agua cambia sus propiedades dieléctricas y por tanto su capacitancia.

Estos sensores responden rápidamente a cambios de humedad y son adecuado para niveles bajos de humedad. Los principales inconvenientes es que son susceptibles de ser contaminados por el polvo y que para niveles de humedad mayores al 85% la fiabilidad disminuye de manera drástica.

### 2.3.7. Sistema de iluminación

En el sistema de iluminación se incluyen sistemas que aumentan la iluminación dentro de los invernaderos y también están incluidas las tecnologías que permite reducir la iluminación incidente sobre el invernadero cuando esta es excesiva.

Los sistemas que aumentan la iluminación en el interior del invernadero son lámparas incandescentes o de descarga de gases que permiten incrementar el número de horas que el cultivo está expuesto a la radiación y de esta manera aumentar el periodo fotosintético. En la actualidad es común el uso lámparas LED que son más eficientes y económicas que las tradicionales. (29)

En el sureste de la península ibérica este tipo de sistemas de iluminación artificial son poco comunes ya que la intensidad de radiación solar y la duración del día es suficiente para asegurar las exigencias de los cultivos de la zona. (12)

Debido a las condiciones climatológicas de la zona sur de España, donde en verano se superan los 30 °C, son más comunes los sistemas para reducir la radiación solar incidente en el invernadero.

Para evitar que los cultivos entren en condiciones de estrés hídrico y se reduzca la productividad, la técnica más utilizada para reducir la radiación solar es el encalado. El encalado o blanqueado consiste en aplicar una o varias capas de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) sobre la cubierta de los invernaderos. De esta manera se consigue reducir la transmisividad de la cubierta y por tanto también se reduce la radiación que llega al interior del invernadero, lo que se traduce en una menor temperatura y humedad relativa. (20)

Otra técnica muy extendida son las pantallas térmicas que se colocan sobre la cubierta en los meses donde la radiación solar es mayor, es decir los meses de verano, con el fin de reducir la temperatura en el interior del invernadero y por tanto disminuir las necesidades de refrigeración.

En la actualidad existen tres tipos de pantallas:

- Pantallas de sombreado que pueden ser abiertas (con poros) o cerradas tienen como principal objetivo reducir la radiación directa y evitar las temperaturas altas y por tanto el estrés hídrico del cultivo.
- Pantallas de oscurecimiento que son totalmente opacas y se utilizan en invernaderos con luz artificial para limitar las horas de luz que recibe el cultivo y regular el fotoperiodo.
- Pantallas térmicas son las más utilizadas cuando el objetivo del sombreado es optimizar el aprovechamiento energético, ya que con estas pantallas se aumenta la temperatura nocturna y por lo tanto se reducen las pérdidas de calor en este periodo.

Según diversos estudios, la combinación de sistemas de ventilación naturales junto con sistemas de sombreado dinámicos permite aumentar de manera significativa la producción y la calidad del cultivo.

### 2.3.8. Sistemas auxiliares

Tal y como se menciona en el artículo 'Caracterización de los invernaderos en Andalucía' (30) en el 2015, año en el que se realizó el estudio, el 80% de los invernaderos situados en el sudeste de la península ibérica contaban con una balsa de riego situada, generalmente en la parcela del invernadero.

Los principales motivos de la construcción de balsas anexas a los invernaderos son los siguientes: asegurar suministro de agua constante para el cultivo, recogida y aprovechamiento de aguas pluviales y favorecer la regulación del riego.

La principal diferencia entre balsa y un embalse reside en el tipo de construcción que se tiene. Mientras que el embalse consiste en la excavación de taludes inclinados que se impermeabilizan con materiales como el PVC para evitar el filtrado del agua, las balsas son construcciones verticales mejor construidas e impermeabilizadas.

El tamaño y capacidad de las balsas depende del tamaño del invernadero y del tipo de cultivo, pero la media en España se sitúa en torno a los 740 m<sup>3</sup>, sin embargo, la media de capacidad de los embalses en España es considerablemente superior ya que es de 2000 m<sup>3</sup> aproximadamente. En algunas zonas es común cubrir la balsa con algún tipo de plástico para evitar las pérdidas por evaporación.

El almacén de los invernaderos consiste en una pequeña caseta que se sitúa en la parcela del invernadero y que se utiliza para guardar las herramientas y maquinaria necesaria para la explotación del cultivo. Algunos de ellos cuentan también con un aseo y una ducha para los trabajadores del invernadero.

Generalmente los almacenes están contruidos de chapa metálica para abaratar los costes, aunque también pueden estar contruidos con placas de hormigón o bloques de cemento.

### 3. Definición de la instalación

#### 3.1. Ubicación

En la Figura 9 se aprecia la distribución de los invernaderos en la provincia de Málaga. Se debe destacar que la mayor parte de ellos están situados en los términos municipales de Torrox, Vélez - Málaga y Algarrobo.

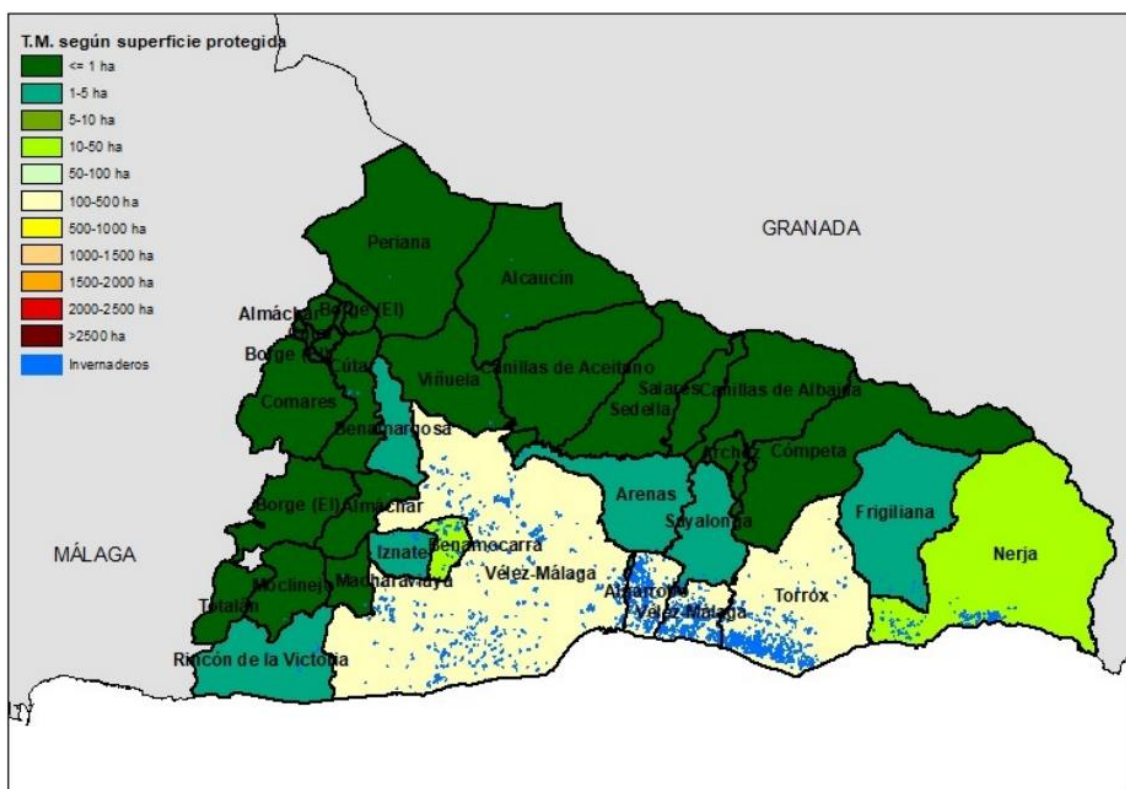


Figura 9. Distribución de invernaderos en la provincia de Málaga (Fuente: Junta de Andalucía)

Para realizar este estudio se ha decidido que la ubicación del invernadero será en Málaga, más concretamente en el término municipal de Algarrobo situado a unos 40 km de la ciudad de Málaga. Las coordenadas exactas de Algarrobo son: 36°46'41"N 4°3'4"E

Algarrobo es un pequeño municipio malagueño de 9,73 km<sup>2</sup> de superficie, situado en la zona este de la provincia de Málaga. La distancia al mar es de apenas 3 km y la altitud respecto del nivel del mar es 65m, por lo que las condiciones climatológicas de la zona se verán afectadas por la influencia marina.

Según el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía la población total de Algarrobo en 2022 era de 6625 personas, siendo la edad media de la población 44 años. (31)

Tal y como se puede observar en la Figura 10, extraída de Google Maps, en el término municipal de Algarrobo existen numerosas parcelas dedicadas al cultivo agrícola bajo invernadero. En 2020 en Algarrobo había un total de 107 hectáreas ocupadas por invernaderos, siendo el tercer municipio de la provincia de Málaga con más hectáreas dedicadas al cultivo bajo invernadero por detrás de Torrox y Vélez – Málaga. Desde 2001 el número de hectáreas dedicadas a los invernaderos se ha mantenido entre 80 y 100, siendo 2020 el primer año que se supera dicha cifra. (32)



Figura 10. Imagen satélite de Algarrobo (Fuente: Google Maps)

Como se puede observar en las Figura 11 y 12, el tipo de invernadero que predomina en esta zona malagueña es el de raspa y amagado ya que como se ha descrito en el apartado 2.3 es el más utilizado en la zona del sudeste español debido a las buenas condiciones que presenta, pero principalmente debido a su bajo coste.

En las imágenes también se aprecia que gran parte de los invernaderos cuentan en su parcela con una balsa de agua usada generalmente para el riego de los cultivos. Otro elemento característico de las parcelas dedicadas al cultivo en invernaderos es la existencia de un almacén agrícola para almacenar tanto las herramientas como los productos necesarios para el cultivo.



Figura 11. Invernaderos en Algarrobo (Fuente: Google Earth)



Figura 12. Invernaderos en Algarrobo (Fuente: Google Maps)

### 3.2. Condiciones climáticas de la zona

Para dimensionar el invernadero, es esencial considerar las condiciones climáticas de la zona, ya que estas influirán directamente en el desarrollo del cultivo. Según estas variables se seleccionará el tipo de invernadero y su cubierta adecuada y se dimensionarán los sistemas de riego, ventilación y calefacción.

En la Tabla 3 se recogen los valores mensuales de las temperaturas media, mínima y máxima, la precipitación, la humedad y la velocidad del viento de un año meteorológico típico en Algarrobo.

	Temperatura media	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Precipitación	Humedad	Velocidad del viento
Mes	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[%]	[m/s]
Enero	10,5	7,8	13,3	60	76	3,98
Febrero	10,9	8,1	13,6	51	74	5,37
Marzo	12,7	9,7	15,5	51	73	4,13
Abril	14,6	11,5	17,3	42	72	3,8
Mayo	17,6	14,3	20,4	26	69	2,95
Junio	21,7	18,2	24,5	9	64	2,96
Julio	24,6	20,9	27,6	2	60	2,81
Agosto	24,8	21,4	27,7	4	63	2,25
Septiembre	21,7	16,6	24,3	21	70	2,68
Octubre	18,3	15,5	20,8	58	75	2,78
Noviembre	13,6	11	16,1	70	74	5,18
Diciembre	11,4	9	14	77	77	4,56
Anual	16,87	13,67	19,59	39,25	70,58	3,62

Tabla 3. Condiciones climáticas en Algarrobo en un año meteorológico típico (Fuente: Weather Spark)

Los datos más llamativos de la Tabla 3 son los valores de temperatura en los que se puede apreciar que la amplitud térmica, diferencia entre temperatura máxima y mínima, no es elevada debido a que el municipio de Algarrobo se encuentra en una zona con clima mediterráneo y está constantemente influenciado por la cercanía al mar.

En cuanto a las precipitaciones se puede observar que son muy escasas en los meses de verano y ligeramente superiores en los meses de primavera, otoño e invierno, pero siguen siendo bajas si se comparan con la media anual de la península ibérica que se sitúa en torno a 560 mm. (33)

Debido a la influencia del mar, la humedad en esta zona es considerable y afectará al desarrollo del cultivo por lo que deberá ser controlada y evaluada constantemente para evitar que afecte negativamente al desarrollo del cultivo. Por último, se debe comentar que la velocidad del viento es mayor en los meses en los que la temperatura es más baja debido a influencia de la temperatura en la densidad del aire.

Respecto a la dirección predominante del viento debe mencionarse que varía durante el año, ya que en los meses estivos la dirección predominante es el oeste, mientras que durante el resto del año la dirección principal del viento es el este. (34)

### 3.3. Descripción de la instalación

#### 3.3.1. Estructura y cubierta

Para este caso práctico se ha decidido dimensionar dos invernaderos de tipo raspa y amagado ya que son el tipo de invernadero más predominante en la zona de Vélez-Málaga. Las dimensiones estándares de los invernaderos de raspa y amagado son: longitud 100 metros, anchura 80 metros y altura de raspa 4 metros. Para este caso práctico se ha optado por dimensionar dos invernaderos de raspa y amagado, por lo que cada invernadero ocupará una superficie de 8000

m<sup>2</sup> que se corresponde con 0,8 ha y la superficie total ocupada por los invernaderos será de 1,6 ha.

Como se ha referido anteriormente en el apartado 2.3 los invernaderos de raspa y amagado se caracterizan por presentar una buena rentabilidad a la vez que unos costes bajos. En este apartado se desglosará cada uno de los sistemas y elementos que formarán el invernadero.

En la Figura 13 se puede apreciar que la estructura de los invernaderos raspa y amagado es flexible y está formado por módulos colocados a dos aguas formando una bóveda que facilita el drenaje de agua de lluvia y mejora la resistencia al viento.

En cuanto a la cubierta, está formada principalmente por láminas de polietileno y colocadas entre dos mallas de alambre. En la parte superior de la cubierta las láminas de polietileno forman un ángulo variable entre 6 y 20 °. Si el ángulo de la cubierta es mayor, mayor será la radiación solar que se intercepta dentro del invernadero, pero mayores serán también los esfuerzos que debe soportar la estructura debido, entre otras cosas, a la acción del viento. Para este caso práctico se ha decidido de que inclinación de la parte superior será de 20 °. En la cubierta se diferencian dos zonas: el amagado que es la zona inferior donde se colocarán el sistema de evacuación de aguas pluviales y la raspa que corresponde con la intersección superior de la cubierta.

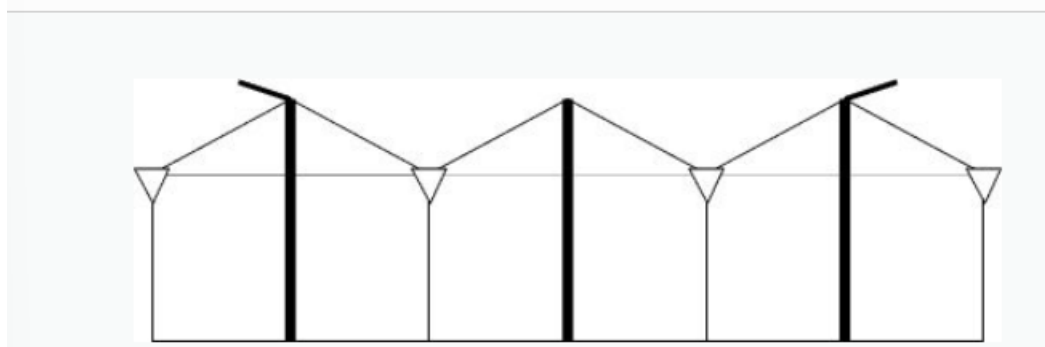


Figura 13. Invernadero raspa y amagado (Fuente: Infoagro)

### 3.3.2. Área de crecimiento del cultivo

En la zona del sudeste de la península ibérica predomina el cultivo en suelo en forma de enarenado consiste en la colocación de una serie de estratos que permitirán reducir la pérdida de agua de riego y favorecer el crecimiento de las plantas.

En este caso práctico los estratos a aplicar en el terreno del invernadero son tres capas diferenciadas. La primera de ellas es una capa de arcilla de unos 20 cm de espesor, la segunda capa de materia orgánica o estiércol de 1,6 cm y por último una capa de arena fina de 8 cm de espesor.

### 3.3.3. Sistema de riego

El sistema de riego escogido para el invernadero raspa y amagado es riego por goteo, que tal y como se ha descrito en el apartado 2.3.3 consiste en regar gota a gota cada una de las plantas

del invernadero maximizando la eficiencia del uso del agua. Además, permite la distribución de elementos fitosanitarios necesarios para el buen crecimiento de los cultivos.

El sistema de riego por goteo está formado por el cabezal de riego, la red de riego, que distribuye tanto el agua como los fertilizantes y por último el equipo de tratamientos fitosanitarios. (35)

El cabezal de riego está constituido por numerosos elementos que se detallan a continuación:

- Bomba de aspiración: Es el elemento encargado de suministrar la presión necesaria para que el agua llegue a todas las plantas.

- Equipo de filtrado: Consiste en numerosos filtros utilizados para eliminar las partículas sólidas en suspensión y evitar problemas en la instalación.

- Equipo de fertirrigación: Es el componente más importante del cabezal de riego pues es necesario para la inyección de los fertilizantes para las plantas. Este equipo de fertirrigación está formado a su vez por los siguientes componentes:

· Equipo de control del riego

· Sistema de llenado de depósitos y removedor soplante con distribuidores de salidas.

· Tanques de fertirrigación: Son depósitos de polietileno en los que se dispone de la disolución con fertilizantes que será transportada a las plantas. En general se dispone de un tanque para el abono y otro tanque para los fertilizantes.

· Elementos de control y sensores de medida: Sondas para medir el pH, manómetros, filtros, caudalímetros y electroválvulas.

· Instalación de inyección de productos especiales: depósito de PE de 100 litros con tapas, electrobombas, doble rodete, venturis, sistema de filtrado y accesorios de montaje.

· Cuadro eléctrico y cableado: Consiste en el conjunto de cables y cuadro eléctrico necesarios para el funcionamiento de los elementos anteriormente descritos.

La red de riego consiste en el sistema de tuberías que distribuye el agua y los fertilizantes a cada una de las plantas. Para este caso práctico se ha decidido optar por unas tuberías portagoteros con una separación de 0,5 metros entre cada gotero.

El sistema para tratamientos fitosanitarios está formado por una bomba hidráulica y los correspondientes colectores internos, un depósito de polietileno para almacenar los fertilizantes y tuberías de polietileno.

#### 3.3.4. Sistema de ventilación

El sistema utilizado para disminuir la temperatura en el interior del invernadero será un sistema pasivo. Se trata de un sistema de ventilación natural que se basa en las corrientes de convección que se generan dentro del invernadero debido a la apertura de ventanas laterales y cenitales abatibles, siguiendo la tendencia de los invernaderos del sureste ibérico. (20)

Si no existen sistema de ventilación forzada, cuando la radiación incidente sobre la cubierta es elevada, generalmente la temperatura en el interior del invernadero es mayor que en el exterior, por lo que la apertura de las ventanas cenitales y laterales provoca un intercambio de aire. De

tal manera que, con las ventanas abiertas, el aire caliente saldrá por las superficie cenital de la cubierta mientras entra aire frío por las ventanas laterales. (36)

En general, los invernaderos tipo raspa y amagado cuentan con ventilación lateral y cenital. Según el IDAE (4), la superficie de ventilación debe estar entre un 20 y un 30% respecto a la superficie del suelo invernadero. Por lo tanto, para este caso práctico la superficie total de ventilación deberá situarse en torno a 4000 m<sup>2</sup>. La superficie de ventilación cenital debe ser de al menos un tercio de la superficie total de ventilación, porque será de 1333 m<sup>2</sup> y la superficie lateral será de 2667 m<sup>2</sup>.

Es necesario que las aberturas cenitales y laterales se cierren herméticamente para asegurar la estanqueidad del invernadero y por lo tanto que se mantiene la temperatura interior en los periodos más fríos.

Adicionalmente se deben colocar mallas antinsectos en todas las ventanas laterales y cenitales para evitar la entrada de plagas que puedan transmitir enfermedades al cultivo. Estas mallas antinsectos deben tener al menos una porosidad del 40% para permitir el paso del aire a través de ellas y permitir la ventilación natural del invernadero.

Para maximizar las renovaciones del aire del interior del invernadero mediante el sistema de ventilación natural, el invernadero se debe orientar de manera que las ventanas se sitúen de manera perpendicular a los vientos predominantes en verano.

Como se ha comentado anteriormente la dirección del viento predominante en Algarrobo es el oeste en los meses veraniegos y el este durante el resto del año. Sin embargo, en este caso práctico en el que durante el verano no va a haber cultivo, se ha decidido orientar en sentido este-oeste para maximizar la producción fotovoltaica.

### 3.3.5. Sistema de calefacción

Para este caso práctico se ha optado, siguiendo con la tendencia de los invernaderos de la zona, por un sistema de calefacción sencillo de aire caliente que permite un rápido y eficaz calentamiento del invernadero. Este tipo de sistemas deben ser capaz de responder en poco tiempo a una bajada de temperaturas para evitar que los cultivos se vean afectados. El tiempo de actuación de este sistema depende de las condiciones medioambientales y de las necesidades de cada cultivo.

El equipo principal del sistema de distribución es la caldera, donde se produce la combustión de gas natural. El sistema de distribución está formado por tuberías que se encuentran a lo largo del invernadero y transportan el aire caliente que se produce en la caldera y por ventiladores que distribuyen el aire caliente al interior del invernadero. El sistema de calefacción también dispone de elementos de control como termostatos o sensores de temperatura y elementos de seguridad como detectores de fugas o válvulas. (20)

### 3.3.6. Sistema de control

El sistema de control de los invernaderos estará formado por una central meteorológica colocada en el exterior del invernadero. Esta central meteorológica medirá la temperatura exterior, la

humedad, la radiación solar, la detección de lluvia y la dirección y velocidad del viento. En el interior de la instalación se contará con un sensor de temperatura y un sensor de humedad que permitirán evaluar las condiciones climáticas en el interior del invernadero y por tanto las necesidades de calefacción o refrigeración. (20)

### 3.3.7. Sistema de iluminación

En este caso práctico el dimensionamiento del sistema de iluminación no va a ser objeto de desarrollo ya que en el sudeste español la condiciones radicación solar y duración del día son suficientes para satisfacer la demanda del cultivo y con el fin de disminuir los gastos se ha optado por que el invernadero no tenga sistema de iluminación.

### 3.3.8. Sistemas auxiliares

Según lo descrito en el apartado 2.3.8 la gran mayoría de invernaderos cuentan con una balsa de riego y un almacén ubicados en el interior de la parcela.

Respecto al almacén consiste en un pequeño habitáculo de 50m<sup>2</sup> para guardar los productos agrícolas y la maquinaria necesaria para trabajar en el invernadero. Este almacén estará construido con chapa metálica para abaratar costes.

El diseño de la balsa de riego es fundamental ya que permite almacenar y garantizar el suministro de agua al invernadero además de recoger el agua procedente de la lluvia. Para este caso práctico se va a diseñar una balsa de riego de 1000 m<sup>3</sup> ya que se considera un volumen adecuado teniendo en cuenta la alta disponibilidad de recurso hídrico en la zona. (37)

## 3.4. Tipos de cultivos

### 3.4.1. Cultivo de tomate

Para el desarrollo de este caso práctico se ha decidido que el cultivo que se plantará en el invernadero es el tomate en rama. Según un estudio realizado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en 2022 los españoles consumen una media de 13,5 kg de tomate por persona al año, siendo la tercera hortaliza más consumida a nivel nacional. (38)

En el año 1975 en España el cultivo de tomate se realizaba en instalaciones de regadío y al aire libre. Sin embargo, con el paso de los años las hectáreas dedicadas al cultivo de tomate al aire libre se reducido ligeramente mientras que las hectáreas de cultivo de tomate en invernaderos han aumentado considerablemente tal y como se puede observar en la Figura 14. Según lo recogido en el apartado 2.2, en la actualidad unas 7700 ha se dedican al cultivo de tomate bajo invernadero.

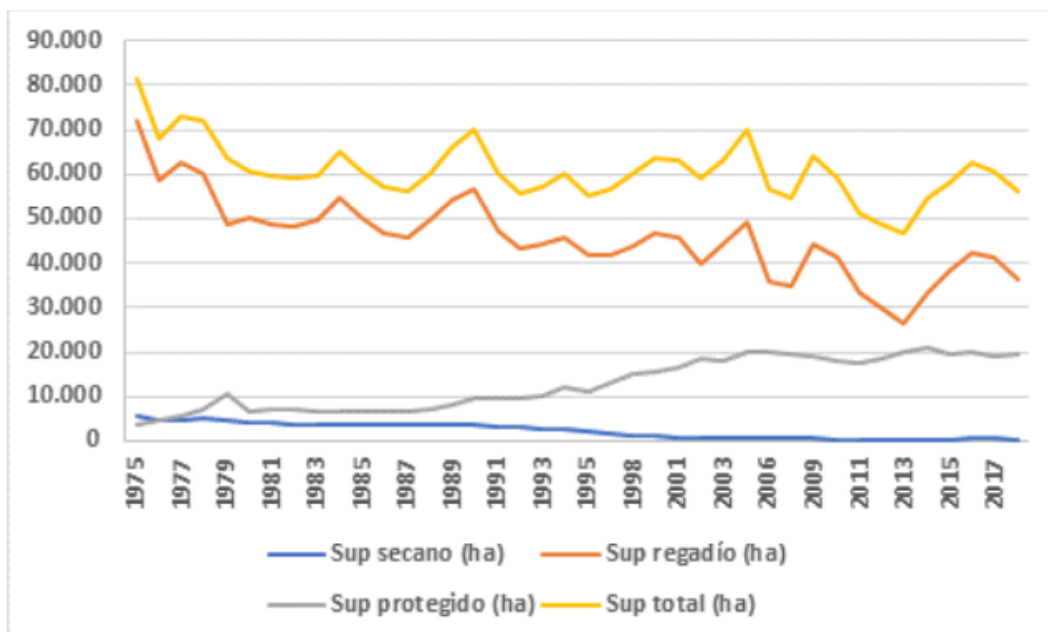


Figura 14. Evolución de la superficie total de tomate (ha) (Fuente: M. Merino-Pacheco)

En la Figura 15 se aprecia que, pese a que la superficie total en España dedicada al cultivo de tomate se ha ido reduciendo con el paso de los años, la producción de esta hortaliza ha aumentado hasta alcanzar las 2 millones de toneladas en 2017 cultivadas bajo invernadero.

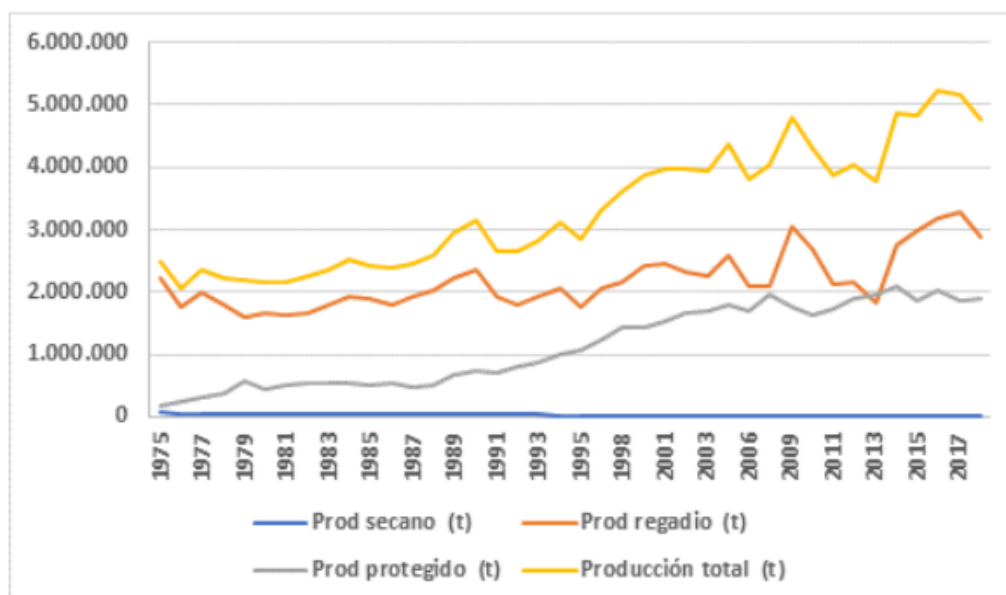


Figura 15. Evolución de la producción de tomate (M. Merino-Pacheco)

En la actualidad, el cultivo de tomates bajo invernadero presenta tres ventajas respecto al cultivo de tomate en regadío. La primera y fundamental es la posibilidad de cultivar estos frutos fuera de su temporada habitual de cosecha que abarca entre finales de invierno hasta mediados de otoño, lo que permite satisfacer la demanda del consumo de tomates durante un periodo más prolongado. La segunda de las ventajas es que al estar cultivados bajo invernadero están protegidos frente a efectos meteorológicos adversos como granizadas o lluvias torrenciales, por lo que hay más posibilidades de que el cultivo salga adelante. Y la última de las ventajas es que

se aumenta de manera considerable la producción mientras se reducen los costes ya que se aprovecha de manera más eficiente los insumos aplicados al cultivo. (39)

Aunque el cultivo de tomates en invernadero también presenta desventajas entre las que destacan la alta inversión inicial, el requerimiento de personal especializado para la explotación del invernadero y el monitoreo constante de las condiciones ambientales en el interior del invernadero para evitar plagas y enfermedades.

Debido al desarrollo de los invernaderos en los últimos años los ciclos de cultivo de las hortalizas y frutas se han modificado respecto a los ciclos habituales al aire libre. De esta manera para el cultivo de tomates en el sur de la península ibérica se tienen tres ciclos de cultivo:

- Ciclo corto de otoño: En este ciclo primeramente se plantan las semillas de tomate en semilleros al aire libre durante el mes de julio. Entre agosto y septiembre se trasplantan las matas dentro del invernadero para que durante los meses de invierno se desarrolle en sus condiciones óptimas. La recolección en este ciclo depende del estado de las plantas y de la variedad de tomate cultivada, pero abarca desde el mes de febrero hasta el mes de julio. Este tipo de ciclos es recomendable para regiones en las que el invierno es suave. (40)

- Ciclo corto de primavera: Entre final de noviembre y mediados de diciembre se realiza la plantación de las semillas en los semilleros que se encuentran dentro del invernadero. Cuando finaliza la época de heladas que depende de la zona, aunque generalmente es a mediados de la primavera, se trasladan las plantas al aire libre para que continúen con su crecimiento. La recolección se realiza desde finales de la primavera hasta principios de verano, aunque también varía en función de la zona, la variedad y la condiciones climatológicas. (40)

- Ciclo largo único: Este es el ciclo más largo de cultivo de tomates ya que abarca 10 meses. La siembra de las semillas comienza durante el mes de agosto y el trasplante dentro del invernadero se realiza durante el mes de septiembre. En este ciclo al ser más duradero, la etapa de cuajado, en la que se forma el fruto del tomate, es mayor y dura en torno a 5 meses. La recolección depende de la variedad del tomate plantado y de la zona donde se cultiva, pero puede comenzar en diciembre y finalizar en junio. La producción en el ciclo largo varía entre los 14 y 18 kg/m<sup>2</sup> y debido a que el ciclo es más largo que los de primavera y otoño, el fruto tiene más sabor y por lo tanto su precio en el mercado es mayor. (40)

Para elegir el tipo de ciclo más indicado para el cultivo se deben evaluar las condiciones ambientales de la zona donde se pretende cultivar, estimar los recursos disponibles como la mano de obra y el agua y realizar un estudio de mercado para evaluar cuando será mayor la demanda.

En la Figura 16 se muestran de manera esquemática los ciclos del cultivo que acaban de ser explicados.

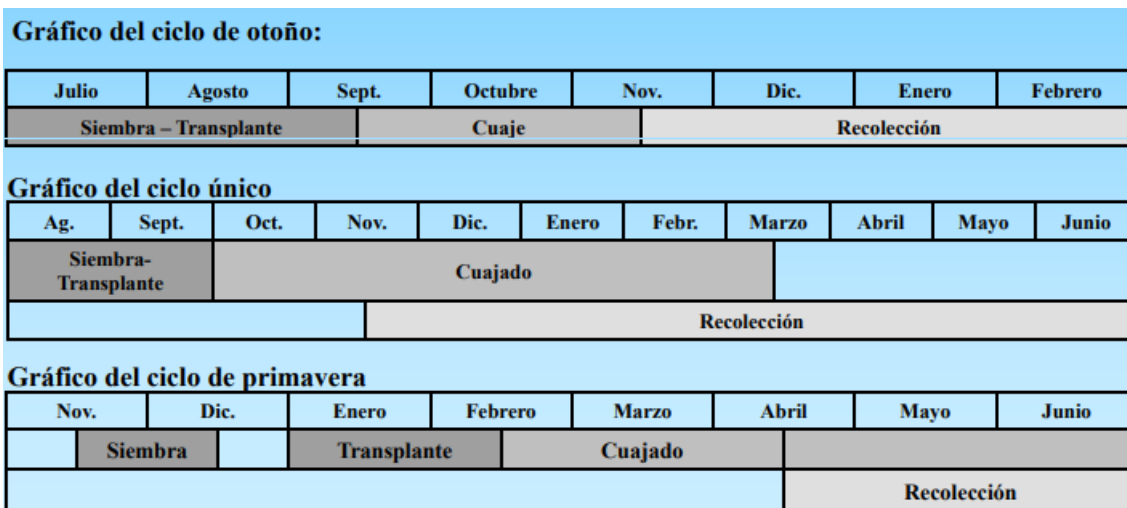


Figura 16. Ciclos de cultivo de tomate en invernaderos (Fuente: F. Camacho Ferre)

Otra técnica muy utilizada en el cultivo de tomate en invernaderos es la del injerto. El injerto consiste en la unión de una porción de un tejido vegetal de dos plantas en una sola planta. Esta técnica es muy útil ya que permite mejorar las características de los cultivos de manera natural.

En los cultivos de tomate el injerto se realiza de la siguiente manera: se toma la parte superior de una plántula de tomate, que puede ser de cualquier variedad o incluso una hibridación, y unirla a una planta de tomate que se conoce como patrón y destaca por su vigor y resistencia a las enfermedades. Por lo que la planta patrón proporciona la protección contra las posibles plagas y enfermedades que aparezcan en la planta mientras que se obtiene el fruto de la variedad deseada. También se puede aumentar la producción del tomate si la compatibilidad de las plantas es correcta. (41)

Sin embargo, la principal desventaja de la técnica del injerto es el alto coste que tiene pues tanto los injertos como los portainjertos se deben mantener en unas condiciones climáticas concretas. Por ello se ha decidido no considerar esta técnica en este trabajo.

### 3.4.2. Factores agronómicos del cultivo de tomate en invernadero

#### - Temperatura

La temperatura diurna óptima de crecimiento del tomate se encuentra entre 20 y 25 °C y la nocturna entre 15 y 18 °C por lo que la diferencia entre la temperatura del día y la noche (DIF) requerida por el cultivo es de 7 °C aproximadamente. La DIF varía según el estado de la planta, pero en la etapa de fructificación es indispensable mantenerla en los valores óptimos para obtener los resultados esperados. (39)

Se debe comprobar que se mantienen estas temperaturas durante todo el ciclo del cultivo para asegurar el correcto crecimiento de las plantas.

Las temperaturas extremas mínimas se encuentran por debajo de 15 °C ya que por debajo de esta temperatura aumentan los problemas de crecimiento de las plantas.

La temperatura ambiental máxima a la que se puede exponer un cultivo de tomates es de 35 °C ya que a partir de esta temperatura se reduce la polinización y la calidad del polen. Además, las temperaturas elevadas pueden dar lugar a frutos inmaduros o pequeños.

En cuanto a la temperatura mínima del suelo se considera como 12 °C el límite inferior ya que los valores de temperatura por debajo de este valor afectan gravemente al crecimiento de la planta. La temperatura óptima del suelo se encuentra entre 20 y 24 °C y la máxima se alcanza a los 34 °C. (40)

#### - Radiación

El cultivo del tomate es uno de los que más horas de luz necesita para su correcto crecimiento en concreto entre 6 y 12 horas de luz diarias.

Si se superan las horas de luz diarias recomendadas pueden aparecer frutos deformes o provocar la parálisis del crecimiento de la planta. Por otro lado, si no se alcanzan las 6 horas de luz diarias puede provocar frutos de menor tamaño y calidad o dificultades en el proceso de floración. (40)

#### - Humedad relativa

El nivel de humedad relativa, según lo comentado en el apartado 2.3.6, depende directamente de la temperatura y otros factores como el déficit de presión de vapor (DPV) y el estado de estrés de la planta dependen de la humedad relativa.

Respecto a los valores óptimos de humedad relativa en el interior del invernadero para el crecimiento de las plantas de tomate se encuentra entre el 55% y 60%. (39)

Por debajo del 55 % de humedad relativa las plantas entran en estado de estrés hídrico y disminuye la tasa de fotosíntesis. Si la humedad relativa es superior al 70% se favorece la aparición de hongos y bacterias que pueden causar enfermedades a las plantas o el agrietamiento del fruto.

#### - Suelo

Respecto al tipo de suelo el desarrollo de las plantas de tomate se puede realizar tanto en suelos de carácter ácido como básico por lo que el valor de pH del suelo no juega un papel importante en el desarrollo de las plantas siempre que se encuentren en un rango de valores cercano a 7.

En general se prefieren suelos ricos en materia orgánica o suelos arcillosos enarenados con diferentes sustratos como fibra de coca, perlita o lana de roca. (40)

#### - CO<sub>2</sub>

Los niveles idóneos de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero varían en función de la ventilación que se esté llevando a cabo. Si las ventanas del invernadero están abiertas, es decir, se está produciendo una ventilación natural del invernadero, los valores de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero serán muy similares a los del exterior y estarán en torno a 335ppm. (39)

Sin embargo, cuando las ventanas están cerradas los valores de CO<sub>2</sub> se deben situar en torno a 600-700ppm para favorecer el crecimiento de las plantas.

### 3.4.3. Cultivo de pimientos

En este caso práctico se va a desarrollar una propuesta en la que se plantan simultáneamente tomates y pimientos en el invernadero. Según lo detallado en el apartado 3 se tienen dos invernaderos contiguos, por lo que uno de los invernaderos estará dedicado al cultivo de tomates, mientras que el otro se dedicará al cultivo de pimientos.

Según el Informe de consumo alimentario en España (38), en 2022 el consumo anual de pimientos por persona fue de 4,18 kg, que es un valor significativamente menor que el consumo de tomates. Sin embargo, tal y como se expone en el apartado 2.2, las hectáreas dedicadas al cultivo de pimientos en España son de 4320 ha, que comparado con las hectáreas ocupadas por el cultivo de tomates suponen una diferencia del 56%.

El ciclo de cultivo de pimientos bajo invernadero dura aproximadamente 8 meses y comienza con el trasplante de las plántulas al interior del invernadero a mediados del mes de junio. La fase vegetativa abarca los meses de julio y agosto y es necesario mantener las condiciones de crecimiento óptimas para el cultivo ya que en estos tanto la temperatura como la radiación solar son elevadas. La floración del cultivo comienza durante el mes de septiembre y la etapa de fructificación dura hasta diciembre. La fase de maduración y cosecha es amplia debido a que existen distintas variedades de pimientos (verde, rojo y amarillo) que dependen del tiempo que haya pasado desde el trasplante. Esta última fase puede comenzar en el mes de diciembre y durar hasta febrero.

Para el dimensionamiento del invernadero en el que se cultivan los pimientos se va a suponer que el trasplante al interior del invernadero se realiza la segunda quincena del mes de junio y la cosecha se produce en el mes de enero, por lo que a partir de febrero no se tiene cultivo de pimientos.

### 3.4.4. Factores agronómicos del cultivo de pimientos en invernadero

#### - Temperatura (42)

El pimiento se cultiva en climas cálidos y por ello las temperaturas que necesita para su desarrollo son elevadas. Para su correcto desarrollo el pimiento necesita unas temperatura diurnas entre 20 y 25 °C y nocturnas entre 16 y 18 °C. Si la temperatura es inferior a 15 °C el crecimiento de la planta se ve muy afectado y por debajo de los 10 °C los procesos vegetativos se detienen y la planta muere.

Al desarrollarse en climas cálidos las temperaturas que soporta un cultivo de pimientos son elevadas especialmente en la fase de germinación en la que la temperatura máxima que puede aguantar es de 40 °C. Sin embargo, en la fase de crecimiento vegetativo y en la de floración la temperatura máxima soportada por la planta desciende hasta los 32 °C.

#### - Radiación

El cultivo de pimientos necesita una elevada cantidad de radiación solar para optimizar su crecimiento ya que al ser una planta que se cultiva en verano las necesidades de radiación para realizar la fotosíntesis son altas.

- Humedad relativa (42)

La humedad relativa óptima en un cultivo de pimientos está situada entre el 50 y el 70%. Si la humedad relativa es elevada se favorece el desarrollo de enfermedades que pueden acabar con el cultivo. En cambio si la humedad relativa se sitúa por debajo del 50% se puede ocasionar la caída de flores y frutos.

- Suelo

En cuanto al tipo de suelo adecuado para el desarrollo de los pimientos son los suelos arenosos con un porcentaje elevado de materia orgánica. Respecto a los valores del pH del suelo deben situarse entre 6,5 y 7 aunque ciertas variedades de pimientos pueden cultivarse en suelos con valores de pH cercanos a 8.

- CO<sub>2</sub>

Al igual que para el cultivo de tomates los valores del CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero, cuando las ventanas están cerradas, deben tener un valor cercano a los 600 ppm.

## 4. Consumos

En este apartado se analizarán todos los consumos que tiene el invernadero con el fin de cuantificarlos para poder dimensionar una instalación fotovoltaica que pueda sustituir y mejorar las instalaciones convencionales del invernadero.

### 4.1. Cálculo superficie útil del invernadero

Como se ha comentado anteriormente, para este caso práctico se han diseñado dos invernaderos contiguos de 80 metros de ancho y 100 metros de largo, por lo que la superficie total de cada invernadero son 8000 m<sup>2</sup>. A esta superficie bruta se le debe restar la superficie que no va a ser cultivada para obtener así la superficie útil del invernadero y poder calcular tanto la producción de tomates como las necesidades de riego del cultivo.

Se ha decidido dimensionar el invernadero con pasillos cada 5 metros y de 1 metro de anchura, de manera que haya 16 pasillos por cada invernadero. Estos pasillos sirven para permitir el acceso y la movilidad de los trabajadores que deben realizar tareas de mantenimiento y control en el invernadero. La superficie ocupada por estos pasillos asciende a 1600 m<sup>2</sup> y a esta superficie se le debe sumar la superficie ocupada por el sistema de calefacción, ventilación y cuadro de control, entre otros sistemas. Esta superficie se ha supuesto en 150 m<sup>2</sup>. Por lo tanto, en cada invernadero se tiene una superficie útil de 6250 m<sup>2</sup> y en total la superficie cultivada será de 12500 m<sup>2</sup> que se corresponden con 1,25 ha.

### 4.2. Sistema de riego

Para poder evaluar el consumo del sistema de riego, previamente se han calculado las necesidades de riego de un cultivo de tomate en un invernadero en el sureste de la península ibérica.

Se ha decidido realizar el trasplante de los tomates de los semilleros al interior del invernadero en la primera semana de septiembre, ya que para este caso práctico se ha decidido cultivar los tomates según el ciclo largo.

En línea con la bibliografía de cultivos de tomates (43), se han calculado los valores semanales de necesidad de riego para una plantación de tomates de 12500 m<sup>2</sup> bajo invernadero.

Como se puede observar en la Figura 17, las mayores necesidades de riego coinciden con los meses más fríos ya que las plantas tienen menor actividad fotosintética debido a la baja irradiación que recibe y por lo tanto hay una mayor concentración de humedad en el suelo. Es destacable que en los meses de verano (junio, julio y agosto) las necesidades del riego del cultivo son nulas puesto que el invernadero se encuentra vacío ya que ya se ha recogido el cultivo y se está preparando el invernadero de cara a la siguiente temporada que comenzará en septiembre.

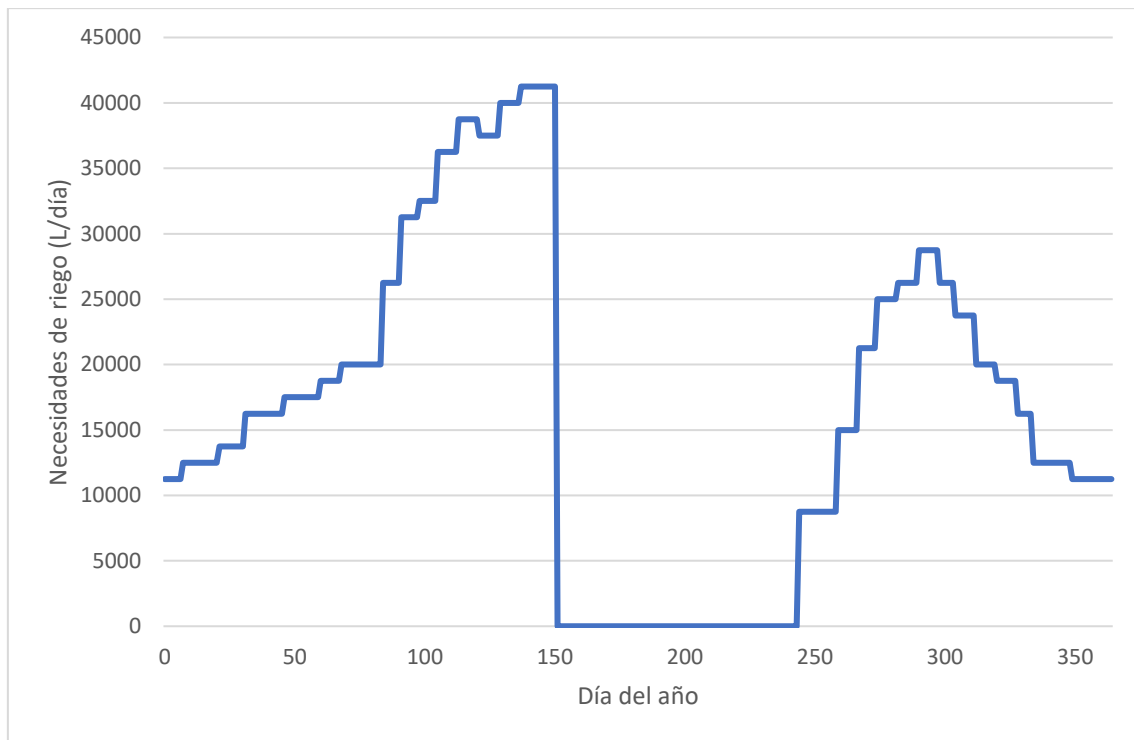


Figura 17. Necesidades de riego de un cultivo de tomates en litros por día (Fuente: Elaboración propia)

La máxima necesidad de riego es a mitad del mes de mayo cuando la planta está en la etapa de fructificación y en la que debido a la formación de sus frutos necesita un suministro de agua elevado. El consumo diario de las últimas dos semanas de mayo asciende a 41250 L/día. Este valor será el valor de consigna para dimensionar la potencia necesaria en el sistema de riego de ambos invernaderos.

Para calcular la potencia de la bomba se ha usado la Ecuación 1

$$P = \frac{\gamma * Q * H_m}{\eta}$$

Ecuación 1

Donde:

- $\gamma$  es el peso específico de agua expresado en  $N/m^3$
- $Q$  es el caudal de bombeo expresado en  $m^3/s$
- $H_m$  es la altura manométrica de la bomba expresada en metros de columna de agua
- $\eta$  es el rendimiento de la bomba

Para realizar este cálculo, se ha supuesto que hay una separación de 0,5 metros entre cada gotero, 1 metro de separación entre cada línea de goteros y que los goteros tienen un caudal nominal de 3 L/h. La presión de la bomba necesaria se considera 20 m.c.a ya que se tienen en cuenta las pérdidas de carga de las tuberías y por último el rendimiento de la bomba se considera 0,8. (44)

Aplicando estos valores a la Ecuación 1 se obtiene que la potencia de la bomba necesaria para cubrir las necesidades de riego de los invernaderos es de 1096 W.

Dada la dificultad para evaluar los horarios de riego y basándose en bibliografía (45), se ha decidido estimar una media de riego diaria según la fase en la que se encuentre el ciclo del cultivo, estos datos se recogen en la Tabla 4.

Fase del Ciclo	Duración de la Fase	Mes	Tiempo Medio de Riego Diario (minutos)	Frecuencia (veces al día)	Tiempo diario (h)
Germinación y Plántula	3-4 semanas	Septiembre - Octubre	15	2	0,5
Crecimiento Vegetativo	4-6 semanas	Octubre - Mitad Noviembre	25	2	0,833
Floración	3-4 semanas	Mitad Noviembre - Mitad Diciembre	30	2	1
Fructificación Temprana	4-6 semanas	Mitad Diciembre - Febrero	35	3	1,75
Fructificación Plena	6-8 semanas	Febrero - Abril	40	3	2
Maduración	3-4 semanas	Abril - Mayo	30	2	1

Tabla 4. Tiempo de riego diario según las fases del ciclo (Fuente: Proain)

La primera fase del ciclo de cultivo se conoce como fase de germinación y plántula y se desarrolla durante el mes de septiembre, las plantas requieren una humedad constante pero no excesiva por lo que es esencial mantener el sustrato con una humedad uniforme, pero evitar el encharcamiento para favorecer la germinación de las semillas. Por ello las necesidades de riego son de aproximadamente 30 minutos por día.

En la segunda fase de crecimiento vegetativo, que abarca desde octubre hasta mediados de noviembre, las necesidades de riego aumentan hasta los 50 minutos diarios ya que las plantas comienzan a desarrollar su tallo y las hojas y es necesario aumentar las necesidades hídricas del cultivo para asegurar su correcto crecimiento.

En la fase de floración, desde mitad de noviembre hasta mitad de diciembre, necesidades de agua del cultivo aumentan ya que es la etapa más sensible del ciclo. El suministro de agua debe ser constante para evitar el estrés hídrico de las plantas y asegurar la correcta formación de sus flores.

Durante la fase de fructificación temprana se empiezan a formar los frutos y es esencial mantener el riego húmedo sin llegar a encharcarlo, por ello, el tiempo de riego aumenta hasta llegar a 1,75 horas días aproximadamente. Esta fase del ciclo se da durante los meses más fríos de año y es necesario mantener las condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo en el interior del invernadero.

La etapa de fructificación plena es la más duradera del ciclo ya que abarca dos meses (febrero y marzo) y en ella se termina de crear el fruto y para asegurar que los frutos sean de buena calidad y de buen tamaño se debe regar el cultivo unas 2 horas de manera diaria.

La última fase del cultivo es la etapa de maduración que se desarrolla durante el mes de abril y en ella el fruto termina de madurar. Por ello, es necesario reducir la cantidad de agua suministrada a 1 hora de riego diaria con el fin evitar las enfermedades en el fruto.

Una vez conocida la potencia de la bomba del sistema de riego y el tiempo de riego necesario para el cultivo se procede a calcular la energía del sistema de riego que se representa en la Figura 18.

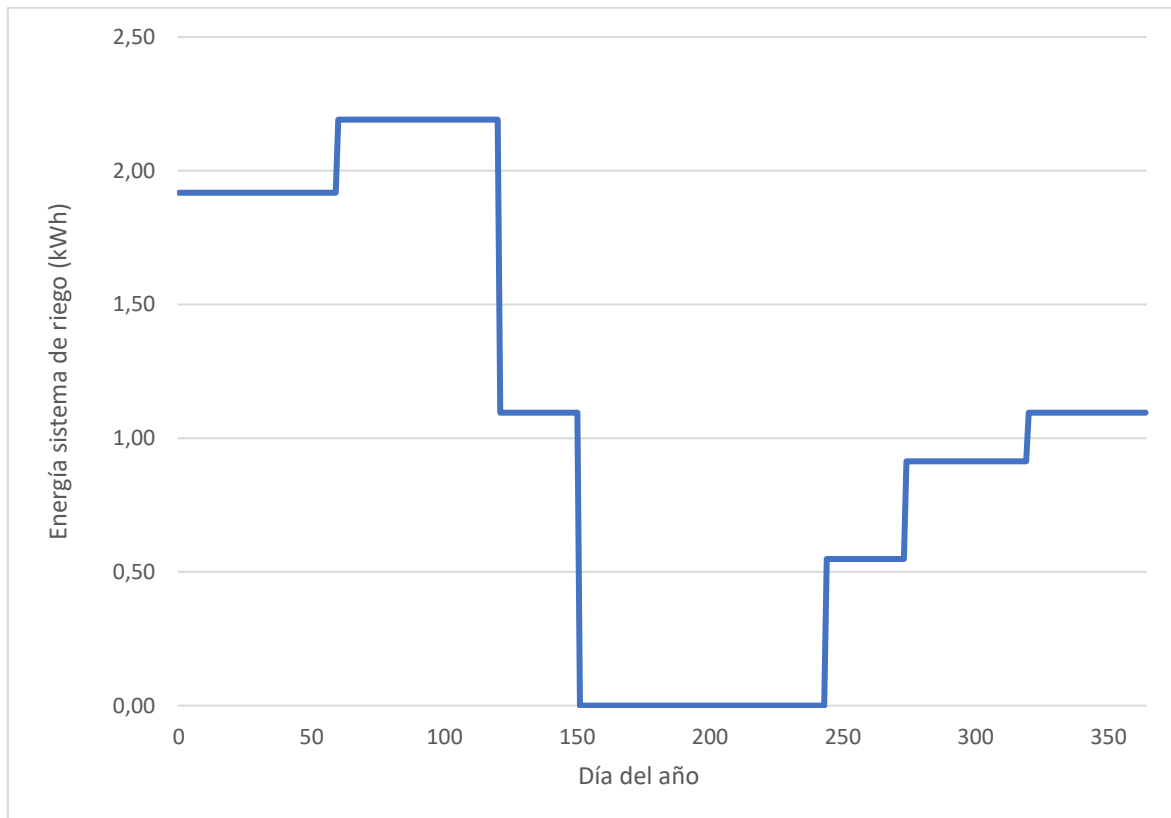


Figura 18. Energía consumida por el sistema de riego de tomates en kWh (Fuente: Elaboración propia)

### 4.3. Sistema de calefacción

Para evaluar las necesidades térmicas del invernadero es necesario analizar la temperatura diaria en el exterior del invernadero. Para ello se han consultado en Agencia Estatal de Meteorología (46) los valores de temperatura máxima y mínima de un año meteorológico típico en la estación meteorológica de Algarrobo.

Como se puede observar en la Figura 19 las temperaturas máximas se alcanzan en los meses de verano, concretamente, la máxima temperatura registrada se dio el día 19 de julio con un valor de 39,1 °C. Mientras que las temperaturas mínimas son menores en los meses de invierno, en particular la temperatura mínima alcanzada es de 3,9 °C el 26 de enero.

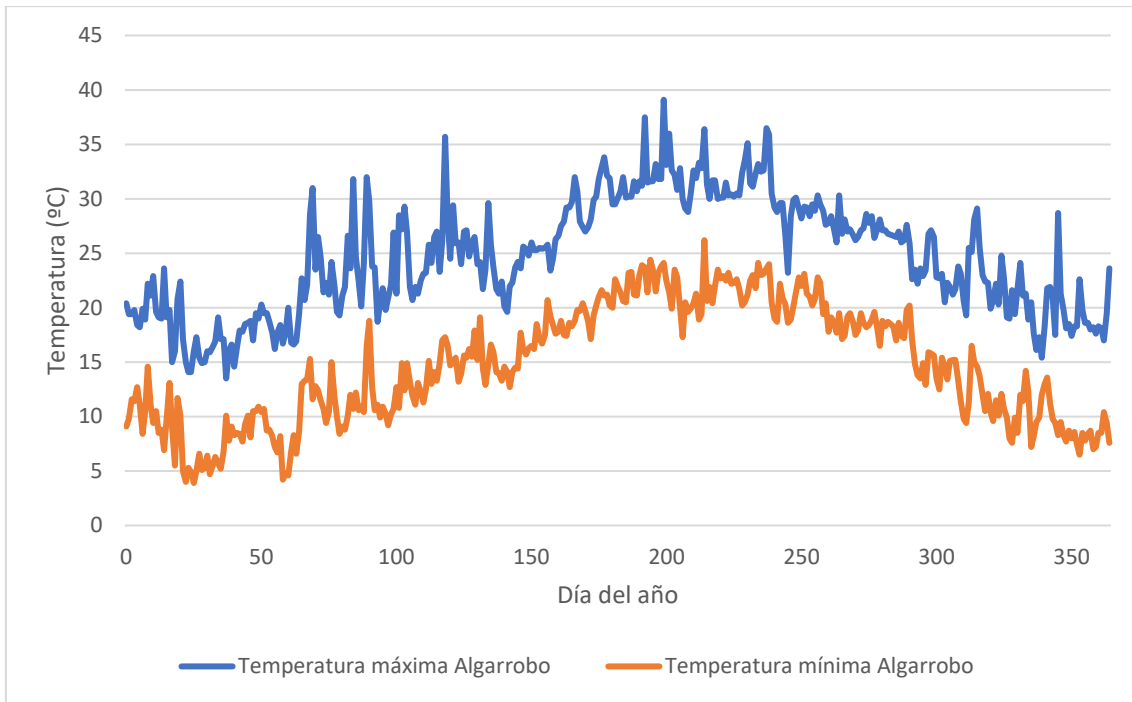


Figura 19. Temperatura máxima y mínima de un año meteorológico típico en Algarrobo en °C (Fuente: Aemet)

Para evaluar las necesidades de calefacción se ha comparado la temperatura mínima diaria en Algarrobo con la temperatura mínima óptima en la que el cultivo de tomate se sigue desarrollando, para este caso práctico se ha tomado 15 °C, según lo comentado en el apartado 3.4.2. En la Figura 20 se plasma la temperatura mínima de Algarrobo frente a la temperatura mínima del tomate.

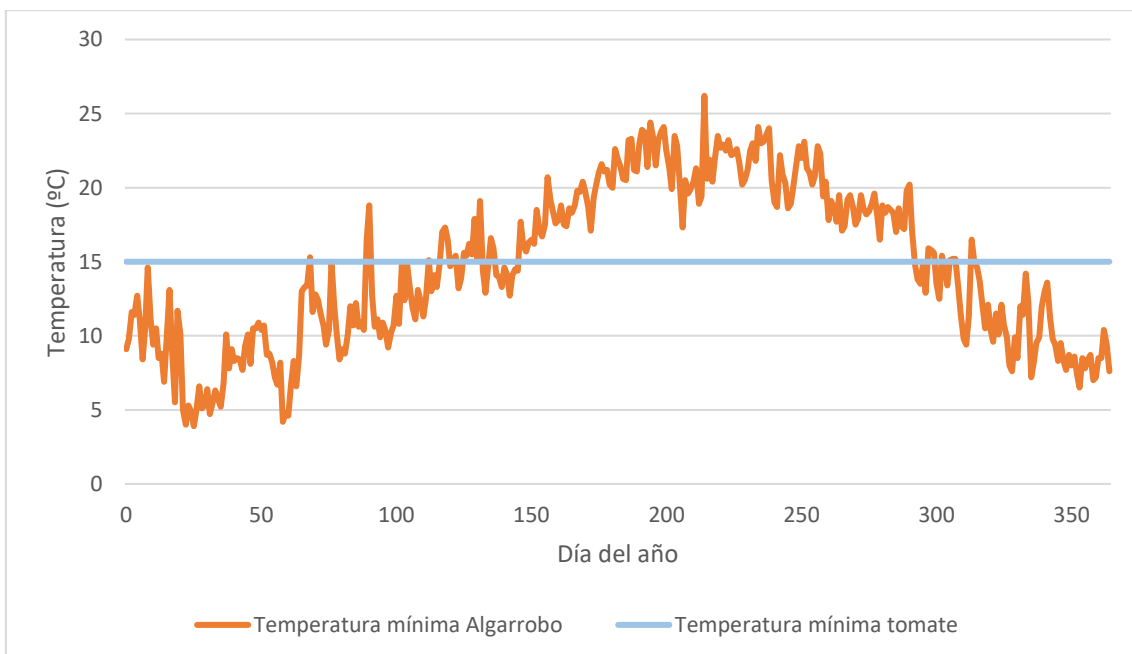


Figura 20. Temperatura mínima en Algarrobo y temperatura mínima del tomate en °C (Fuente: Elaboración propia)

Por tanto, los días en los que la temperatura mínima exterior sea inferior a 15 °C será necesario activar el sistema de calefacción para asegurar que el cultivo de tomate continua su ciclo correctamente.

Dada la dificultad de evaluar la temperatura en el interior del invernadero, en este caso práctico se va a calcular las necesidades térmicas del sistema de calefacción mediante un método simplificado. Una vez conocido y evaluado el salto térmico que se tendrá en el invernadero mediante la Ecuación 2 se procede a calcular la potencia que la caldera deberá tener para mantener las condiciones climáticas óptimas dentro del invernadero.

$$Q (W) = U * A * \Delta T$$

*Ecuación 2*

Donde:

Q son las necesidades térmicas de calefacción en el invernadero, expresadas en vatios.

U es el coeficiente de transferencia de calor del polietileno utilizado en la cubierta con un valor de  $6 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

A es el área total a calentar y se compone de la superficie del techo más la superficie de las paredes laterales, expresada en m<sup>2</sup>

$\Delta T$  es el salto térmico entre la temperatura mínima exterior y la temperatura interior deseada, expresado en °C.

Por tanto, se obtiene que las necesidades térmicas máximas de calefacción son 1257 kW. Este valor servirá de consigna para dimensionar el sistema de calefacción.

Para poder evaluar la necesidades energéticas del sistema de calefacción y basándose en referencia bibliográficas (4), en la Tabla 5 se recoge el tiempo diario de calefacción de la instalación para cada mes del año. Se observa que en los meses de verano las necesidades de calefacción son nulas puesto que no se tiene ningún cultivo, y en caso de haberlo la temperatura exterior en ningún caso será menor a la mínima del cultivo de tomate.

Enero	8
Febrero	6
Marzo	4
Abril	4
Mayo	2
Junio	0
Julio	0
Agosto	0
Septiembre	0
Octubre	4
Noviembre	6
Diciembre	8

*Tabla 5. Tiempo de uso del sistema de calefacción diario por meses en horas (Fuente: IDAE)*

En la Figura 21 se puede apreciar que, como es evidente, es en los meses de invierno en los que la temperatura ambiente exterior es menor en los que las necesidades térmicas son mayores. Concretamente el día 26 de enero se alcanza una necesidad de carga térmica de aproximadamente 10060 kWh.

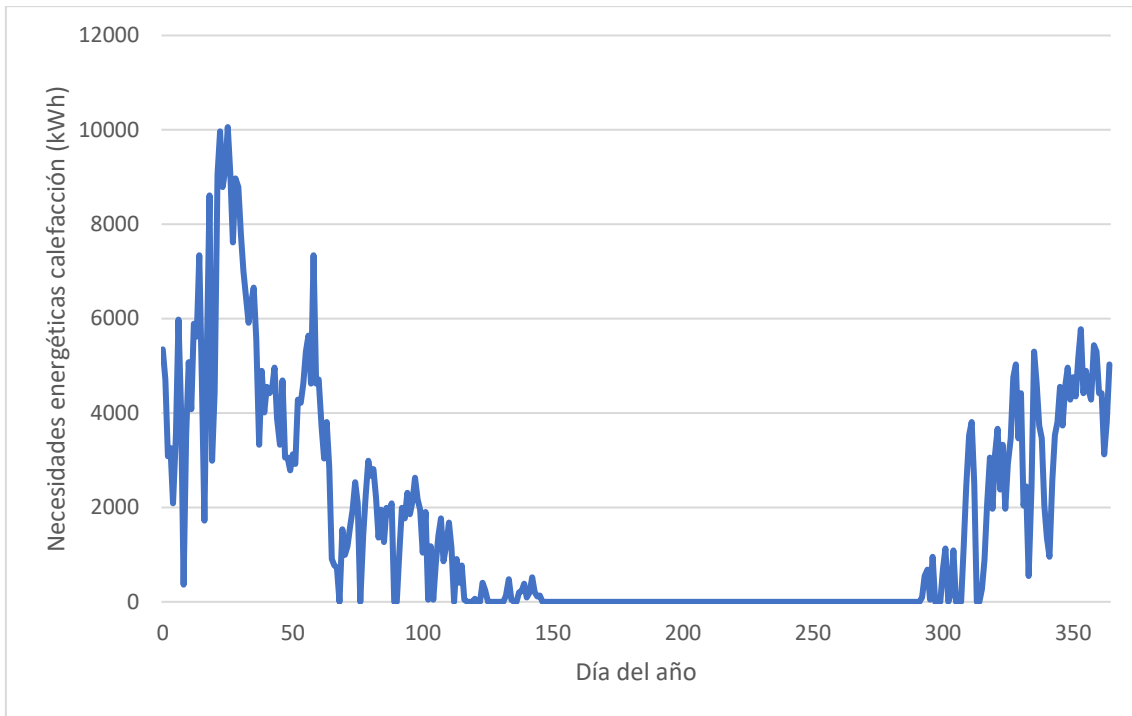


Figura 21. Necesidades energéticas del sistema de calefacción del cultivo de tomates expresadas en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4. Sistema de refrigeración

Para dimensionar el sistema de refrigeración se ha procedido de manera similar. Primero se ha evaluado la temperatura máxima en Algarrobo y se ha comparado con la temperatura máxima de crecimiento del tomate, que según lo comentado en el apartado 3.4, se ha fijado en 28 °C. Esta diferencia de temperatura se refleja en la Figura 22.

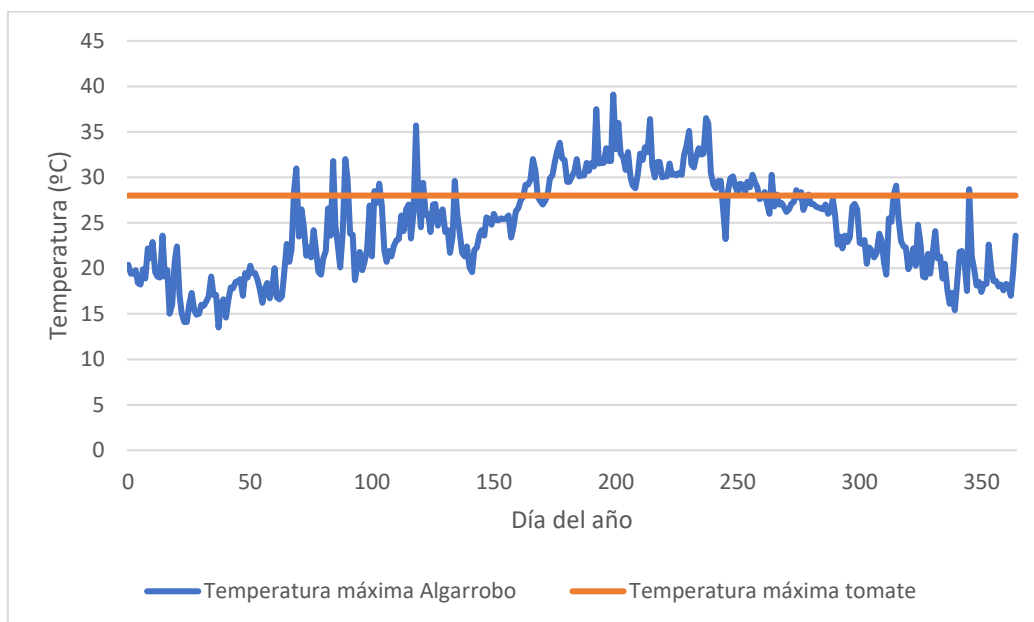


Figura 22. Temperatura máxima Algarrobo y temperatura máxima tomate en °C (Fuente: Elaboración propia)

Dada la complejidad del cálculo de todas las cargas de refrigeración que se tienen un invernadero, principalmente por la falta de datos bibliográficos en instalaciones similares a las de este caso práctico, se ha decidido evaluar únicamente las necesidades térmicas asociadas a la ganancia de calor por conducción y a la ganancia de calor debido a la radiación solar incidente.

Para evaluar las necesidades térmicas de refrigeración se debe aplicar de nuevo la Ecuación 2 con un salto térmico distinto, en este caso se tiene en cuenta el valor mayor de temperatura máxima cuando el cultivo está plantado es de 37,5 °C.

De igual forma y basándose en referencias bibliográficas (4) se ha evaluado el tiempo de uso del sistema de refrigeración con el fin de calcular la energía consumida por este sistema y se recogen en la Tabla 6.

Enero	0
Febrero	0
Marzo	2
Abril	2
Mayo	4
Junio	6
Julio	8
Agosto	8
Septiembre	6
Octubre	4
Noviembre	0
Diciembre	0

Tabla 6. Tiempo de uso del sistema refrigeración diario por meses en horas (Fuente: IDAE)

A este valor de se le debe añadir la energía térmica ganada debido a la radiación solar incidente sobre la cubierta del invernadero, que se expresa en la siguiente Ecuación 3.

$$E_{solar} = A * R * F$$

Ecuación 3

Donde

$E_{solar}$  es la carga térmica debida a la radiación solar incidente sobre el invernadero en vatios por hora

A es el área del techo, en m<sup>2</sup>

R es la irradiación solar incidente, en Wh/m<sup>2</sup>

F es factor de trasmisión de la cubierta de polietileno, en este caso 0,8

Se debe comentar que la irradiación solar incidente se ha calculado a partir de las horas sol pico medidas en la zona de Algarrobo, que se evalúan mensualmente y se han dividido por el número de días del mes para obtener la irradiación solar incidente diaria sobre el invernadero.

Los resultado obtenidos de aplicar las Ecuaciones 2 y 3 concluyen que las necesidades máximas de refrigeración se dan en el mes de septiembre, cuando la temperatura exterior todavía tiene

valores elevados y las horas sol pico son altas. Concretamente las necesidades máximas de refrigeración se dan el día 14 de septiembre y tienen un valor de 6254 kWh. En la Figura 23 se recogen los valores diarios de las necesidades energéticas del sistema de refrigeración del invernadero.

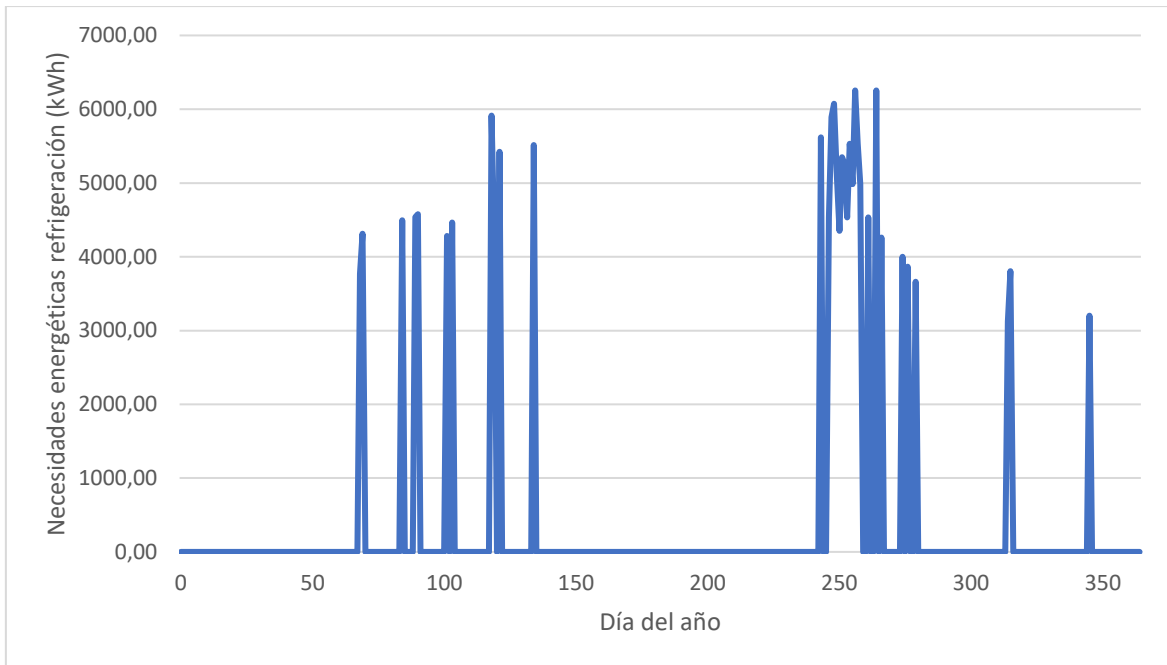


Figura 23. Necesidades energéticas del sistema de refrigeración del cultivo de tomates expresadas en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

Tal y como se observa en la Figura 24, en la que se combinan las necesidades energéticas del sistema de calefacción y refrigeración, los resultados obtenidos son coherentes, ya que las necesidades de calefacción se agrupan en los meses de invierno, mientras que las de refrigeración se acumulan en verano. Se debe comentar que en las estaciones de primavera y otoño en las que dependiendo de la temperatura exterior se debe activar un sistema u otro, se debe evaluar mediante los equipos de medida del invernadero las condiciones climáticas en el interior del mismo para elegir qué sistema poner en funcionamiento.

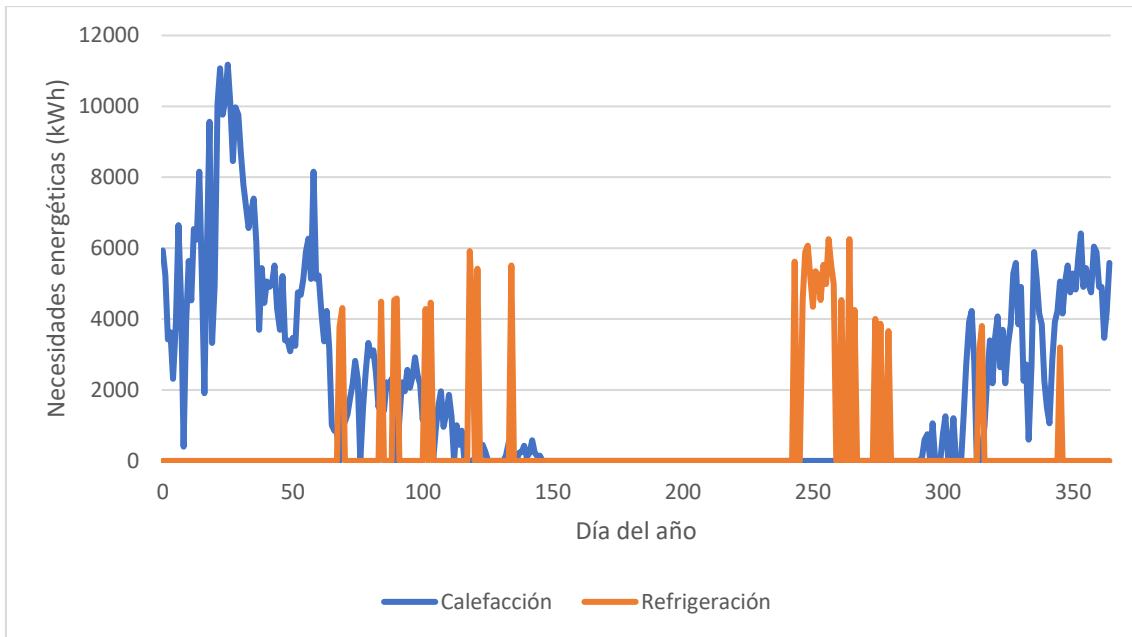


Figura 24. Necesidades energéticas del sistema de calefacción y de refrigeración del cultivo de tomates expresadas en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

De manera similar a lo expuesto en este apartado se han calculado las necesidades de riego del cultivo de pimiento, teniendo en cuenta la fase en la que se encuentra el cultivo y la superficie total cultivada. Los resultados de estos cálculos se plasman en la Figura 25.

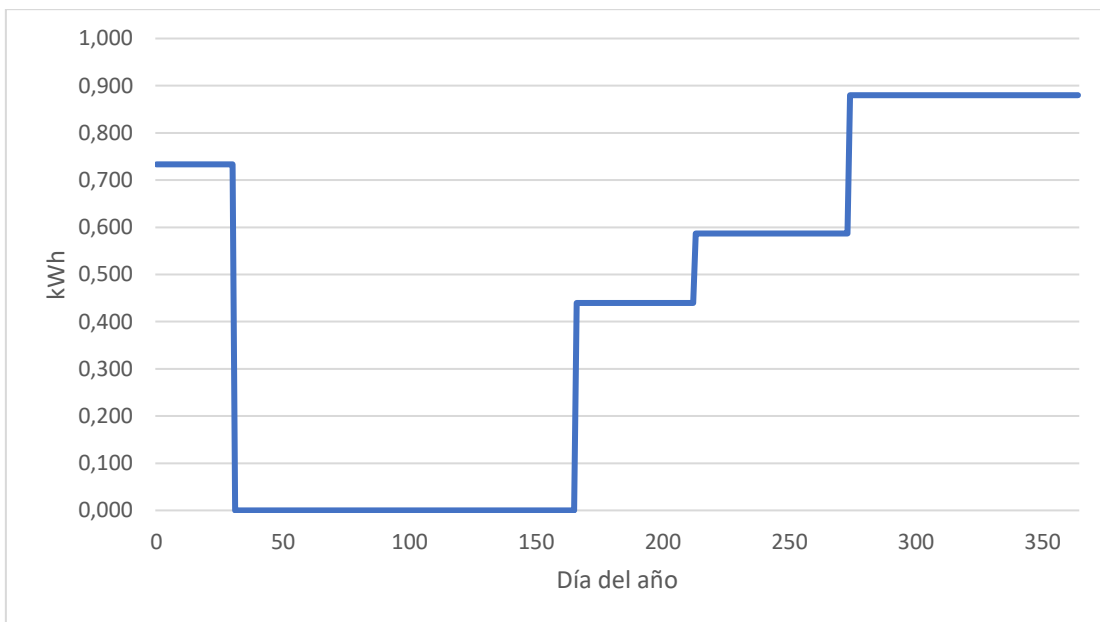


Figura 25. Energía consumida por el sistema de riego en kWh en el cultivo de pimientos (Fuente: Elaboración propia)

De la misma manera se ha evaluado el consumo del sistema de calefacción teniendo en cuenta que la temperatura mínima para el desarrollo del cultivo de pimientos es de 16 °C. Respecto al sistema de refrigeración se ha estimado que la temperatura máxima a la que se puede desarrollar el cultivo de pimientos es de 26 °C, por lo que las necesidades de refrigeración serán superiores a las del cultivo de tomates. Se debe comentar que dado que el ciclo de cultivo del pimiento se desarrolla durante los meses de verano, el consumo del sistema de refrigeración en

estos meses será elevado. En la Figura 26 se muestran las necesidades térmicas del invernadero de pimientos durante todo el año.

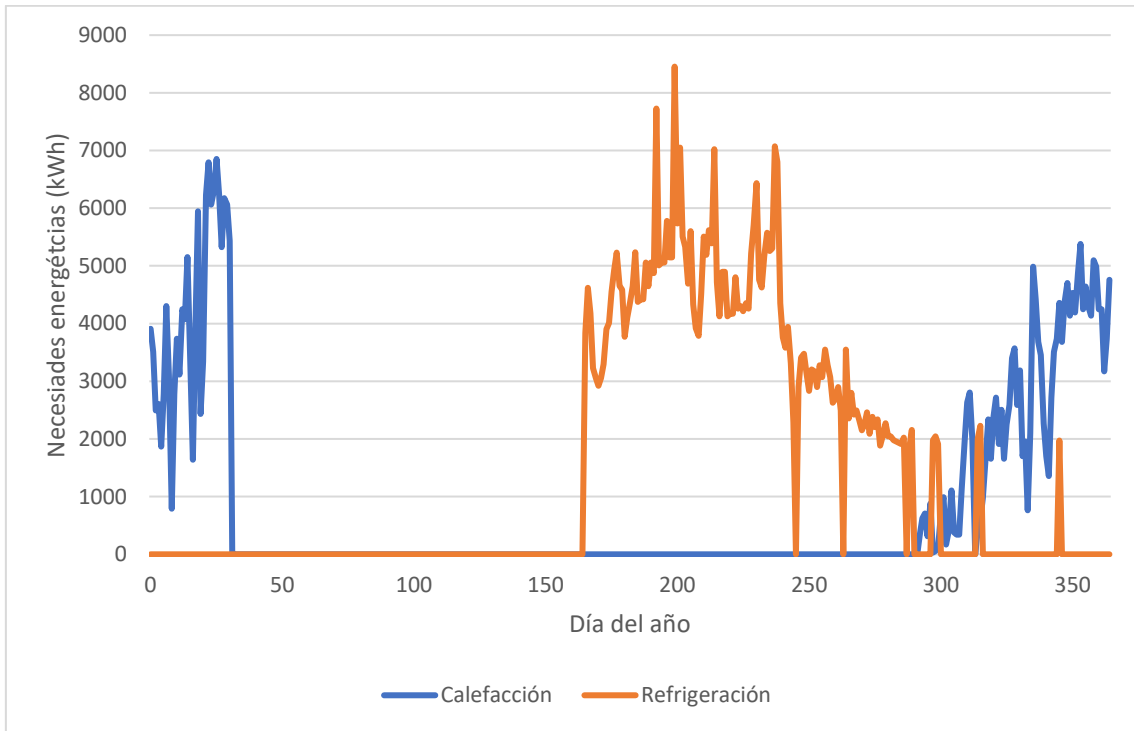


Figura 26. Necesidades energéticas del sistema de calefacción y de refrigeración del cultivo de pimientos expresadas en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

## 5. Descripción de escenarios

En este apartado se van a describir los distintos escenarios que se van a analizar en este caso práctico. En cada uno de los escenarios que se describirá y se dimensionará una instalación fotovoltaica que alimente los sistemas del invernadero anteriormente analizados en los apartados previos.

Para dimensionar la instalación fotovoltaica se va a recurrir al software PVSystem que es la herramienta más utilizada en el sector energético fotovoltaico ya que permite realizar simulaciones y análisis de distintas instalaciones personalizadas y con datos climatológicos muy precisos.

A modo de ejemplo en la Figura 27 se muestra un caso real de una instalación fotovoltaica colocada sobre una cubierta de un invernadero tipo raspa y amagado, tal y como la que se está dimensionando en este estudio.

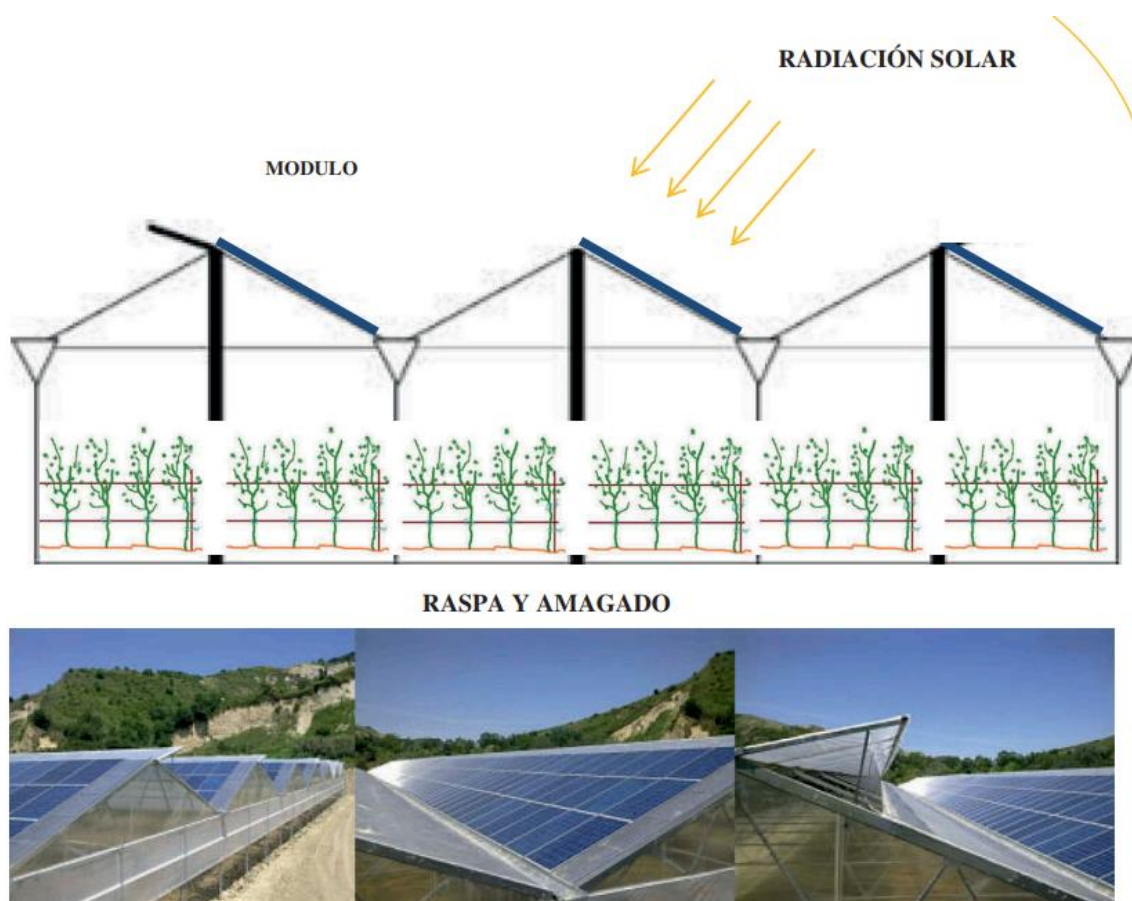


Figura 27. Disposición de módulos fotovoltaicos sobre la cubierta de un invernadero raspa y amagado (Fuente: R. López-Luque, J. Martínez, J.Reca y R. Ruiz)

### 5.1. Estudio del recurso solar en Algarrobo

Para realizar el dimensionamiento de la instalación fotovoltaica, previamente se va a analizar el recurso solar en la zona de Algarrobo para estudiar la viabilidad energética de la instalación.

En la Figura 28 se observa el atlas de radiación solar en la península ibérica desde 1983 hasta 2005, en él se puede apreciar como en la zona de Andalucía los valores de la radiación solar son

superiores a los de cualquier otro punto de la península con valores cercanos a los 5,4 kWh/m<sup>2</sup>día.

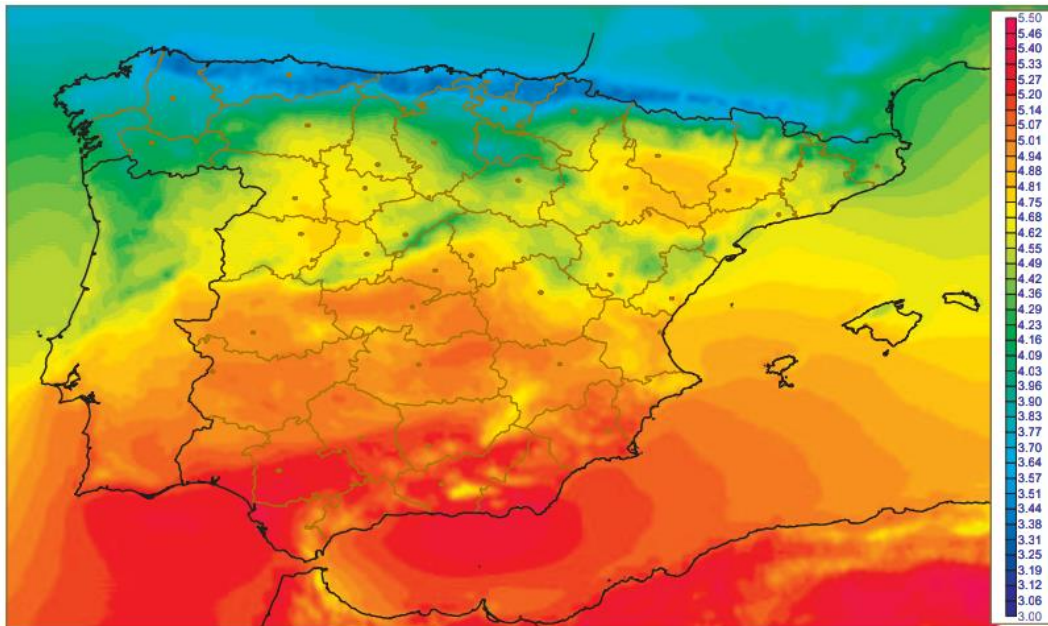


Figura 28. Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT (Fuente: Aemet)

En esta Figura 29 se muestran los tipos de radiación solar que inciden sobre una superficie colectora, que a continuación se describen.

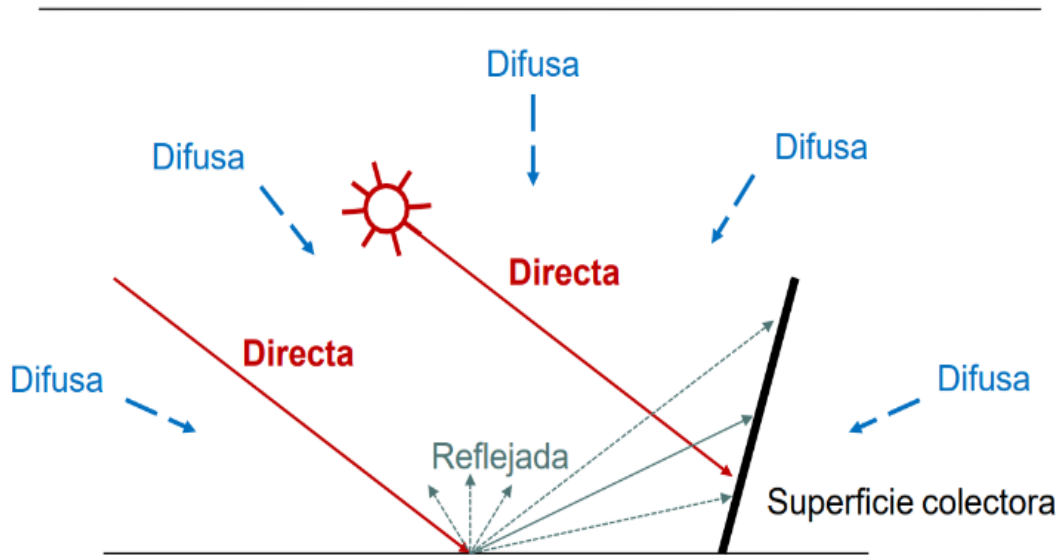


Figura 29. Tipos de radiación solar (Fuente: J.A Guerra)

La radiación solar directa se define como la radiación proveniente del Sol que llega a la superficie terrestre sin ser desviada o dispersada por la atmósfera. Este tipo de radiación depende de la latitud y altitud y de la nubosidad del día.

La radiación solar difusa es la parte de la radiación solar directa que ha sido dispersada al entrar en contacto con la atmósfera y con elementos como partículas de polvo, gases o aerosoles.

La radiación solar reflejada o albedo es la fracción de la radiación solar incidente que se refleja en la superficie en lugar de ser absorbida. Este tipo de radiación depende de las características del suelo donde se refleja, principalmente de la textura, el color y la reflectividad.

Por último, radiación solar global es la suma de la radiación solar directa y difusa que incide sobre una superficie horizontal o inclinada. Evaluar la radiación global es clave a la hora de dimensionar el invernadero pues afectará de manera directa a la temperatura y a la humedad interiores, entre otros factores.

En la Tabla 7 se recogen los datos de la irradiación directa, difusa y global diaria media sobre un plano horizontal medidos en kWh/m<sup>2</sup>día en el municipio malagueño de Algarrobo donde se va a dimensionar el invernadero y la instalación fotovoltaica. Estos datos han sido obtenidos con la base de datos ERAS-5 de software PVGIS (47), que proporciona datos de irradiación solar y variables climáticas de todo el mundo.

Mes	Irradiación directa media diaria [kWh/m <sup>2</sup> día]	Irradiación difusa media diaria [kWh/m <sup>2</sup> día]	Irradiación global media diaria [kWh/m <sup>2</sup> día]
Enero	2,24	0,81	3,05
Febrero	2,13	1,36	3,49
Marzo	3,78	1,55	5,33
Abril	3,92	1,91	5,83
Mayo	4,10	2,32	6,42
Junio	5,56	2,13	7,69
Julio	5,91	1,95	7,87
Agosto	5,17	1,57	6,74
Septiembre	3,62	1,74	5,36
Octubre	3,17	1,27	4,44
Noviembre	1,73	1,12	2,84
Diciembre	1,68	0,83	2,51

Tabla 7. Valores de irradiación media diaria directa, difusa y global sobre plano horizontal en Algarrobo (Fuente: PVGIS)

En los datos mostrados en la Figura 30 se puede apreciar como en los meses de invierno la irradiación global es menor debido a que hay menos horas de luz. Sin embargo, en los meses de verano es cuando la irradiación global y directa son mayores debido a la mayor duración del día que se traduce en más horas de luz solar, a la menor cobertura de nubes y al ángulo de incidencia solar que provoca que la altura del sol sea mayor y más vertical y por tanto la radiación solar dispersada por la atmosfera será menor.

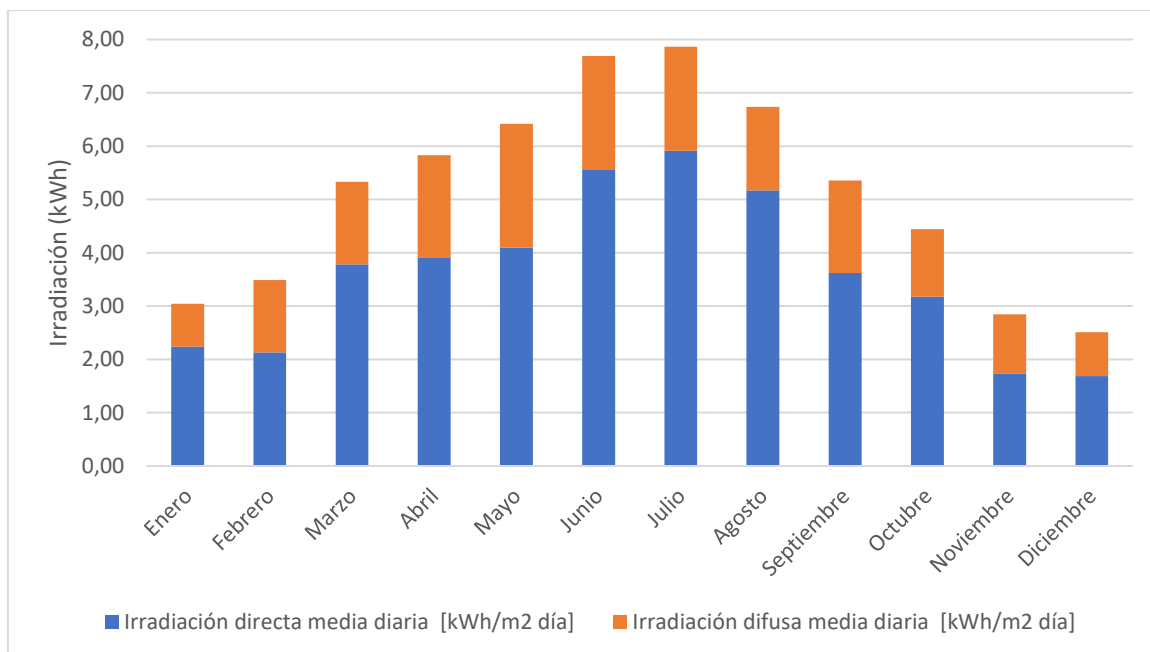


Figura 30. Irradiación media diaria directa y difusa sobre plano horizontal en Algarrobo (Fuente: Elaboración propia)

Dado que la instalación fotovoltaica se va a instalar coplanaria a la cubierta del invernadero, que como se ha descrito en el apartado 3.3.1, tiene una inclinación de 20 °, es necesario evaluar la irradiación global en el ángulo de inclinación de la cubierta. Estos datos se recogen en la Tabla 8.

Mes	Irradiación global media diaria [kWh/m²día]
Enero	3,61
Febrero	5,13
Marzo	5,43
Abril	5,40
Mayo	7,19
Junio	7,41
Julio	7,63
Agosto	7,43
Septiembre	6,01
Octubre	5,54
Noviembre	3,72
Diciembre	3,42

Tabla 8. Irradiación global media diaria sobre plano inclinado 20°. (Fuente: PVGIS)

En la Figura 31 se plasma la irradiación global media diaria sobre superficie horizontal y sobre una superficie de 20 °. Se puede observar como en los meses de invierno, en los que la altura del sol no es tanta como en los meses de verano la irradiación sobre captada por una superficie inclinado 20 ° es ligeramente superior a la captada por una superficie horizontal. Por este motivo, los módulos fotovoltaicos con una inclinación de 20 ° producirán mayor energía que aquellos que se encuentren en posición horizontal.

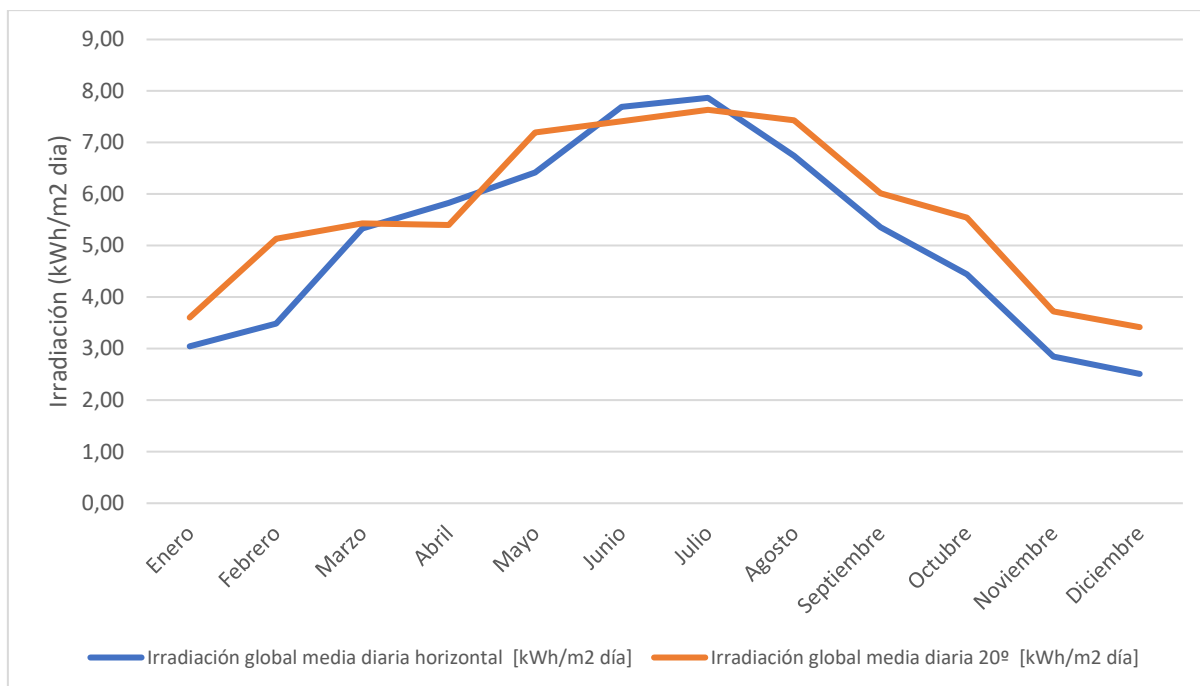


Figura 31. Irradiación global media diaria sobre plano horizontal y sobre plano inclinado 20° (Fuente: PVGIS)

## 5.2. Análisis Real Decreto 244/2019

El Real Decreto-Ley 244/2019, de 5 de abril es una continuación de RDL 15/2018, mediante el cual se aporta certidumbre y seguridad a los usuarios de cara a la instalación de paneles fotovoltaicos de autoconsumo, tal y como se recoge en el mismo *“El desarrollo del autoconsumo que promueve la norma tendrá un efecto positivo sobre la economía general, sobre el sistema eléctrico y energético y sobre los consumidores”*.

En el RDL 244/19 se diferencian tres modalidades de instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo:

- Autoconsumo sin excedentes: En esta modalidad se deberá instalar un mecanismo antivertido que impida la inyección de la energía excedente a la red de transporte o de distribución.

- Autoconsumo con excedentes acogido a compensación: está permitido el vertido de excedentes a las redes de distribución y transporte, además se habilita una compensación entre el déficit y el superávit de los consumidores acogidos al autoconsumo con excedentes para instalaciones de hasta 100 kW. Para acogerse a esta compensación se deben cumplir los siguientes requisitos:

1. La fuente de energía primaria sea de origen renovable.
2. La potencia total de las instalaciones de producción asociadas no sea superior a 100 kW.
3. Si resultase necesario realizar un contrato de suministro para servicios auxiliares de producción, el consumidor haya suscrito un único contrato de suministro para el consumo asociado y para los consumos auxiliares de producción con una empresa comercializadora, según lo dispuesto en el artículo 9.2 del presente Real Decreto.

4. El consumidor y productor asociado hayan suscrito un contrato de compensación de excedentes de autoconsumo definido en el artículo 14 del presente real decreto.

5. La instalación de producción no tenga otorgado un régimen retributivo adicional o específico.

- Autoconsumo con excedentes no acogidos a compensación: en esta modalidad está permitido el vertido de la energía excedente a la red pero no se pueden acoger a la compensación mencionada anteriormente por no cumplir alguno de los requisitos.

En este Real Decreto se ha realizado una simplificación de la tramitación y equipos necesarios para la instalación fotovoltaica:

- Para las instalaciones de menos de 15kW o de la modalidad sin excedentes, no se necesitan permisos de acceso y conexión.

- Para instalaciones de hasta 100kW conectadas a baja tensión el contrato de acceso con la distribuidora será realizado de oficio por la empresa distribuidora.

- La potencia instalada será la potencia máxima del inversor o, si hay varios, la suma de las potencias máximas de los inversores.

-De manera obligatoria, únicamente se deberá instalar un medidor bidireccional en el punto de frontera.

Por último, en el Real Decreto 244/2019 se presentan dos modalidades en cuanto al régimen económico del caso de autoconsumo con excedentes acogido a compensación:

- Compensar los excedentes con un balance neto mensual (compensación simplificada)

- Venta de energía en el pool (para lo cual hay que registrarse como productor autónomo y pagar las correspondientes tasas).

El beneficio que tiene el usuario al inyectar la energía excedente en la red consiste en una reducción de la factura eléctrica en función de la cantidad de energía vertida. El precio de venta de la energía del consumidor es menor que el precio de compra ya que no se tiene en cuenta ni los peajes ni los cargos. En ningún caso los ingresos por venta de energía pueden superar los gastos por la compra de la misma de manera que en el caso ideal se tendrá un flujo neto de dinero en el que el consumidor no paga por la compra de la energía ni tampoco recibe beneficios por su venta.

### 5.3. Riego fotovoltaico

#### 5.3.1. Invernadero de tomates

En el primer escenario a estudiar en este caso práctico se va a dimensionar una instalación fotovoltaica que alimente el sistema de riego mientras que el sistema de calefacción estará compuesto por una caldera de gas natural y se optará por un sistema de ventilación natural cuando sea posible y en caso de necesidad un sistema de ventilación forzada.

Se va a partir de la base de que ya existe conexión a red en el invernadero, ya que como se recoge en 'Caracterización de los invernaderos de Andalucía' (30), en el 2015 el 83% de los invernaderos del sudeste español contaban con conexión a la red eléctrica.

Para esta primera propuesta se va a estudiar una modalidad de autoconsumo en la que los excedentes de la producción fotovoltaica que no sean utilizados por el sistema de riego serán inyectados a la red con un precio de venta impuesto por la comercializadora. En línea con la bibliografía sobre este aspecto (30) , se va a suponer que la instalación tiene una potencia contratada de 5,35 kW.

A la hora de evaluar el ahorro que se tendría en este escenario y con este modelo de compensación se debe tener en cuenta el valor del PVPC (Precio de venta para el pequeño consumidor) que es el coste de la energía para cada día del año. Se va a calcular la producción diaria de la instalación fotovoltaica diseñada para alimentar el sistema de riego y se van a evaluar los excedentes de manera que cuando la instalación no genere la energía demandada por el sistema de riego se comprará energía de la red según el PVPC y cuando se tengan excedentes se inyectarán en la red recibiendo el precio de compensación acordado con la comercializadora. Se debe tener en cuenta que se realiza un balance mensual en el que se establece como nulo el posible beneficio del consumidor.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la instalación fotovoltaica se va a instalar de manera coplanar a la cubierta del invernadero y por tanto tendrá una inclinación de 20 °. La orientación de los módulos será hacia el sur con el fin de maximizar la producción fotovoltaica.

### 5.3.2. Invernadero de tomates y pimientos

Tal y como se ha especificado en el apartado 3.3, en este caso práctico se tienen dos invernaderos de 8000 m<sup>2</sup> cada uno. En la propuesta anterior en ambos invernaderos se desarrollaba un cultivo de tomates, siendo la superficie útil total igual a 12500 m<sup>2</sup>.

En este escenario se propone utilizar un invernadero para cultivo de tomates y el otro para cultivo de pimientos, siendo la superficie útil de cada uno de los invernaderos de 6250 m<sup>2</sup>.

Se propone un cultivo de tomates junto a otro de pimientos ya que los ciclos de cultivo son distintos. Mientras el ciclo del tomate se desarrolla desde septiembre hasta junio, según lo explicado en el apartado 3.4, el ciclo largo del pimiento abarca desde la segunda quincena de junio, en la que se trasladan las plántulas de los semilleros al interior del invernadero hasta febrero en la que se recogen los frutos ya maduros.

Al evaluar el cultivo simultáneo de pimientos y tomates las necesidades energéticas cambiarán respecto al invernadero previamente diseñado. En la Figura 32 se muestra la comparativa de la energía consumida por el sistema de riego en que a partir de ahora se denominará 'Invernadero T' y será en el que se cultivan únicamente tomates, con el que se va a denominar 'Invernadero T+P' que es en el que se cultivan tomates y pimientos a la vez.

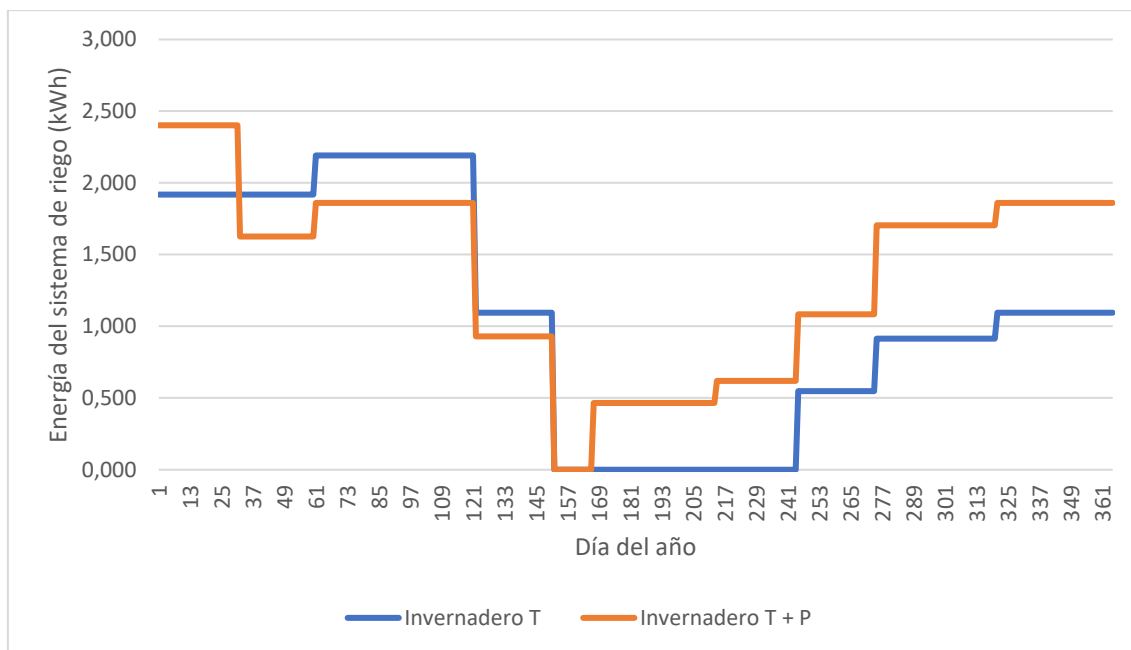


Figura 32. Comparación de la energía del sistema de riego del Invernadero T y T + P expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

Si bien es cierto que la potencia de la bomba del sistema de riego y fertirrigación es menor en el Invernadero T+P ya que con una bomba con una potencia de 929,68 W es suficiente para satisfacer la demanda del sistema de riego, el consumo energético anual es mayor que en el Invernadero T. La energía anual requerida por el Invernadero T es de 339 kWh mientras que la del Invernadero T+P es de 498 kWh, lo que supone que se requiere un 28% más de energía para alimentar el sistema de riego en el segundo caso.

Este aumento de requerimiento energético en el Invernadero T+P se debe principalmente a que, al haber dos tipos de cultivos (tomate y pimiento) con un ciclo de desarrollo distinto, los cultivos se encuentran en distintas fases del ciclo y por tanto las necesidades hídricas para cada cultivo varían.

#### 5.4. Bomba de calor

En el segundo escenario lo que se propone es la evaluación de la viabilidad de una instalación fotovoltaica colocada sobre la cubierta del invernadero que alimente una bomba de calor aerotérmica, con capacidad de proporcionar calor y frío, que sustituya a los sistemas de calefacción y refrigeración descritos en el apartado 3.3.

Dado el elevado consumo de la bomba de calor, esta instalación al igual que la propuesta anterior, debe estar conectada a la red de manera que cuando la instalación fotovoltaica no genere la energía suficiente para alimentar la bomba de calor se consuma la electricidad de la red.

Para realizar esta propuesta se ha tenido en cuenta el estudio 'Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía renovable' (48) en el que se evalúa la variación de la producción agrícola del invernadero en función del porcentaje de la cubierta que ha sido sombreado por los módulos fotovoltaicos.

Según lo comentado en el apartado 2.3.7, la técnica del sombreado es común en los invernaderos del sudeste español para reducir la radiación solar incidente en la cubierta del invernadero y de esta manera reducir la temperatura y la humedad relativa en el interior del invernadero. Las técnicas mencionadas como el blanqueo de la cubierta o la colocación de pantallas térmicas tienen la característica de ser estacionales, de manera que solo se llevan a cabo en los meses de verano en los que la radiación solar es mayor. Sin embargo, los módulos fotovoltaicos diseñados en esta propuesta estarán fijos durante todo el año por lo que la afección del sombreado sobre el cultivo será mayor y se deberá estudiar la producción agrícola que se tiene para evaluar la rentabilidad de la propuesta.

En este escenario, al igual que en el anterior, se van a dimensionar los dos mismos invernaderos. El 'Invernadero T' en el que únicamente se cultivan tomates y el 'Invernadero T+P' en el que se cultivan simultáneamente tomates y pimientos. Se ha escogido el pimiento para evaluar los cambios que supondría la introducción de este cultivo a nivel energético, pues el Invernadero T estaba vacío en los meses de verano y, por tanto, las necesidades de refrigeración durante este periodo eran nulas. En esta variante, durante los meses de verano el Invernadero T+P estará ocupado por el cultivo de pimientos por lo que será necesario el sistema de refrigeración.

Tras realizar el análisis del Real Decreto 244/2019 se ha optado por dimensionar una instalación que no supere los 100 kWp de manera que se puede acoger a la compensación por excedentes ya mencionada en este apartado.

Al igual que en la propuesta anterior, los módulos fotovoltaicos se colocarán coplanares a la cubierta del invernadero, es decir, con una inclinación de 20 ° y la orientación será hacia el sur.

A continuación se procede a comparar los consumos del sistema de calefacción y refrigeración de los ya descritos Invernadero T e Invernadero T+P para justificar los consumos totales de la bomba de calor.

Respecto al sistema de calefacción, se ha realizado un cálculo análogo al del Invernadero T para obtener las necesidades térmicas totales del sistema de calefacción para el Invernadero T+P. La potencia necesaria en el Invernadero T+P para alimentar el sistema de calefacción es de 1314 kW .

El número de horas de uso de la calefacción será similar al del Invernadero T, sin embargo, la energía total consumida por el sistema de calefacción en el invernadero T+P será de 573,3 MWh/año, mientras que en el Invernadero T se consumen 674,8 MWh/año. Lo que supone que es un 17% menor que en el Invernadero T. Esto es debido principalmente a que el invernadero dedicado al cultivo de pimientos no tiene consumo de calefacción a partir de enero, que es cuando se recolectan los pimientos. Esta diferencia de consumos entre el Invernadero T y el invernadero T+P se puede apreciar en la Figura 33.

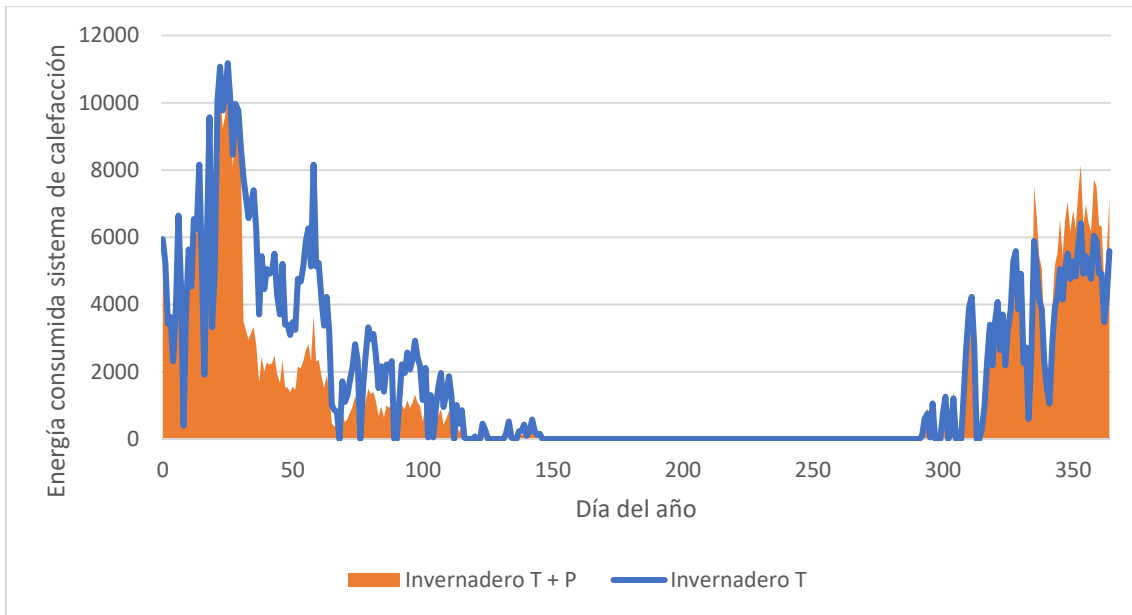


Figura 33. Comparación de la energía consumida por el sistema de calefacción del Invernadero T y T + P expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

En cuanto al sistema de refrigeración y según lo comentado, el Invernadero T+P tiene unas necesidades energéticas considerablemente superiores a las de Invernadero T debido a que durante los meses veraniegos, el cultivo de pimientos necesita refrigeración, ya que la temperatura máxima biológica de este cultivo son 26 ° C. Concretamente en el Invernadero T el consumo anual de energía dedicada al sistema de refrigeración es de 162,2 MWh/año, mientras que en el Invernadero T+P se necesitan 583,28 MWh/año, lo que supone un 359% más de energía consumida por el sistema de refrigeración. Estos resultados comparativos se plasman en la Figura 34.

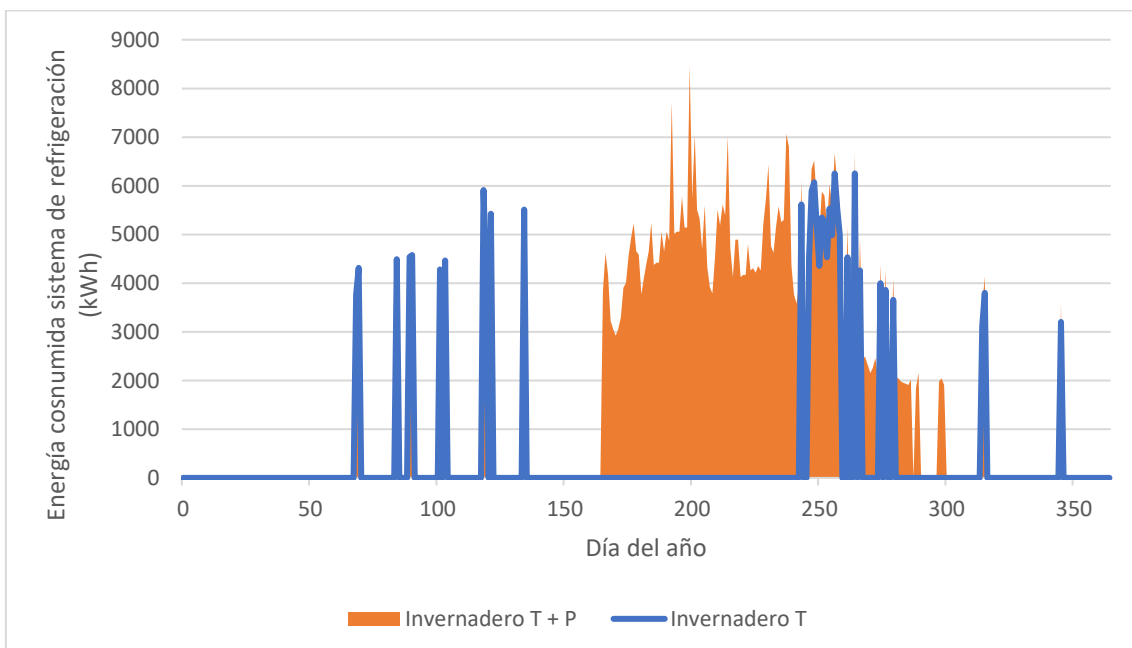


Figura 34. Comparación de la energía consumida por el sistema de refrigeración del Invernadero T y T + P expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

Una vez analizados los consumos de los sistemas de calefacción y refrigeración tanto del Invernadero T como del T + P, se procede a dimensionar la bomba de calor aerotérmica.

Para este estudio comparativo se va a considerar que tanto el COP (Coefficient of Performance) que afecta al sistema de calefacción y el EER (Energy Efficient Ratio) que afecta a la refrigeración, tienen un valor de 3,5 que es un valor adecuado para bombas de calor aerotérmicas en este tipo de instalaciones. (49)

Por tanto, en el Invernadero T se tendrá una demanda de electricidad de 192,8 MWh/año debido al sistema de calefacción y de 46,38 MWh/año debido a la refrigeración. Mientras que en el Invernadero T+P la energía eléctrica consumida por el sistema de calefacción será de 163,8 MWh/año y la de refrigeración de 166,6 MWh/año. En la Figura 35 se muestra el consumo diario de energía eléctrica de la bomba de calor para cada invernadero.

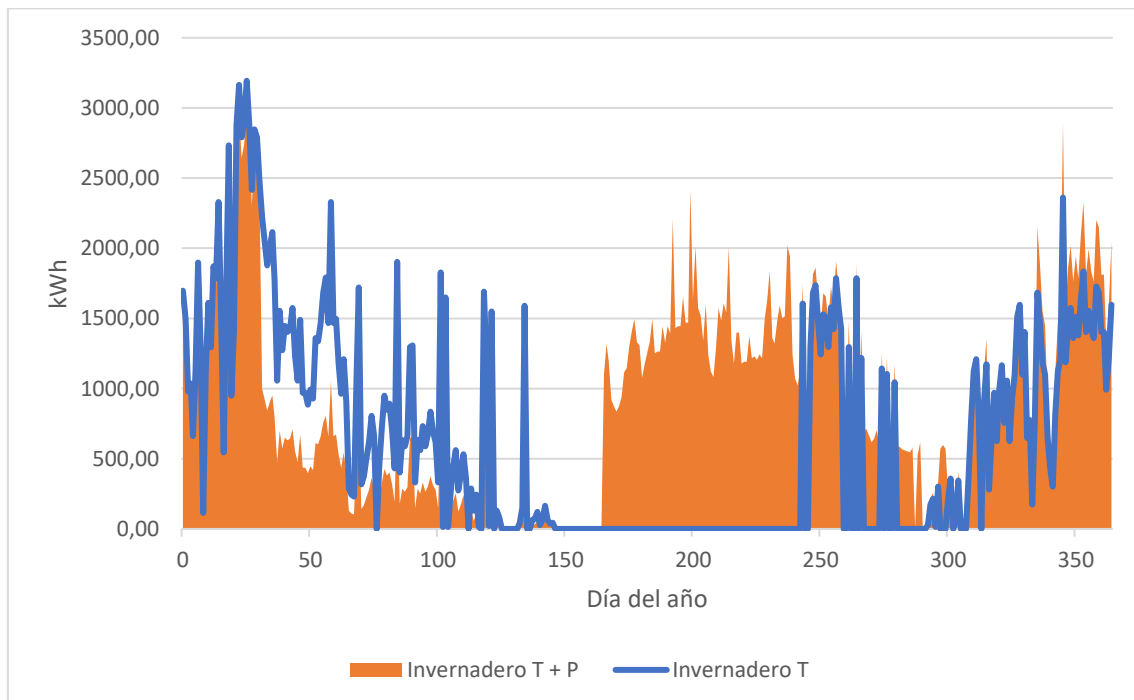


Figura 35. Comparación de la energía eléctrica consumida por la bomba de calor del Invernadero T y T+P expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

## 6. Análisis de resultados

### 6.1. Metodología

Tras exponer en el apartado anterior los distintos escenarios que se van a analizar, en este subapartado se explicará la metodología utilizada durante todo el estudio comparativo así como durante el análisis de resultados. En la Figura 36 se muestra de manera ilustrativa la metodología utilizada.

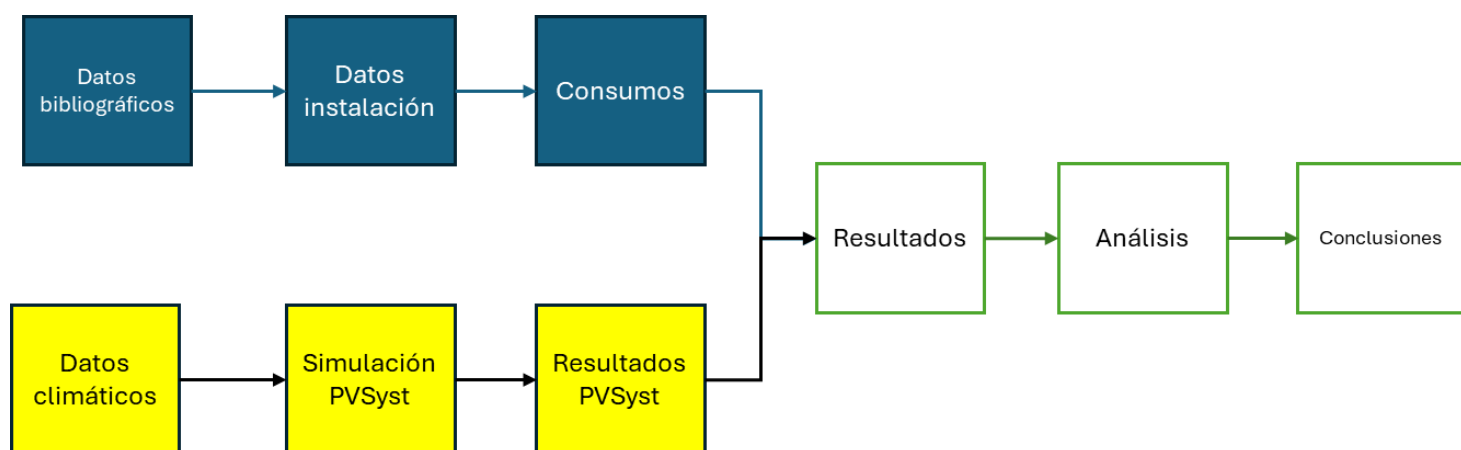


Figura 36. Metodología utilizada en el estudio comparativo (Fuente: Elaboración propia)

Para poder realizar este trabajo se han analizado multitud de informes, trabajos y artículos relacionados con los invernaderos en la zona sureste de la península ibérica, así como del uso de la energía solar fotovoltaica y de energías renovables en invernaderos. Todos los datos bibliográficos que se han considerado se han ido justificando adecuadamente a lo largo del trabajo.

El siguiente paso ha consistido en adecuar los datos obtenidos de la bibliografía a la instalación que se ha dimensionado, en este caso un invernadero tipo raspa y amagado de 16000 m<sup>2</sup> en el término municipal del Algarrobo dedicado al cultivo de tomates y de pimientos. En el apartado 3 se especifica uno a uno cada sistema del invernadero y en el punto 4 se calculan detalladamente todos los consumos relevantes en la instalación. Para realizar tanto la adecuación de los datos bibliográficos como el dimensionamiento y los cálculos expuestos en este trabajo se han utilizado hojas de cálculo de Excel para poder tratar todos los datos de manera adecuada y poder obtener las gráficas ilustrativas que se han mostrado en todo el trabajo.

Como ya se ha comentado con anterioridad para realizar este estudio comparativo se ha utilizado el software PVSyst para realizar la simulación de las instalaciones fotovoltaicas. Dado que este software no contaba con los datos climáticos de la zona donde se ha realizado el estudio, se han tenido que introducir manualmente para poder obtener resultados precisos y válidos.

Tras realizar las simulaciones con PVSyst y obtener los resultados numéricos de producción energética de las distintas instalaciones fotovoltaicas, mediante hojas de cálculo se han comparado los resultados obtenidos con los consumos calculados anteriormente para obtener los resultados del estudio comparativo y proceder, primero, a analizarlos y por último a extraer las conclusiones del estudio.

Los resultados obtenidos se analizarán desde un punto de vista energético, analizando los consumos y comparándolos con la generación de energía fotovoltaica producida por la instalación diseñada mediante PVsyst. Adicionalmente se realizará un análisis económico de las propuestas seleccionadas para evaluar los costes y el ahorro en cada escenario y poder determinar la viabilidad de los propuestas.

## 6.2. Riego fotovoltaico

Para este escenario se han escogido módulos fotovoltaicos del modelo TSM-PC05A del fabricante Trina Solar que tiene una potencia pico de 250 Wp. Para evaluar el número de módulos necesario para cubrir la energía consumida por el sistema de riego, se ha comparado la producción fotovoltaica de una instalación formada por tres módulos, con una potencia total de 750 Wp, con una compuesta de dos módulos, cuya potencia es de 500 Wp y otra que únicamente cuenta con un módulo fotovoltaico de 250 Wp.

Los resultados de la producción fotovoltaica se han superpuesto con el consumo del sistema de riego del Invernadero T y se muestran en la Figura 37.

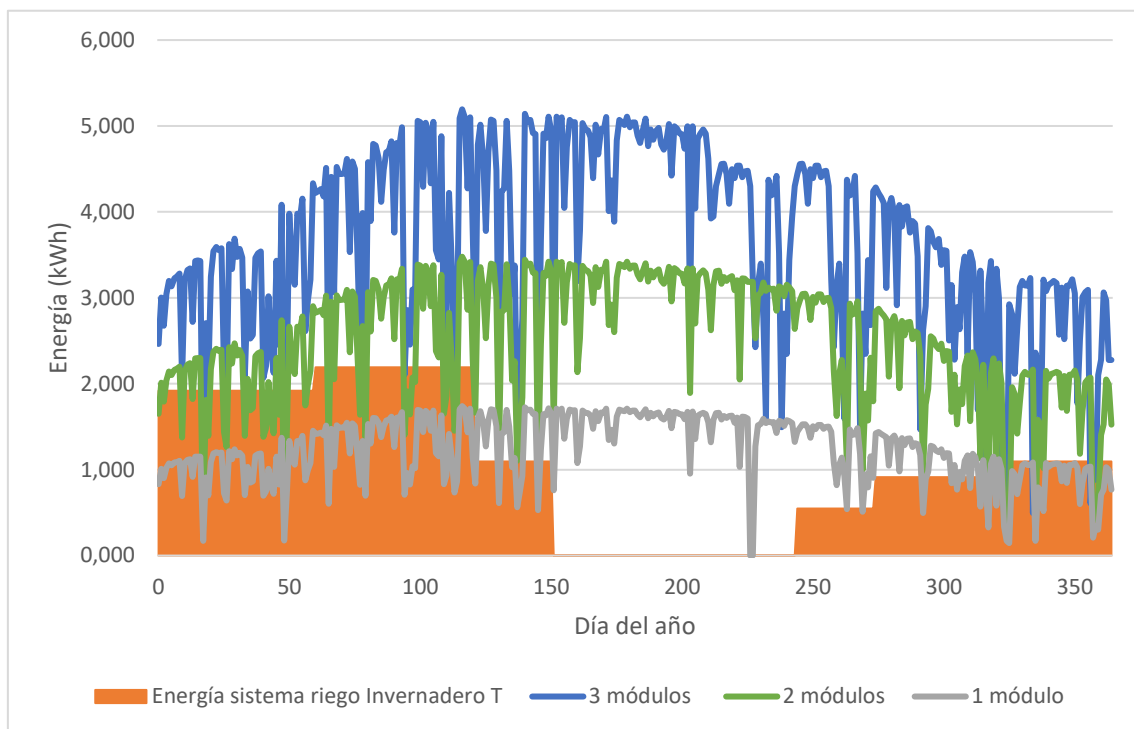


Figura 37. Consumo de energía del sistema de riego del Invernadero T frente a la producción fotovoltaica de 1, 2 y 3 módulos expresada en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

En esta Figura 37 se puede observar como la propuesta de colocar tres módulos sobre la cubierta del invernadero estaría sobredimensionada ya que prácticamente todos los días del año se tendrían excedentes que inyectar en la red y debido al balance neto que se realiza en la modalidad de autoconsumo con excedentes, no se obtendría la suficiente compensación económica para amortizar el coste de la instalación fotovoltaica.

Por lo anteriormente expuesto la opción con tres módulos se descarta y se procede a analizar el balance de excedentes y consumo de energía de la red de la opción con un módulo y la opción con dos módulos que se muestran en las Figuras 38 y 39.

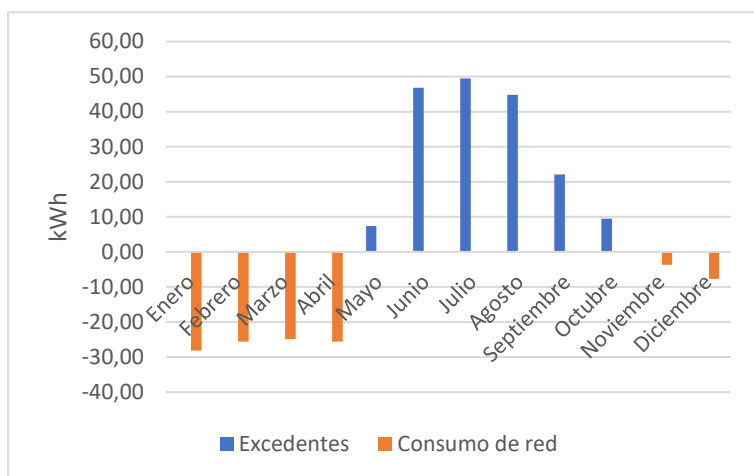


Figura 39. Balance de excedentes y energía consumida de la red con un módulo para el Invernadero T, expresada en kWh (Fuente: Elaboración propia)

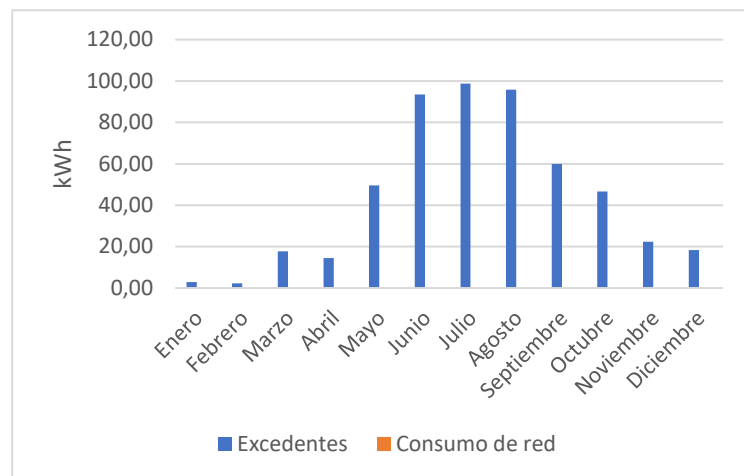


Figura 38. Balance de excedentes y energía consumida de la red con dos módulos para el Invernadero T, expresada en kWh (Fuente: Elaboración propia)

En la configuración con un solo módulo se puede apreciar que en los meses en los que se tiene el cultivo, y por tanto, se necesita el sistema de riego, la producción fotovoltaica no es suficiente para alimentar la bomba y por lo que se debe consumir energía de la red eléctrica. De manera inversa, en los meses de verano cuando la producción fotovoltaica es mayor, debido a que hay más horas de luz, toda la energía producida por el sistema fotovoltaica se vuelca a la red ya que no hay consumo por parte del sistema de riego. Estos resultados dejan entrever que esta no será una opción muy viable económicamente ya que debido a la modalidad de autoconsumo con balance neto mensual, en los meses de verano en los que no hay consumo por parte de la red eléctrica no se tendría ninguna reducción en la factura y se estaría volcando la energía producida por el sistema fotovoltaica “gratuitamente” a la red.

En la modalidad con dos módulos fotovoltaicos ningún mes se tendría que comprar energía de la red ya que el balance es positivo en todos los meses del año. En este caso los excedentes inyectados a la red abaratarían la factura eléctrica en los meses en los que más consumo se tiene. Se debe destacar que de nuevo en los meses de verano los excedentes se inyectarían a la red sin obtener ningún beneficio económico.

Para poder calcular el ahorro de cada modalidad se ha consultado el PVPC del año 2023 (50), año sobre el que se ha realizado el estudio así como el precio de venta de excedentes procedentes de instalaciones de autoconsumo (51).

Realizando los cálculos correspondientes se tiene que el ahorro anual respecto al invernadero sin la instalación fotovoltaica es de 40,32 €/año en el caso de colocar un módulo y de 58,25 €/año en el caso de colocar dos módulos sobre la cubierta.

Para escoger la mejor opción se ha recurrido a los parámetros económicos VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa Interna de Retorno) y tiempo de retorno de la inversión inicial.

El VAN representa el beneficio neto con el valor del dinero actual que se va a tener durante la vida útil de la instalación. Si el resultado del VAN es positivo indica la viabilidad del proyecto y en caso contrario, si es negativo indica que el proyecto no es rentable puesto que se tendrían pérdidas. El cálculo del VAN depende de la tasa de descuento que estima el valor del dinero en el futuro.

El TIR es el valor de la tasa de descuento con la que se obtiene un VAN igual a 0. Es decir, el TIR indica la tasa de descuento necesaria para recuperar la inversión.

Por último el tiempo de retorno es el número de años en los que se amortiza la inversión inicial gracias a los beneficios obtenidos por la instalación.

De cara a calcular el VAN y el TIR de cada una de las configuraciones se debe calcular previamente la inversión inicial a realizar. El modelo TSM-PC05A tiene un coste de 128,26 € (IVA incluido) y en la variante en la que solo se tiene un módulo el microinversor escogido es el modelo CM-240-EC / UL1741 de 0,24 kWac del fabricante Canadian Solar que tiene un coste de 180,83 € (IVA incluido). Para la configuración de 2 módulos el inversor es el modelo CSI-700TL1P-GI-FL de 0,7 kWac de Canadian Solar que tiene un coste de 197,56 € (IVA incluido). Al coste de los módulos y del inversor se debe añadir el coste los soportes, del cableado y del equipo de protección que se estima en un 15 % del coste total de los módulos e inversor. Por lo tanto la inversión inicial en el caso de tener un módulo es de 355,45 € y de 522,19 € en el caso de tener dos módulos. Adicionalmente se ha supuesto que los costes de operación y mantenimiento anuales son del 3% de la inversión inicial.

Para calcular el VAN y el TIR se ha supuesto una tasa de descuento del 4,5 % (52) y una vida útil de la instalación de 25 años. Los resultados obtenidos del análisis económico se muestran en la Tabla 9.

	Invernadero T		
	VAN (€)	TIR (%)	Tiempo retorno (años)
1 Módulo	5.710,42 €	7%	11,99
2 Módulos	8.374,63 €	6%	12,26

*Tabla 9. Resultados económicos Invernadero T (Fuente: Elaboración propia)*

El tiempo de recuperación de la inversión inicial se puede observar de manera gráfica en las Figuras 40 y 41.

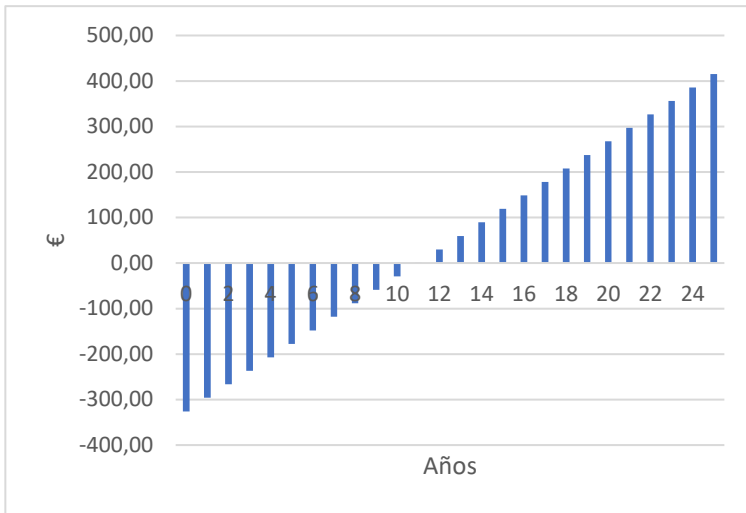


Figura 40. Tiempo de retorno de la inversión inicial con un módulo para el Invernadero T (Fuente: Elaboración propia)

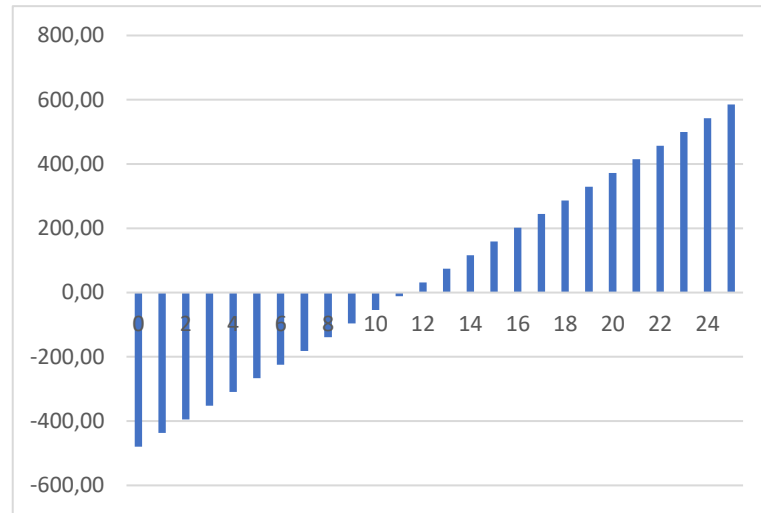


Figura 41. Tiempo de retorno de la inversión inicial con dos módulos para el Invernadero T (Fuente: Elaboración propia)

Dado que los valores del TIR y del tiempo de retorno son similares se va a escoger para el Invernadero T un solo módulo fotovoltaico para alimentar el sistema de riego. Con un módulo el ahorro anual que se tiene es menor que respecto una instalación de 2 módulos pero también es menor la inversión inicial, por ello el valor del VAN es mayor en el caso de tener dos módulos. Desde el punto de vista energético se adecua mejor la instalación con un módulo ya que sólo se tienen excedentes en los meses de verano.

A continuación se realizan los cálculos idénticos para el Invernadero T+P, en el que según lo comentado anteriormente, la energía anual requerida por el sistema de riego es un 28% superior a la del Invernadero T.

En las Figuras 42 y 43 se muestran los resultados de realizar el balance de la producción fotovoltaica y del consumo del Invernadero T+P para una instalación fotovoltaica con un único módulo y para otra con dos módulos.

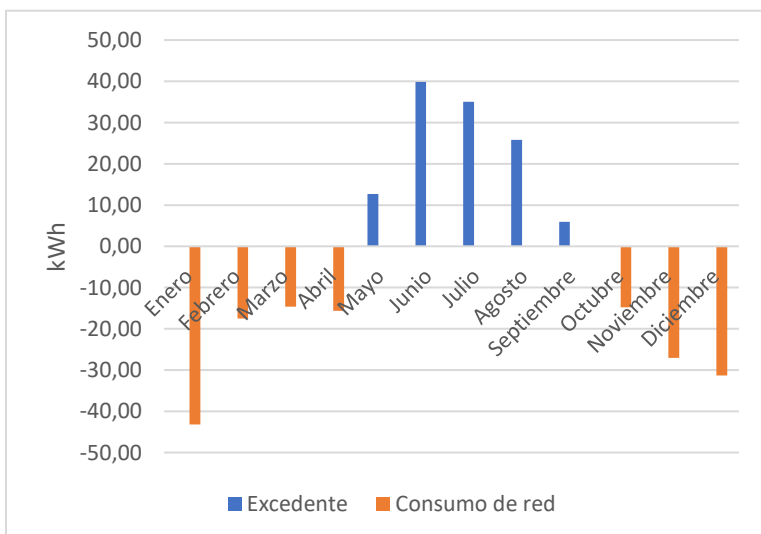


Figura 43. Balance de excedentes y energía consumida de la red con un módulo para el Invernadero T+P, expresada en kWh (Fuente: Elaboración propia)

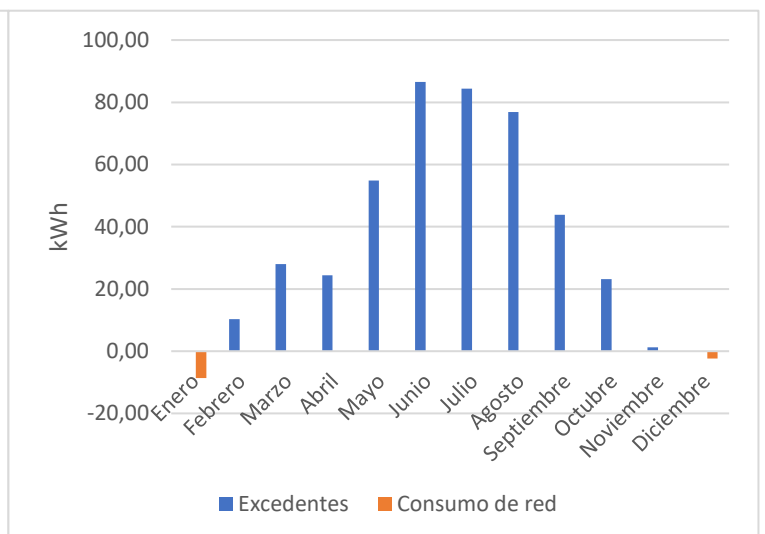


Figura 42. Balance de excedentes y energía consumida de la red con dos módulos para el Invernadero T+P, expresada en kWh (Fuente: Elaboración propia)

En la variante con un solo módulo, al igual que en el caso Invernadero T y pese a que en el Invernadero T+P en los meses de verano se tiene el cultivo de pimientos, los resultados son similares ya que en estos meses de verano en los que la producción fotovoltaica es mayor, el sistema de riego no llega a consumir toda la energía genera por la instalación fotovoltaica y se tiene que inyectar a la red.

Se puede observar como en la instalación con dos módulos los excedentes vertidos a la red son elevados especialmente en los meses de verano, que a pesar de tener el cultivo de pimientos, este solo ocupa la mitad del invernadero por lo que la energía consumida por el sistema de riego siempre será menor que la energía fotovoltaica producida.

Los ahorros anuales para el Invernadero T+P son ligeramente superiores a los del Invernadero T ya que en el caso de un solo módulo el ahorro anual es de 49,85 €/año, mientras que en el de dos módulos el ahorro asciende a 71,87 €/año.

Realizando nuevamente los cálculos del VAN y TIR con las mismas variables que en primer caso se obtienen los siguientes resultados plasmados en la Tabla 10.

	Invernadero T+P		
	VAN (€)	TIR (%)	Tiempo retorno (años)
1 Módulo	5.851,57 €	10%	8,07
2 Módulos	8.576,55 €	10%	9,29

Tabla 10. Resultados económicos Invernadero T + P (Fuente: Elaboración propia)

Al igual que en el caso del primer invernadero los resultados del cálculo del tiempo de retorno se muestran en las Figuras 44 y 45.

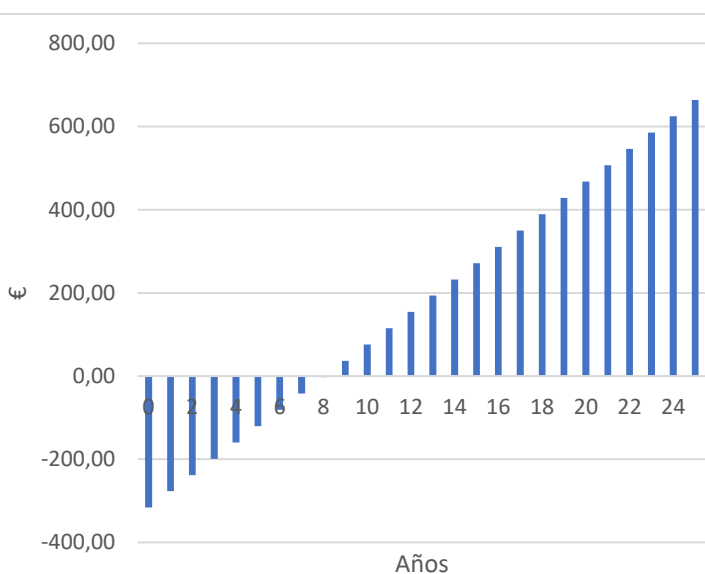


Figura 45. Tiempo de retorno de la inversión inicial con un módulo para el Invernadero T + P (Fuente: Elaboración propia)

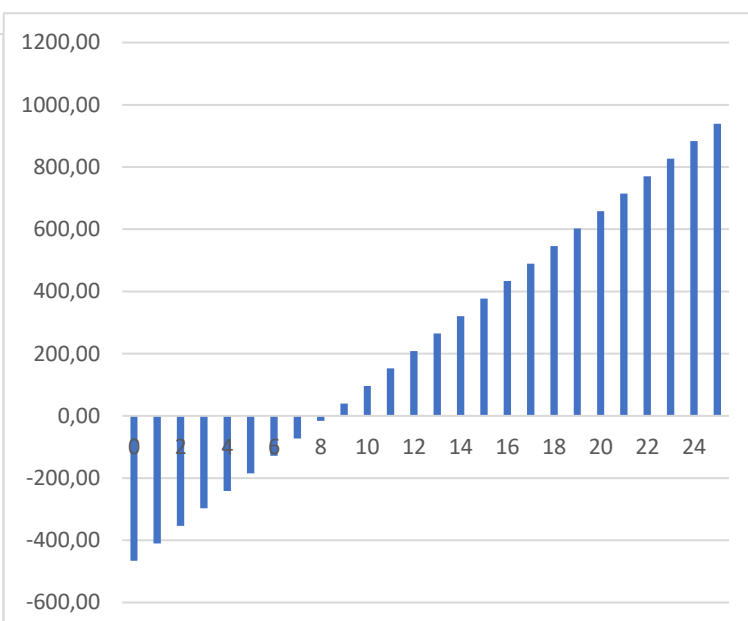


Figura 44. Tiempo de retorno de la inversión inicial con dos módulos para el Invernadero T + P (Fuente: Elaboración propia)

En el caso del Invernadero T + P nuevamente el valor del TIR es idéntico en la instalación de un módulo y en la de dos módulos, sin embargo, el tiempo de recuperación de la inversión inicial es menor cuando solo se coloca un módulo y es por ello por lo que se va a escoger esta modalidad también para el Invernadero T + P. Igual que en el Invernadero T con un módulo el consumo del sistema de riego se adapta mejor a la producción, aun cuando se debe verter energía excedente a la red eléctrica en los meses de verano cuando la producción fotovoltaica es mayor.

### 6.3. Bomba de calor

Tal y como se ha descrito previamente, tras analizar los tipos de autoconsumo existentes en el RD 244/2019 se ha optado por la modalidad de autoconsumo con compensación de excedentes. Por ello, la potencia máxima de la instalación debe ser 100 kW y en este caso práctico se ha optado por el dimensionamiento de un instalación fotovoltaica de 97 kWp.

La instalación fotovoltaica estará formada por 161 módulos del modelo TSM-DE20-600 que tienen una potencia de 600 Wp. La disposición de los módulos estará formada por 7 strings con 23 módulos conectados en serie en cada una de ellas.

Respecto al inversor se han escogido dos inversores del modelo CSI-50KTL-GI del fabricante Canadian Solar cuya potencia nominal es de 50 kWac.

En las Figura 46 46 y 47 se muestra la producción fotovoltaica de la instalación de 97 kWp frente a los consumos totales de los Invernaderos T y T + P, respectivamente.

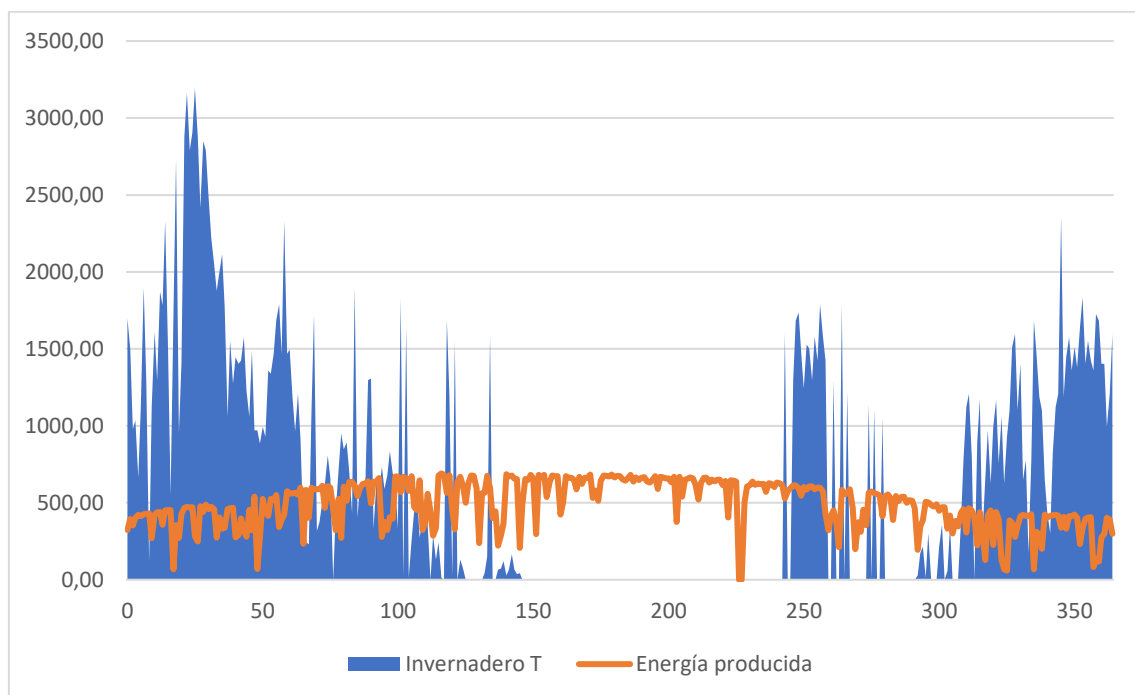


Figura 46. Consumo de energía del Invernadero T frente a la producción fotovoltaica en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

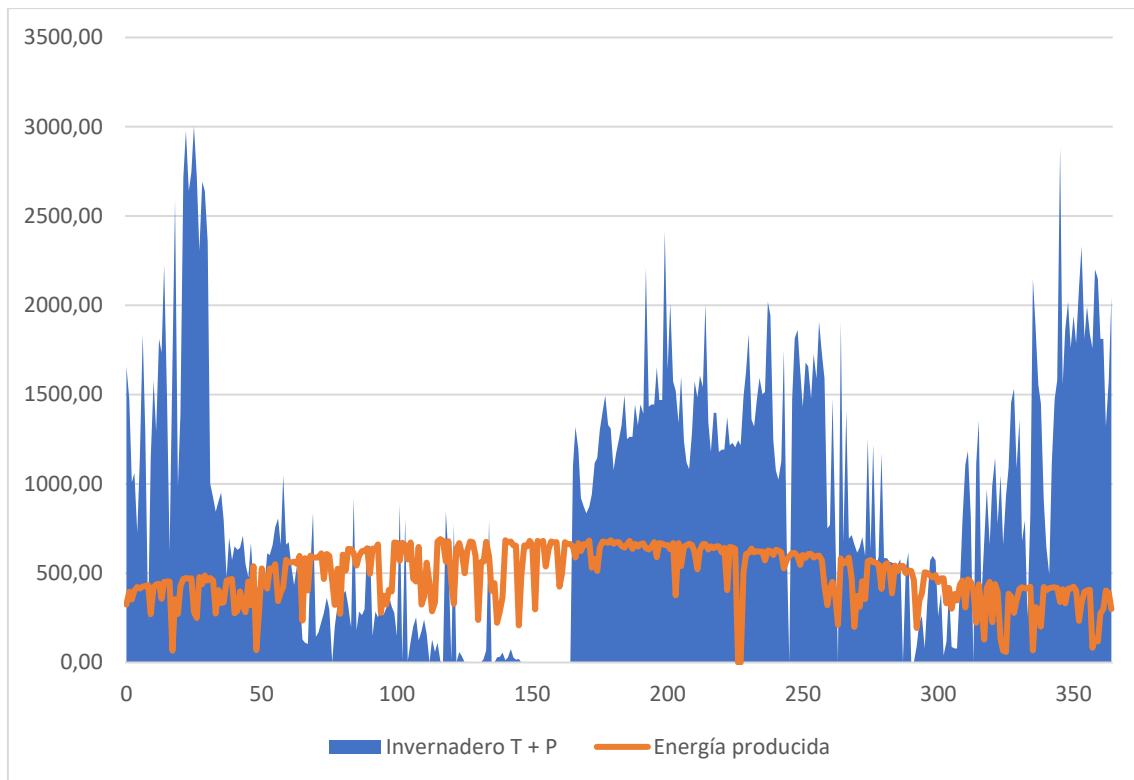


Figura 47. Consumo de energía del Invernadero T + P frente a la producción fotovoltaica en kWh. (Fuente: Elaboración propia)

Al igual que en el escenario anterior se ha realizado un balance diario con los consumo de la bomba de calor del Invernadero T y del invernadero T+ P respecto a la producción fotovoltaica de la instalación previamente descrita. Los resultados de los excedentes vertidos en la red y de la energía consumida de la red se muestran en las Figuras 48 y 49.

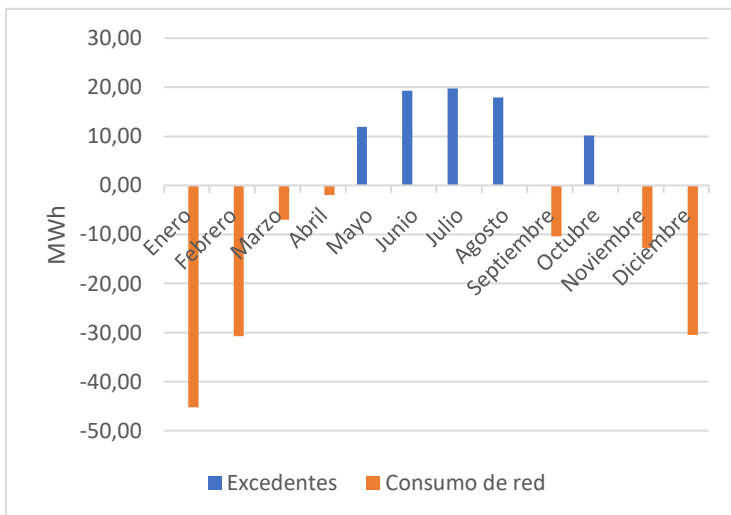


Figura 49. Balance de excedentes y energía consumida de la red para el Invernadero T, expresada en MWh (Fuente: Elaboración propia)

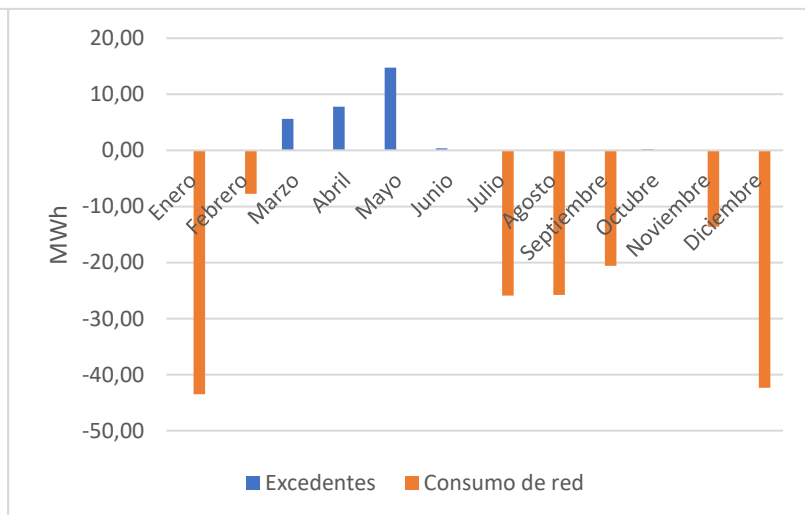


Figura 48. Balance de excedentes y energía consumida de la red para el Invernadero T+ P, expresada en MWh (Fuente: Elaboración propia)

En el caso del Invernadero T se puede apreciar que en los meses de invierno, cuando el consumo de energía del sistema de calefacción es mayor y la producción fotovoltaica de la instalación es

menor, el consumo de energía procedente de la red es elevado. Por ejemplo, en el mes de enero la producción mensual de energía fotovoltaica es de 12,28 MWh mientras que el consumo, únicamente del sistema de calefacción, es de 55,7 MWh por lo que se deben consumir de la red 43,23 MWh. Se observa, al igual que en el caso del riego fotovoltaico, que en los meses de verano en los que la producción fotovoltaica es mayor y el consumo es nulo puesto que no hay cultivo, toda la energía se debe inyectar a la red sin poder recibir compensación por ello.

El Invernadero T+P se comporta de manera similar al Invernadero T en los meses de invierno en los que la producción de energía fotovoltaica no es suficiente y se debe consumir grandes cantidades de energía procedentes de la red eléctrica. Sin embargo, en el Invernadero T+P los excedentes se tienen en los meses del primavera y es debido a que en estos meses la producción fotovoltaica es alta y únicamente se tiene el cultivo de tomates ya que el de pimientos se recoge en enero. En los meses estivales, cuando las necesidades de refrigeración de los pimientos son mayores y pese a que la producción fotovoltaica es elevada, se debe consumir energía de la red lo que indica que aunque la instalación fotovoltaica esté trabajando a potencia nominal nunca va a llegar a cubrir totalmente el consumo del sistema de refrigeración.

En cuanto a los parámetros económicos, en este apartado se ha estimado que el coste de los equipos de la instalación como el cableado, contadores, etc. y el coste de instalación de los módulos suponen un 40% del coste la inversión inicial que en este segundo escenario es de 74471,73 €. Al igual que en el primer escenario la tasa de descuento se ha supuesto del 4,5% y los costes de operación y mantenimiento del 7% que es un valor más elevado que en el escenario anterior ya que la instalación es más grande.

Los ahorros anuales que se obtendrían respecto a la factura en la que la bomba de calor consume toda la energía de la red en el Invernadero T serían de 15034,33 € mientras que en el Invernadero T + P serían de 22853,85 €. Los ahorros en el Invernadero T + P son un 52% superiores a los del Invernadero T debido a que en el invernadero en el que se cultivan pimientos es necesario consumir mucha energía de la red durante los meses de verano para refrigerar el invernadero y en estos meses la producción fotovoltaica abarata de manera considerable el consumo en la factura.

Los resultados del análisis económico se muestran en la Tabla 11.

	VAN (€)	TIR (%)	Tiempo retorno (años)
Invernadero T	1.249.914,76 €	12%	8,58
Invernadero T + P	1.365.864,23 €	24%	5,22

Tabla 11. Resultados económicos del escenario de la bomba de calor (Fuente: Elaboración propia)

El valor positivo del VAN indica la viabilidad del instalación fotovoltaica sobre la cubierta para alimentar una bomba de calor en los dos invernaderos.

Los valores del TIR y del tiempo de retorno confirman que esta instalación es más rentable en el Invernadero T + P debido principalmente a que se tiene mayor ahorro respecto al consumo de la bomba de calor sin instalación fotovoltaica.

Se debe remarcar que los tiempos de retorno obtenidos suponen que la instalación aerotérmica de la bomba de calor ya existe en el invernadero y únicamente cambia la procedencia de la energía.

## 7. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el estado del arte actual de los invernaderos situados en el sureste de la península ibérica. Se han descrito y especificado los tipos de invernaderos así como los sistemas que lo componen.

Se ha dimensionado un invernadero basándose en datos bibliográficos sobre otros invernaderos de la zona y se han evaluado varios escenarios de los que se pueden sacar las siguientes conclusiones.

La primera conclusión y quizá la más relevante es que ha quedado evidenciado mediante cálculos y resultados la viabilidad técnica y económica de la introducción de tecnologías renovables fotovoltaicas en los invernaderos tipo raspa y amagado del sureste español.

Respecto al escenario en el que se analiza la viabilidad del riego fotovoltaico tanto para el Invernadero T, en el que solo hay tomates, como para el Invernadero T+ P, en el que hay tomates y pimientos, los resultados económicos indican la viabilidad de la instalación desde el punto de vista económico. El VAN, TIR y tiempo de retorno presentan valores razonables para llevar a cabo la instalación y esto se debe básicamente a que la inversión inicial es baja, debido al bajo coste de los módulos, el inversor y el resto de sistemas de la instalación, y la modalidad de autoconsumo con excedentes que permite recuperar parte de inversión gracias a la energía inyectada en la red.

Sin embargo, desde el punto de vista energético llevar a cabo esta instalación no sería conveniente en el caso del Invernadero T debido a la mala adaptación del ciclo del cultivo de tomates a la producción fotovoltaica ya que en los meses de verano, cuando mayor producción se tiene, no hay consumo por parte del sistema de riego y toda la energía se vierte a la red sin tener compensación económica.

En el caso del Invernadero T+ P, ya que se tiene parte del invernadero ocupado por pimientos durante los meses de verano, la adaptación del cultivo a la producción energética fotovoltaica es mayor y por tanto menores serán los excedentes en los meses de verano, mejorando así la rentabilidad de la instalación.

Para el escenario del riego fotovoltaico se podría plantear la posibilidad de introducir sistemas de almacenamiento, como baterías o un depósito en altura, sin embargo, estas mejoras carecen de sentido desde el punto de vista energético ya que, en el caso del Invernadero T, no se tiene cultivo durante 2 meses y medio y no tendría sentido práctico acumular la energía durante dicho tiempo.

En el escenario en el que se dimensiona la bomba de calor se constata la alta rentabilidad de una instalación fotovoltaica que alimente el consumo de una bomba de calor utilizada para calentar y refrigerar el invernadero para asegurar el correcto desarrollo del cultivo.

El ahorro y la rentabilidad es mayor en el invernadero en el que se cultivan tomates y pimientos ya que al tener cultivo durante los meses de verano el consumo de electricidad de la bomba de calor para poder refrigerar el invernadero. En estos meses de verano en los que el consumo es elevado, la producción fotovoltaica también es elevada por lo que la instalación se adecua correctamente al consumo.

El sector agrícola español es un gremio maltratado económicamente por las grandes empresas que compran sus productos, ya que les ofrecen precios muy bajos en los que incluso no llegan a recuperar la inversión inicial realizada. Durante el último año se han realizado numerosas protestas a lo largo y ancho del país para reivindicar mejoras laborales en el sector. Es por ello por lo que las propuestas realizadas en este trabajo de fin de máster sólo se podrán llevar a cabo en invernaderos en los que se tengan beneficios suficientes para poder realizar la inversión inicial correspondiente.

## 8. Bibliografía

1. **G. Mitchell Tada.** Associate ASLA. [En línea] 2020. [https://dirt.asla.org/2020/12/17/from-ancient-rome-to-contemporary-singapore-the-evolution-of-conservatories/?utm\\_medium=website&utm\\_source=archdaily.mx](https://dirt.asla.org/2020/12/17/from-ancient-rome-to-contemporary-singapore-the-evolution-of-conservatories/?utm_medium=website&utm_source=archdaily.mx).
2. **Jules Janick, Harry S. Paris and David C. Parrish.** The Cucurbits of Mediterranean Antiquity: Identification of Taxa from Ancient Images and Descriptions. [En línea] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2759226/>.
3. **Naciones Unidas.** *Objetivos de Desarrollo Sostenible.* 2022.
4. **Diego L. Valera, Francisco D. Molina y Antonio J. Álvarez.** *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos.* : IDAE, 2008.
5. **M. Pérez, J.A Sánchez, J. Pérez y A. Callejón** *Experiencias sobre aprovechamiento fotovoltaico de las cubierta de los invernaderos..* s.l. : Universidad de Almería, 2012.
6. **N. Yağız Çam, M. Akif Ezan y Y. Biçer.** An integrated transient model in TRNSYS for thermal management of the tomato growth process in a greenhouse with a PV-aided heat pump-assisted HVAC system. [En línea] 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266620272400034X#fig0003>.
7. **A. Tolón y X. Lastra.** *LA AGRICULTURA INTENSIVA DEL PONIENTE ALMERIENSE. Diagnóstico e instrumentos de la gestión ambiental..* : Universidad de Almería, 2010.
8. **Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.** *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos.* : ESRYCE, 2023.
9. **F. Martín Rodríguez .***Estudio de prospección de las diferentes tipologías de invernaderos en el Sureste Español. Análisis de los resultados frente a adversidades climáticas.* : Universidad Politécnica de Madrid, 2021.
10. **AbcAgro.** AbcAgro. [En línea] [http://www.abcagro.com/industria\\_auxiliar/tipo\\_invernaderos3.asp](http://www.abcagro.com/industria_auxiliar/tipo_invernaderos3.asp).
11. **Novedades Agrícolas S.A.** Novagric. [En línea] <https://novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernaderos-asimetricos>.
12. **F. Domingo Molina-Aiz, D. Luis Valera-Martínez, A. López-Martínez, M. Nathalie Honoré, M Moreno-Teruel,A. Peña-Fernández.** *Invernaderos.* : SPE3, s.l., 2022.
13. **Infoagro.** Los plásticos en la agricultura. Materiales de cubierta para invernaderos. *Infoagro.* [En línea] [https://www.infoagro.com/documentos/los\\_plasticos\\_agricultura\\_\\_materiales\\_cubierta\\_invernaderos\\_\\_parte\\_i\\_.asp](https://www.infoagro.com/documentos/los_plasticos_agricultura__materiales_cubierta_invernaderos__parte_i_.asp).
14. **Inveurop.** Tipos de cubiertas para invernaderos. [En línea] <https://inveurop.com/es/tipos-de-cubiertas-para-invernaderos/>.

15. **Invernaderos Agrícolas.** Manual Completo Para El Manejo De Invernaderos. [En línea] 2010. <https://invernaderos-agricolas.blogspot.com/2010/09/manual-completo-para-el-manejo-de.html>.
16. **F. Camacho-Ferre, L.J. Belmonte Ureña** *La incorporación de tecnología en la horticultura de Almería como base para mantener la rentabilidad de los cultivos.* : SPE3, s.l, 2022.
17. **DryGair.** Invernaderos hidropónicos y armarios de cultivo – Cómo mejorar la jardinería hidropónica. [En línea] <https://drygair.com/es/blog-es/invernadero-hidroponico/> .
18. **F. Guerrero y A. Polo.** *Usos, aplicaciones y evaluación de turbas.* 1990.
19. **A. Mérida García, J.A Rodríguez Díaz.** *Riego.* : SPE 3, s.l, 2022.
20. **A. Marhuenda.** *Control climático.* : SPE3, s.l., 2022.
21. **J. Yllera Martínez.** Royal Brinkman. *¿Cuáles son los tipos de calefacción disponible para invernaderos?* [En línea] 2022. <https://royalbrinkman.es/centro-de-conocimiento/mecanizacion/cuales-son-los-tipos-de-calefaccion-disponible-para-invernaderos#:~:text=Adem%C3%A1s%20de%20la%20calefacci%C3%B3n%20central,caliente%20y%20la%20calefacci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica>.
22. **Inveurop.** Temperatura ideal para cada cultivo de invernadero. [En línea] <https://inveurop.com/es/temperatura-ideal-para-cada-cultivo-de-invernadero/>.
23. **Canna Research.** Influencia de la temperatura ambiental en las plantas. [En línea] 2017. <https://www.canna.es/articulos/influencia-de-la-temperatura-ambiental-en-las-plantas>.
24. **Agrofacto.** Manejo del contenido de humedad en invernadero. [En línea] 2020. <https://agrofacto.com/manejo-de-humedad-invernadero/>.
25. **Tradecorp.** La Transpiración, una pieza clave en la absorción de nutrientes. [En línea] <https://tradecorp.mx/wp-content/uploads/2017/11/MAILING-TRADECORP5L-1.pdf>.
26. **InfoAgro.** CONTROL CLIMÁTICO EN INVERNADEROS. [En línea] [https://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/control\\_climatico.htm](https://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm).
27. **R. Bribiesca Aguilar.** Manejo del CO2 en invernadero. [En línea] 2022. <https://agrofacto.com/co2-invernadero/>.
28. **E. Madrano, M.C. Sánchez-Guerrero, P. Lorenzo, F.J. Alonso** *Relaciones hídricas y programación de riego en cultivos hortícolas en sustratos.* : IFAPA, 2008.
29. **P. Melgajejo Moreno, A. Navarro Quercop, P. Legua Murcia, V. Lidón Noguera** *La iluminación en los invernaderos.* : Limencop S.L, 2002.
30. **Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía** *Caracterización de los invernaderos en Andalucía.* : OBSERVATORIO DE PRECIOS Y MERCADOS , 2015.
31. **Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.** Andalucía pueblo a pueblo - Fichas Municipales. 2024.
32. **CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, PESCA Y DESARROLLO SOSTENIBLE.** *Cartografía de invernaderos en Almería, Granada y Málaga.* 2021.

33. **Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico.** El mes pasado fue el septiembre más lluvioso del siglo XXI y el octavo de la serie histórica. [En línea] 2023. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2023/10/el-mes-pasado-fue-el-septiembre-mas-lluvioso-del-siglo-xxi-y-el-septiembre-mas-lluvioso-del-siglo-xxi-y-el-.html#:~:text=El%20a%C3%B1o%20hidrol%C3%B3gico%202022%2D2023,cifrado%20en%20640%2C1%20mil%C3%ADmetros.>
34. **M. Viedma Muñoz** *Análisis de las direcciones de los vientos en Andalucía.* : Divulgameteo, 1998.
35. **F. Gassó Busquets y S. Solomando Valderrabano.** *Estructuras e instalaciones de un invernadero.* Universidad Politècnica de Catalunya ., 2011.
36. **E.J Baezo Romero, J.I Montero, J. Pérez Parra, B.J Bailey, J.C López, J.C Gázquez.** *Avances en el estudio de la ventilación natural.* : Cajamar, 2014.
37. **Instituto Geológico y Minero de España.** *Acuíferos costeros de los rios algarrobo y velez.* : IGME, 2019.
38. **Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.** *Informe del consumo alimentario de España 2022.* 2022.
39. **J. Jaramillo Noreña, V. Patricia Rodríguez, M. Guzmán, M.A. Zapata.** *El cultivo de tomate bajo invernadero..* : Centro de Investigación La Selva Rionegro, 2006.
40. **F. Camacho Ferre.** *El cultivo del tomate bajo invernadero.*: Universidad de Almería.
41. **Proain.** Injertos en plantas de tomate. [En línea] 2020. [https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/injertos-en-plantas-de-tomate.](https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/injertos-en-plantas-de-tomate)
42. **J. Reche Mármol.** *Cultivo de pimiento dulce en invernadero.* : Junta de Andalucía, 2010.
43. **Cajamar.** *Dosis de riego para los cultivos hortícolas bajo invernadero en Almería.* : Cajamar, 2005.
44. **R. López-Luque, J. Martínez, J. Reca.** *Análisis de viabilidad y gestión del riego en invernaderos mediterráneos con energía solar fotovoltaica.* : Revista Iberoamericana del Agua, 2017.
45. **Proain.** FRECUENCIA Y TIEMPOS DE RIEGO PARA LOS CULTIVOS AGRÍCOLAS. [En línea] 2020. [https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/frecuencia-y-tiempos-de-riego-para-los-cultivos-agricolas.](https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/frecuencia-y-tiempos-de-riego-para-los-cultivos-agricolas)
46. **Aemet.** Gráfica y datos de temperatura para Algarrobo. [En línea] [https://datosclima.es/Aemethistorico/Tempestad.php.](https://datosclima.es/Aemethistorico/Tempestad.php)
47. **PVGIS.** PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. [En línea] [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/#MR.](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR)
48. **G. López Díaz.** *Evaluación del potencial de los invernaderos hortícolas en el área de Almería para la compatibilización de la producción agrícola con la producción de energía renovable'.* : UNIVERSIDAD DE ALMERIA, 2021.

49. **Cofrico.** COP (Coeficiente de rendimiento), EER y European Seasonal Energy Efficiency Ratio. [En línea] <https://www.cofrico.com/eficiencia-energetica/cop-coeficiente-de-rendimiento-eer-y-european-seasonal-energy-efficiency-ratio/>.

50. **OCU.** Evolución del precio de la luz. [En línea] 2024. <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/informe/precio-luz>.

51. **Red Eléctrica.** PRECIO DE LA ENERGÍA EXCEDENTARIA DEL AUTOCONSUMO PARA EL MECANISMO DE COMPENSACIÓN SIMPLIFICADA (PVPC). [En línea] [https://www.esios.ree.es/es/analisis/1739?vis=1&start\\_date=01-01-2023T00%3A00&end\\_date=31-12-2023T23%3A55&geoids=&compare\\_start\\_date=01-12-2022T00%3A00&groupby=month](https://www.esios.ree.es/es/analisis/1739?vis=1&start_date=01-01-2023T00%3A00&end_date=31-12-2023T23%3A55&geoids=&compare_start_date=01-12-2022T00%3A00&groupby=month).

52. **Ecooo.** La rentabilidad de las inversiones en las plantas de Ecooo explicada paso a paso (III). [En línea] 2024. <https://eco00.es/blog/la-rentabilidad-de-las-inversiones-en-las-plantas-de-eco00-explicada-paso-a-paso-iii/#:~:text=En%20el%20anterior%20post%20de,del%203%2C97%25%20anual..>

# ANEXOS

**ANEXO 1**

**INFORME DE PVSYST PARA LA  
PROPUESTA DE RIEGO FOTOVOLTAICO**

# PVsyst - Simulation report

## Grid-Connected System

Project: Invernadero Algarrobo

Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

No 3D scene defined, no shadings

System power: 250 Wp

Algarrobo - España



Project: Invernadero Algarrobo  
Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

**PVsyst V7.4.0**

VC6, Simulation date:  
19/06/24 17:56  
with v7.4.0

**Project summary**

<b>Geographical Site</b> Algarrobo España	<b>Situation</b> Latitude 36.78 °N Longitude -4.05 °W Altitude 65 m Time zone UTC	<b>Project settings</b> Albedo 0.20
<b>Meteo data</b> Algarrobo PVGIS api TMY		

**System summary**

<b>Grid-Connected System</b>	<b>No 3D scene defined, no shadings</b>	
<b>PV Field Orientation</b> Fixed plane Tilt/Azimuth 20 / 0 °	<b>Near Shadings</b> No Shadings	<b>User's needs</b> Unlimited load (grid)
<b>System information</b> <b>PV Array</b>	<b>Inverters</b>	
Nb. of modules 1 unit Pnom total 250 Wp	Nb. of units 1 unit Pnom total 240 W Pnom ratio 1.042	

**Results summary**

Produced Energy 453.60 kWh/year	Specific production 1814 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR 84.96 %
---------------------------------	---------------------------------------	------------------------

**Table of contents**

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6
Single-line diagram	7
CO <sub>2</sub> Emission Balance	8



**Project: Invernadero Algarrobo**  
**Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS**

**PVsyst V7.4.0**

VC6, Simulation date:  
 19/06/24 17:58  
 with v7.4.0

**General parameters**

<b>Grid-Connected System</b>	<b>No 3D scene defined, no shadings</b>		
<b>PV Field Orientation</b>	<b>Sheds configuration</b>		
<b>Orientation</b>	No 3D scene defined		<b>Models used</b>
Fixed plane			Transposition                      Perez
Tilt/Azimuth	20 / 0 °		Diffuse                                Imported
			Circumsolar                        separate
<b>Horizon</b>	<b>Near Shadings</b>		<b>User's needs</b>
Free Horizon	No Shadings		Unlimited load (grid)

**PV Array Characteristics**

<b>PV module</b>		<b>Inverter</b>	
Manufacturer	Trina Solar	Manufacturer	Canadian Solar Inc.
Model	TSM-250PE05A	Model	CM-240-EC / UL1741
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	250 Wp	Unit Nom. Power	0.240 kWac
Number of PV modules	1 unit	Number of inverters	1 unit
Nominal (STC)	250 Wp	Total power	0.24 kWac
Modules	1 String x 1 In series	Operating voltage	24-35 V
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Phom ratio (DC:AC)	1.04
Pmpp	224 Wp		
U mpp	27 V		
I mpp	8.3 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	0.250 kWp	Total power	0.2 kWac
Total	1 modules	Number of inverters	1 unit
Module area	1.6 m <sup>2</sup>	Phom ratio	1.04
Cell area	1.5 m <sup>2</sup>		

**Array losses**

<b>Thermal Loss factor</b>	<b>DC wiring losses</b>	<b>Module Quality Loss</b>
Module temperature according to irradiance	Global array res.	Loss Fraction
Uc (const)	55 mΩ	-0.5 %
Uv (wind)	Loss Fraction	
20.0 W/m <sup>2</sup> K	1.5 % at STC	
0.0 W/m <sup>2</sup> K/m/s		
<b>Module mismatch losses</b>	<b>IAM loss factor</b>	
Loss Fraction	ASHRAE Param.: IAM = 1 - bo (1/cosi - 1)	
0.0 % at MPP	bo Param.	0.05



**Project: Invernadero Algarrobo**  
**Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS**

**PVsyst V7.4.0**

VC6, Simulation date:  
 19/06/24 17:58  
 with v7.4.0

**Main results**

**System Production**

Produced Energy **453.60 kWh/year**

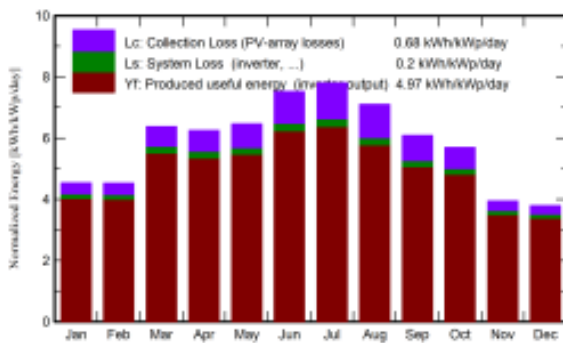
Specific production

**1814 kWh/kWp/year**

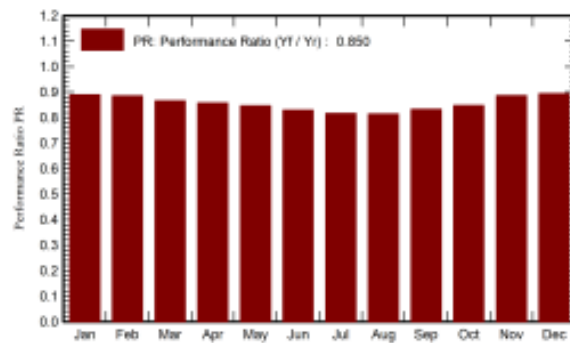
Perf. Ratio PR

**84.96 %**

**Normalized productions (per installed kWp)**



**Performance Ratio PR**



**Balances and main results**

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	94.4	24.99	11.23	140.6	136.2	32.47	31.27	0.890
February	97.7	37.96	12.41	126.7	123.2	29.14	28.04	0.885
March	165.2	48.03	12.69	197.6	192.5	44.44	42.75	0.866
April	174.8	57.27	14.21	187.4	182.4	41.79	40.16	0.857
May	199.0	72.02	17.94	200.5	195.3	44.09	42.42	0.847
June	230.7	63.83	20.72	225.6	219.7	48.67	46.79	0.830
July	243.9	60.64	23.43	242.1	236.0	51.44	49.46	0.817
August	208.9	48.64	24.21	220.1	214.8	46.60	44.82	0.814
September	160.7	52.10	22.28	182.5	177.9	39.51	38.00	0.833
October	137.7	39.35	19.54	176.4	171.7	38.84	37.39	0.848
November	85.3	33.54	13.91	118.4	114.7	27.27	26.23	0.886
December	77.8	25.55	11.89	117.6	113.7	27.30	26.28	0.894
<b>Year</b>	<b>1876.0</b>	<b>563.91</b>	<b>17.07</b>	<b>2135.5</b>	<b>2078.2</b>	<b>471.55</b>	<b>453.60</b>	<b>0.850</b>

**Legends**

- |         |  |        |   |
|---------|--|--------|---|
| GlobHor | Global horizontal irradiation                | EArray | Effective energy at the output of the array |
| DiffHor | Horizontal diffuse irradiation               | E_Grid | Energy injected into grid                   |
| T_Amb   | Ambient Temperature                          | PR     | Performance Ratio                           |
| GlobInc | Global incident in coll. plane               |        |   |
| GlobEff | Effective Global, corr. for IAM and shadings |        |   |

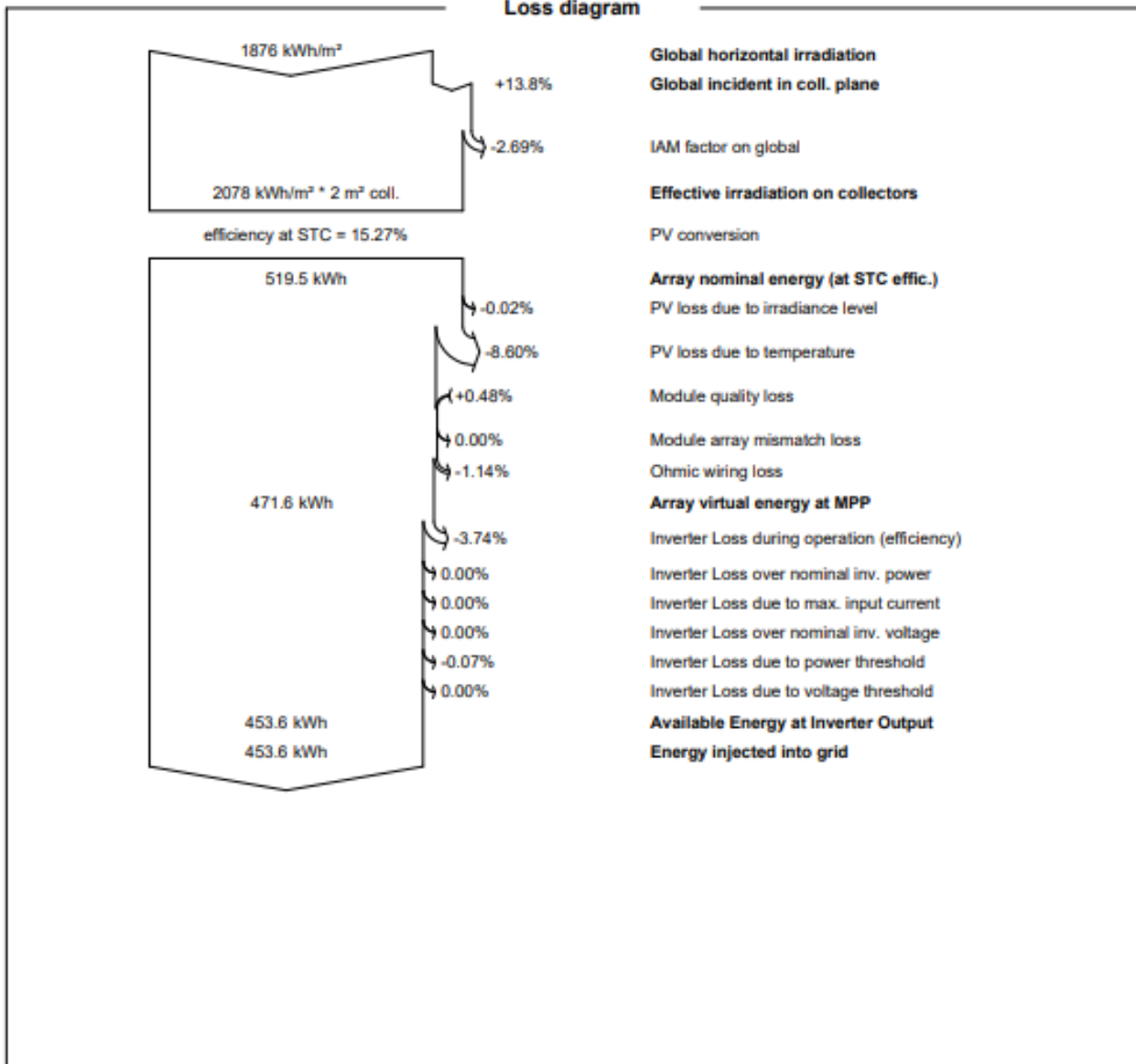


Project: Invernadero Algarrobo  
Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

**PVsyst V7.4.0**

VC6, Simulation date:  
19/06/24 17:56  
with v7.4.0

**Loss diagram**



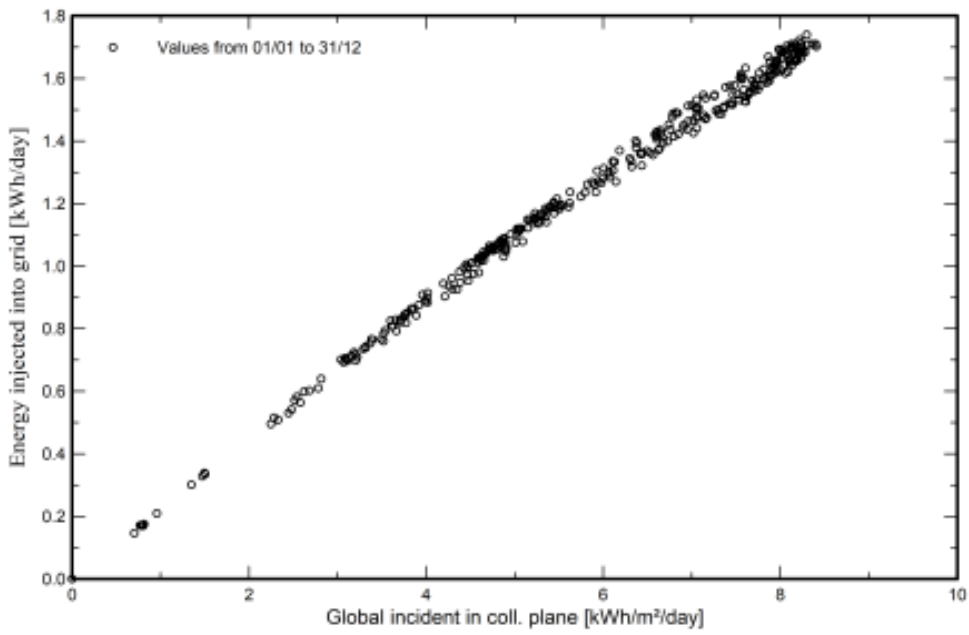


**PVsyst V7.4.0**  
VC6, Simulation date:  
19/06/24 17:58  
with v7.4.0

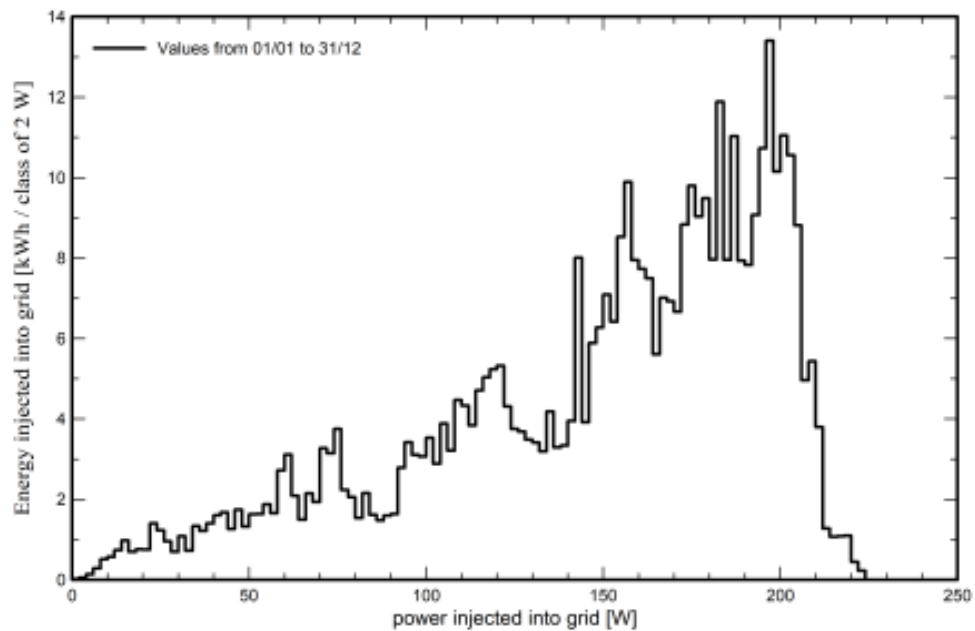
Project: Invernadero Algarrobo  
Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

Predef. graphs

Diagrama entrada/salida diaria



Distribución de potencia de salida del sistema

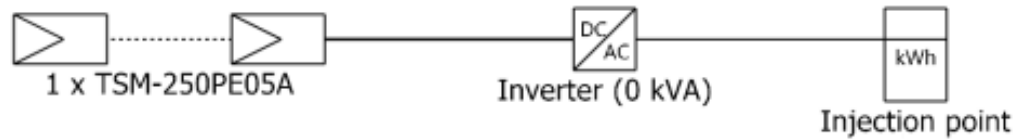




**PVsyst V7.4.0**

VC6, Simulation date:  
19/06/24 17:58  
with v7.4.0

# Single-line diagram



PV module	TSM-250PE05A
Inverter	CM-240-EC / UL1741
String	1 x TSM-250PE05A

Invernadero Algarrobo

VC6 : VALORES DE RIEGO ADECUADO  
S

19/06/24



Project: Invernadero Algarrobo  
Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

PVsyst V7.4.0

VC6, Simulation date:  
19/06/24 17:56  
with v7.4.0

CO<sub>2</sub> Emission Balance

Total: -2.1 tCO<sub>2</sub>

**Generated emissions**

Total: 2.06 tCO<sub>2</sub>

Source: Detailed calculation from table below

**Replaced Emissions**

Total: 0.0 tCO<sub>2</sub>

System production: 453.60 kWh/yr

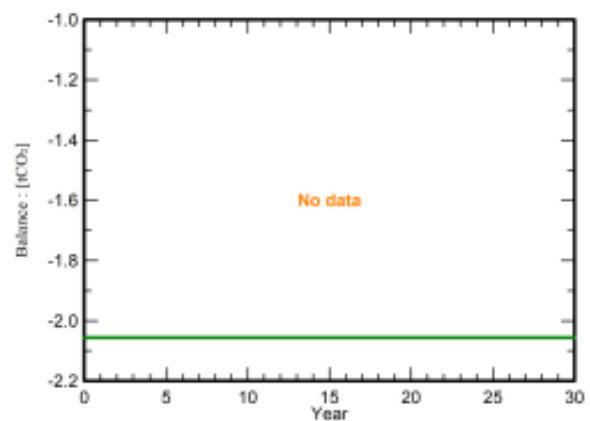
Grid Lifecycle Emissions: 0 gCO<sub>2</sub>/kWh

Source: Custom value supplied by user

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

Saved CO<sub>2</sub> Emission vs. Time



System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			<b>[kgCO<sub>2</sub>]</b>
Modules	2055 kgCO <sub>2</sub> /kWp	1.00 kWp	2055
Supports	0.01 kgCO <sub>2</sub> /kg	40.0 kg	0.27
Inverters	0.66 kgCO <sub>2</sub> /	1.00	0.66

**ANEXO 2**

**INFORME DE PVSYST PARA LA  
PROPUESTA DE BOMBA DE CALOR**

# PVsyst - Simulation report

## Grid-Connected System

Project: Invernadero Algarrobo

Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

No 3D scene defined, no shadings

System power: 96.6 kWp

Algarrobo - España



Project: Invernadero Algarrobo  
Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

**PVsyst V7.4.0**

VC6, Simulation date:  
21/06/24 09:47  
with v7.4.0

**Project summary**

<b>Geographical Site</b> Algarrobo España	<b>Situation</b> Latitude 36.78 °N Longitude -4.05 °W Altitude 65 m Time zone UTC	<b>Project settings</b> Albedo 0.20
<b>Meteo data</b> Algarrobo PVGIS api TMY		

**System summary**

<b>Grid-Connected System</b>	<b>No 3D scene defined, no shadings</b>	
<b>PV Field Orientation</b> Fixed plane Tilt/Azimuth 20 / 0 °	<b>Near Shadings</b> No Shadings	<b>User's needs</b> Unlimited load (grid)
<b>System information</b>		
<b>PV Array</b>		<b>Inverters</b>
Nb. of modules 161 units		Nb. of units 2 units
Pnom total 96.6 kWp		Pnom total 100 kWac
		Pnom ratio 0.966

**Results summary**

Produced Energy 179656 kWh/year	Specific production 1860 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR 87.09 %
---------------------------------	---------------------------------------	------------------------

**Table of contents**

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6
Single-line diagram	7
CO <sub>2</sub> Emission Balance	8



**Project: Invernadero Algarrobo**  
**Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS**

**PVsyst V7.4.0**  
 VCB, Simulation date:  
 21/06/24 09:47  
 with v7.4.0

**General parameters**

<b>Grid-Connected System</b>		<b>No 3D scene defined, no shadings</b>	
<b>PV Field Orientation</b>		<b>Sheds configuration</b>	<b>Models used</b>
<b>Orientation</b>		No 3D scene defined	Transposition      Perez
Fixed plane			Diffuse              Imported
Tilt/Azimuth	20 / 0 °		Circumsolar        separate
<b>Horizon</b>		<b>Near Shadings</b>	<b>User's needs</b>
Free Horizon		No Shadings	Unlimited load (grid)

**PV Array Characteristics**

<b>PV module</b>		<b>Inverter</b>	
Manufacturer	Trina Solar	Manufacturer	Canadian Solar Inc.
Model	TSM-DE20-600	Model	CSI-50KTL-GI
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	600 Wp	Unit Nom. Power	50.0 kWac
Number of PV modules	161 units	Number of inverters	2 units
Nominal (STC)	96.6 kWp	Total power	100 kWac
Modules	7 Strings x 23 In series	Operating voltage	200-1000 V
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Pnom ratio (DC:AC)	0.97
Pmpp	88.4 kWp	Power sharing within this inverter	
U mpp	719 V		
I mpp	123 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	97 kWp	Total power	100 kWac
Total	161 modules	Number of inverters	2 units
Module area	456 m²	Pnom ratio	0.97

**Array losses**

<b>Thermal Loss factor</b>		<b>DC wiring losses</b>		<b>Module Quality Loss</b>				
Module temperature according to irradiance		Global array res.	96 mΩ	Loss Fraction	-0.4 %			
Uc (const)	20.0 W/m²K	Loss Fraction	1.5 % at STC					
Uv (wind)	0.0 W/m²K/m/s							
<b>Module mismatch losses</b>		<b>Strings Mismatch loss</b>						
Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.2 %					
<b>IAM loss factor</b>								
Incidence effect (IAM): Fresnel, AR coating, n(glass)=1.526, n(AR)=1.290								
0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000



Project: Invernadero Algarrobo  
 Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

PVsyst V7.4.0

VC6, Simulation date:  
 21/08/24 09:47  
 with v7.4.0

Main results

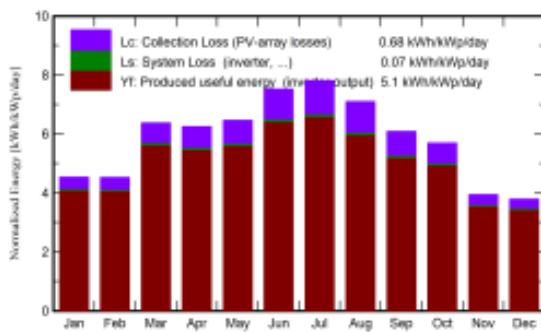
System Production

Produced Energy 179656 kWh/year

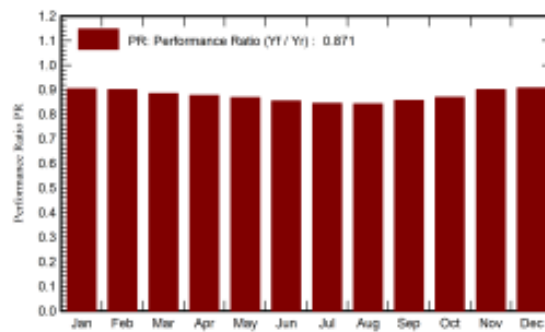
Specific production  
 Perf. Ratio PR

1860 kWh/kWp/year  
 87.09 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	94.4	24.99	11.23	140.6	137.3	12449	12276	0.904
February	97.7	37.96	12.41	126.7	124.0	11176	11017	0.900
March	165.2	48.03	12.69	197.6	193.4	17129	16886	0.885
April	174.8	57.27	14.21	187.4	183.1	16115	15876	0.877
May	199.0	72.02	17.94	200.5	196.0	17048	16806	0.868
June	230.7	63.83	20.72	225.6	220.5	18889	18616	0.854
July	243.9	60.64	23.43	242.1	237.0	20039	19750	0.844
August	208.9	48.64	24.21	220.1	215.6	18168	17910	0.842
September	160.7	52.10	22.28	182.5	178.7	15321	15102	0.856
October	137.7	39.35	19.54	176.4	172.7	15022	14814	0.869
November	85.3	33.54	13.91	118.4	115.6	10452	10301	0.901
December	77.8	25.55	11.89	117.6	114.7	10451	10302	0.907
Year	1876.0	563.91	17.07	2135.5	2088.5	182258	179656	0.871

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

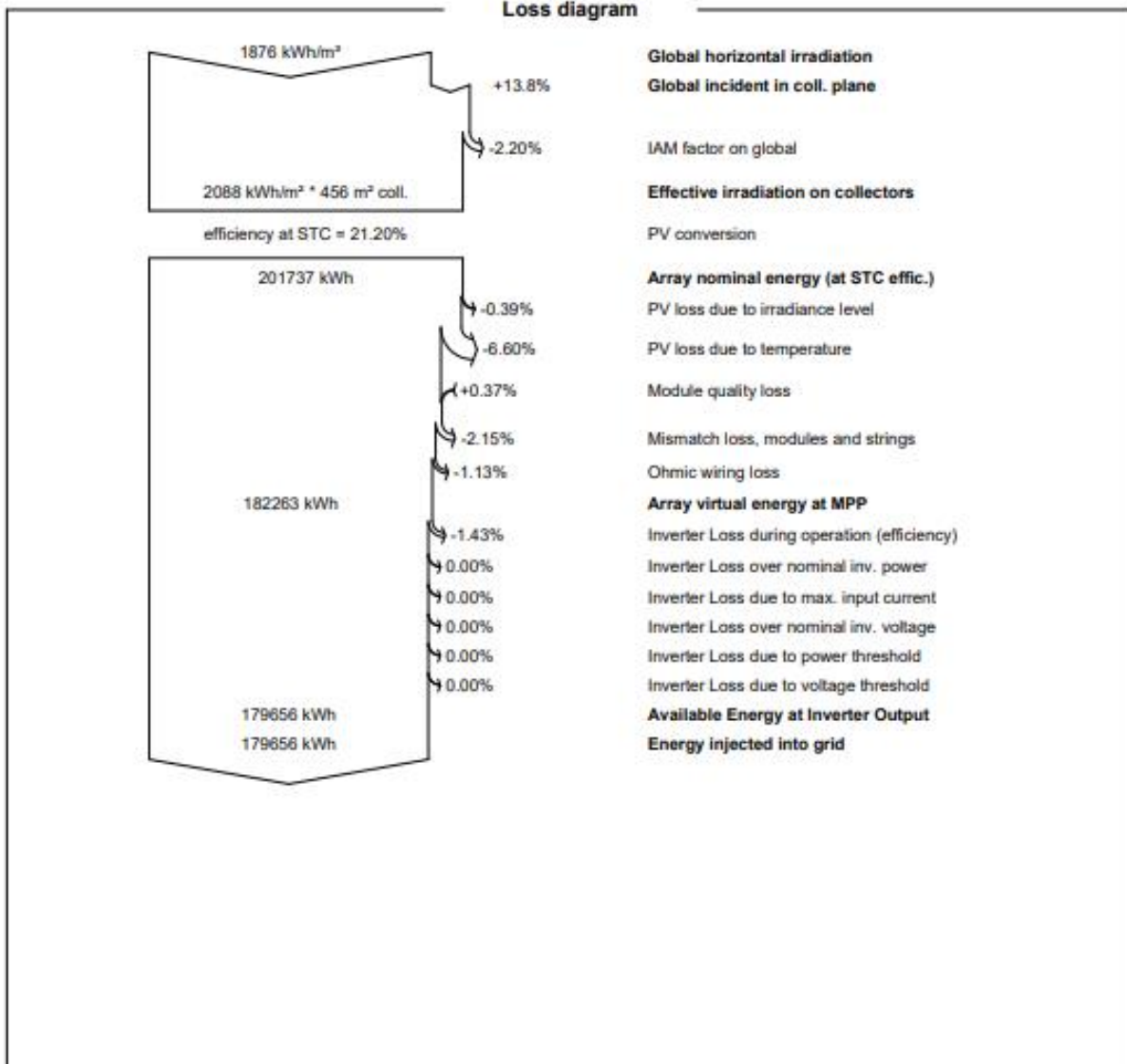


Project: Invernadero Algarrobo  
Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

PVsyst V7.4.0

VC6, Simulation date:  
21/06/24 09:47  
with v7.4.0

Loss diagram





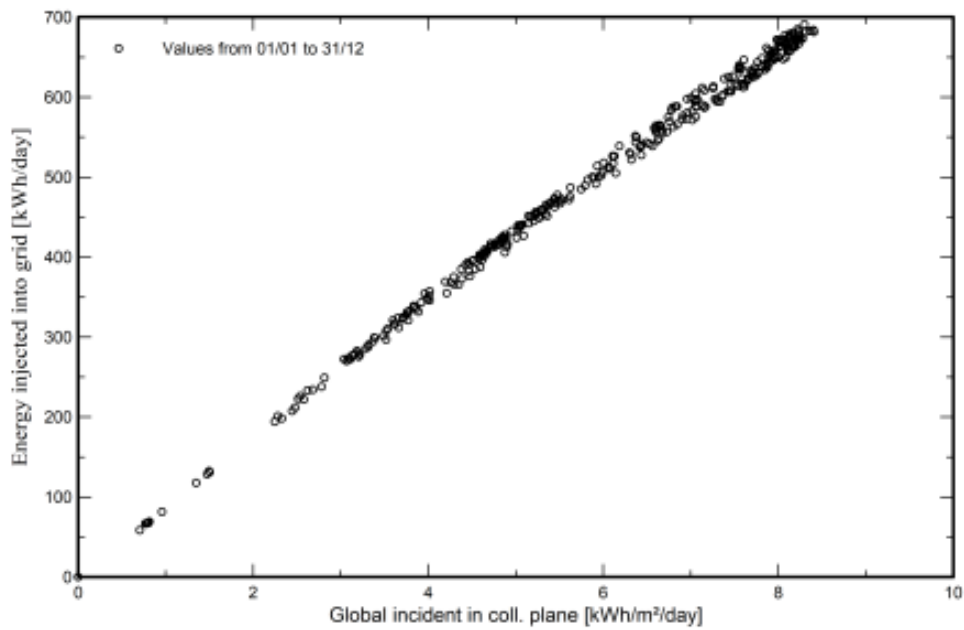
PVsyst V7.4.0

VC6, Simulation date:  
21/06/24 09:47  
with v7.4.0

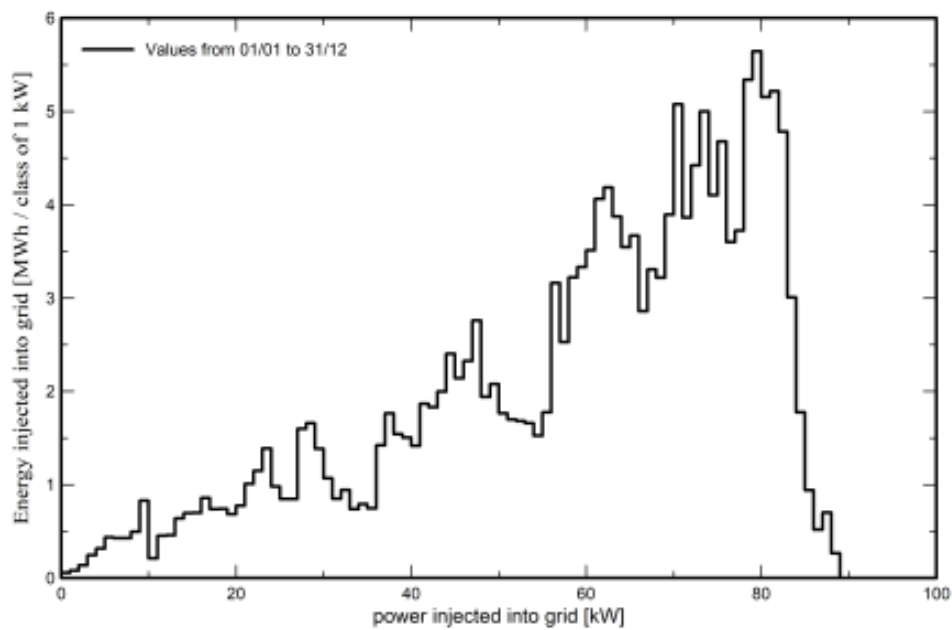
Project: Invernadero Algarrobo  
Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

Predef. graphs

Diagrama entrada/salida diaria



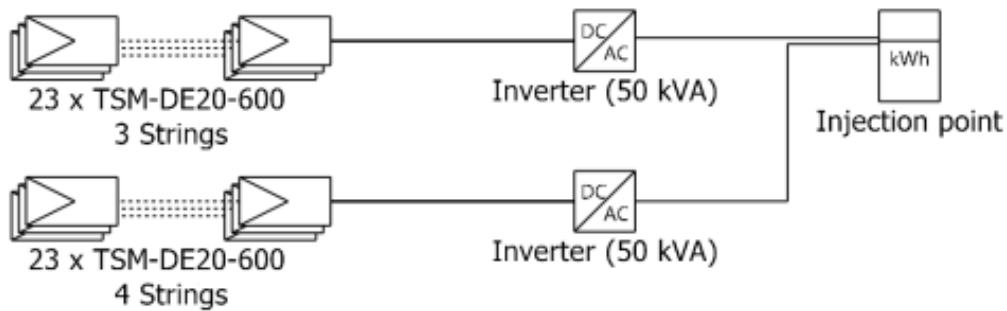
Distribución de potencia de salida del sistema





**PVoyat V7.4.0**  
VC6, Simulation date:  
21/06/24 09:47  
with v7.4.0

# Single-line diagram



PV module	TSM-DE20-600
Inverter	CSI-50KTL-GI
String	23 x TSM-DE20-600

Invernadero Algarrobo

VC6 : VALORES DE RIEGO ADECUADO  
S

21/06/24



**PVsyst V7.4.0**

VC6, Simulation date:  
21/06/24 09:47  
with v7.4.0

Project: Invernadero Algarrobo  
Variant: VALORES DE RIEGO ADECUADOS

**CO<sub>2</sub> Emission Balance**

Total: -2.1 tCO<sub>2</sub>

**Generated emissions**

Total: 2.08 tCO<sub>2</sub>

Source: Detailed calculation from table below

**Replaced Emissions**

Total: 0.0 tCO<sub>2</sub>

System production: 179.68 MWh/yr

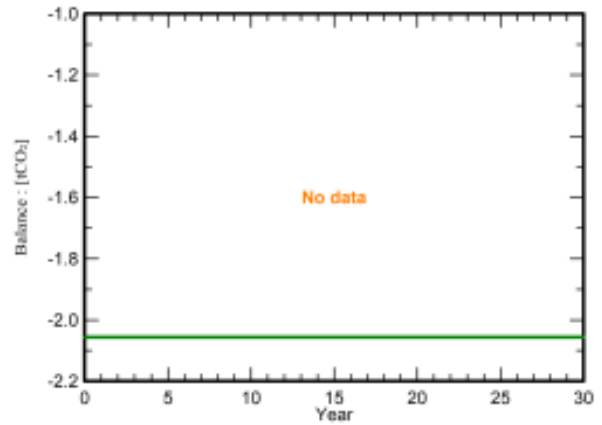
Grid Lifecycle Emissions: 0 gCO<sub>2</sub>/kWh

Source: Custom value supplied by user

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

**Saved CO<sub>2</sub> Emission vs. Time**



**System Lifecycle Emissions Details**

Item	LCE	Quantity	Subtotal [kgCO <sub>2</sub> ]
Modules	856 kgCO <sub>2</sub> /kWp	2.40 kWp	2055
Supports	0.01 kgCO <sub>2</sub> /kg	40.0 kg	0.27
Inverters	0.66 kgCO <sub>2</sub> /	1.00	0.66

# **ANEXO 3**

## **FICHAS TÉCNICAS**

**Mono**   **Multi**   **Solutions**

# THE ALLMAX<sup>M</sup> PLUS<sup>+</sup>

## FRAMED 120 HALF-CELL MODULE



### 120-Cell MONOCRYSTALLINE MODULE

### 285-320W POWER OUTPUT RANGE

### 19.3% MAXIMUM EFFICIENCY

### 0~+5W POSITIVE POWER TOLERANCE

Founded in 1997, Trina Solar is the world's leading comprehensive solutions provider for solar energy. We believe close cooperation with our partners is critical to success. Trina Solar now distributes its PV products to over 50 countries all over the world. Trina is able to provide exceptional service to each customer in each market and supplement our innovative, reliable products with the backing of Trina as a strong, bankable partner. We are committed to building strategic, mutually beneficial collaboration with installers, developers, distributors and other partners.

#### Comprehensive Products And System Certificates

IEC61215/IEC61750/UL1703/IEC61701/IEC62716  
ISO 9001: Quality Management System  
ISO 14001: Environmental Management System  
ISO14064: Greenhouse gases Emissions Verification  
OHSAS 18001: Occupation Health and Safety Management System



PRODUCTS	BACKSHEET COLOR	POWER RANGE
TSM-DD05H.08(I)	White	285-320W
TSM-DD05H.05(I)	Black	285-320W

FRAME COLOR: Black



#### Increased value

- Reduce BOS cost with high power bin
- Low thermal coefficients for greater energy production at higher temperature



#### Half-cell design brings higher efficiency

- New cell string layout and split J-box location to reduce the energy loss caused by inter-row shading
- Integrated LRF (Light Redirecting Film) to enhance power, specially for ground-mount applications (optional)
- Lower cell connection power losses due to half-cell layout (120 monocrystalline)



#### Highly reliable due to stringent quality control

- Over 30 in-house tests (UV, TC, HF etc)
- Increased module robustness to minimize micro-cracks
- PID resistant and free of snail trails
- Internal test requirement of Trina more stringent than certification authority



#### Certified to withstand the most challenging environmental conditions

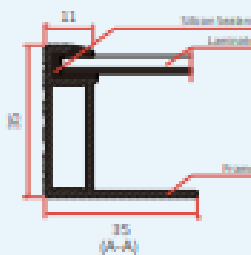
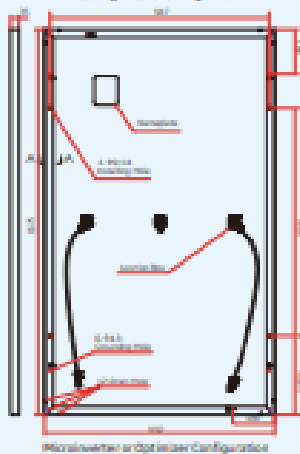
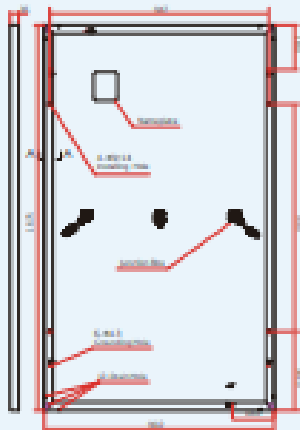
- 2400 Pa negative load
- 5400 Pa positive load

#### LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

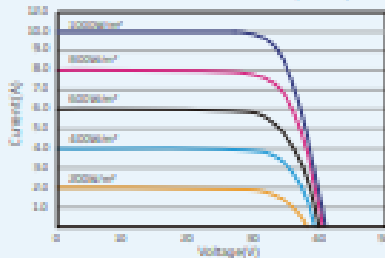
10 Year Product Warranty • 25 Year Linear Power Warranty



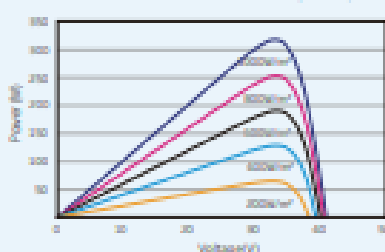
**DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)**



**I-V CURVES OF PV MODULE(315W)**



**P-V CURVES OF PV MODULE(315W)**



**ELECTRICAL DATA (STC)**

Peak Power Watts- $P_{max}$ (Wp)*	285	290	295	300	305	310	315	320
Power Output Tolerance- $P_{max}$ (W)	0 - +5							
Maximum Power Voltage- $V_{mp}$ (V)	31.6	31.9	32.1	32.4	32.6	32.9	33.1	33.3
Maximum Power Current- $I_{mp}$ (A)	9.01	9.09	9.19	9.27	9.36	9.43	9.51	9.60
Open Circuit Voltage- $V_{oc}$ (V)	38.9	39.1	39.5	39.7	40.0	40.2	40.4	40.6
Short Circuit Current- $I_{sc}$ (A)	9.45	9.55	9.65	9.70	9.75	9.83	9.93	10.00
Module Efficiency $\eta_m$ (%)	17.2	17.5	17.8	18.1	18.4	18.7	19.0	19.3

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 20°C, Air Mass AM1.5.  
\*Measuring tolerance: ±3%.

**ELECTRICAL DATA (NOCT)**

Maximum Power- $P_{max}$ (Wp)	212	216	220	224	228	231	235	238
Maximum Power Voltage- $V_{mp}$ (V)	29.6	29.8	30.0	30.3	30.6	30.8	30.9	31.2
Maximum Power Current- $I_{mp}$ (A)	7.17	7.26	7.32	7.39	7.44	7.51	7.58	7.64
Open Circuit Voltage- $V_{oc}$ (V)	36.3	36.5	36.8	37.0	37.3	37.5	37.6	37.8
Short Circuit Current- $I_{sc}$ (A)	7.63	7.71	7.79	7.83	7.87	7.94	8.02	8.08

NOCT: Irradiance at 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

**MECHANICAL DATA**

Solar Cells	Monocrystalline 156.75 × 78.375 mm (6.17 × 3.09 inches)
Cell Orientation	120 cells (6 × 20)
Module Dimensions	1675 × 992 × 35 mm (65.94 × 39.06 × 1.38 inches)
Weight	18.8 kg (41.4 lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches)
Encapsulant Material	EVA
Backsheet	White (DD05H.08(II)); Black (DD05H.05(II))
Frame	35 mm (1.38 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm <sub>2</sub> (0.006 inches <sub>2</sub> ), Portrait: N 140mm/P 285mm(5.51/11.22inches) Landscape: N 1200 mm /P 1200 mm (47.24/47.24 inches)
Connector	MC4

**TEMPERATURE RATINGS**

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	44°C (±2°C)
Temperature Coefficient of $P_{max}$	-0.37%/°C
Temperature Coefficient of $V_{oc}$	-0.29%/°C
Temperature Coefficient of $I_{sc}$	0.05%/°C

**MAXIMUM RATINGS**

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1000V DC (IEC) 1000V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	20A

(DO NOT connect Fuse-in-Combiner Box with two or more strings in parallel connection)

**WARRANTY**

- 10 year Product Workmanship Warranty
- 25 year Linear Power Warranty

(Please refer to product warranty for details)

**PACKAGING CONFIGURATION**

- Modules per box: 30 pieces
- Modules per 40' container: 780 pieces

# Vertex

BACKSHEET MONOCRYSTALLINE MODULE

PRODUCT: TSM-DE20

PRODUCT RANGE: 585-605W

**605W**

MAXIMUM POWER OUTPUT

**0~+5W**

POSITIVE POWER TOLERANCE

**21.4%**

MAXIMUM EFFICIENCY



### High customer value

- Lower LCOE (Levelized Cost Of Energy), reduced BOS (Balance of System) cost, shorter payback time
- Lowest guaranteed first year and annual degradation;
- Designed for compatibility with existing mainstream system components



### High power up to 605W

- Up to 21.4% module efficiency with high density interconnect technology
- Multi-busbar technology for better light trapping effect, lower series resistance and improved current collection



### High reliability

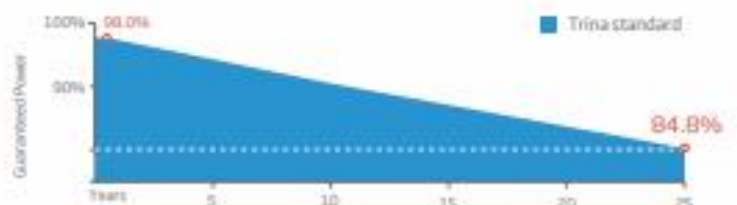
- Minimized micro-cracks with innovative non-destructive cutting technology
- Ensured PID resistance through cell process and module material control
- Resistant to harsh environments such as salt, ammonia, sand
- Mechanical performance up to 5400 Pa positive load and 2400 Pa negative load



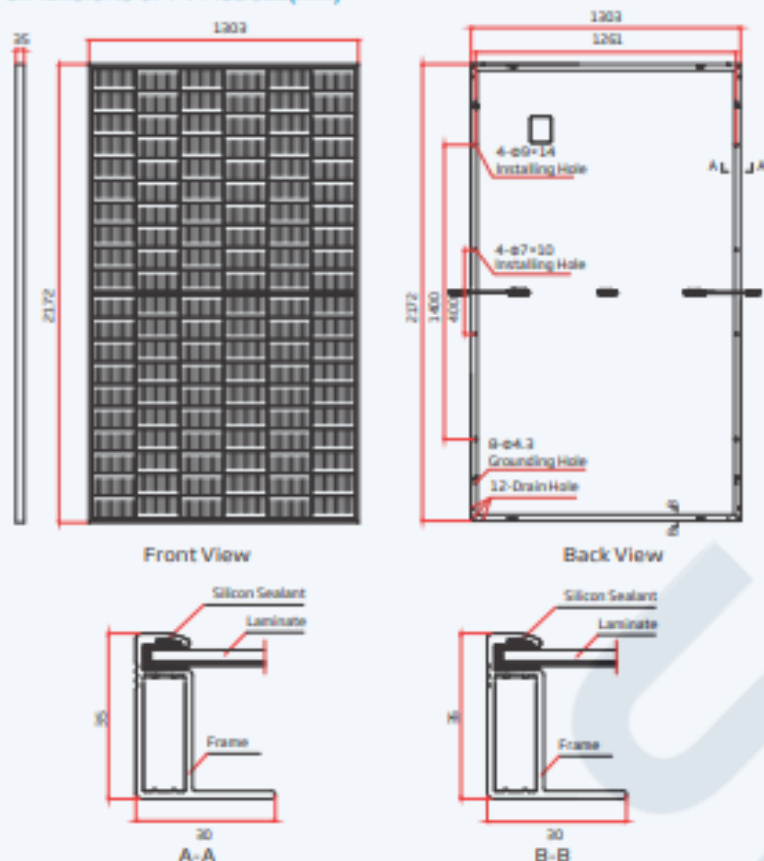
### High energy yield

- Excellent IAM (Incident Angle Modifier) and low irradiation performance, validated by 3rd party certifications
- The unique design provides optimized energy production under inter-row shading conditions
- Lower temperature coefficient (-0.34%) and operating temperature

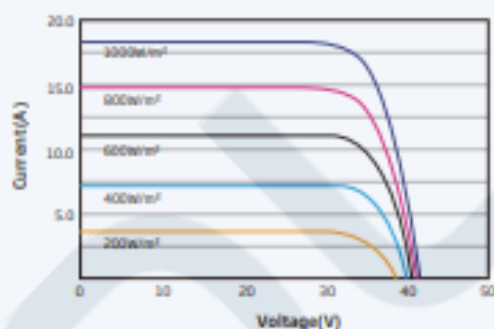
### Trina Solar's Backsheet Performance Warranty



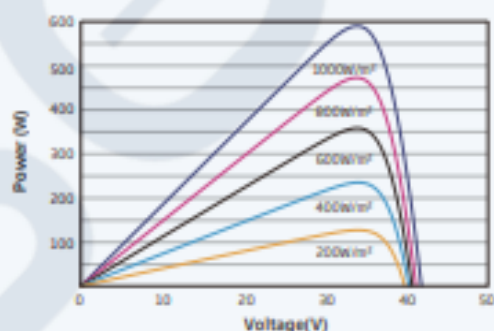
## DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



## I-V CURVES OF PV MODULE(595 W)



## P-V CURVES OF PV MODULE(595W)



## ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts- $P_{max}$ (Wp)*	585	590	595	600	605
Power Tolerance- $P_{max}$ (W)	0 ~ +5				
Maximum Power Voltage- $V_{mp}$ (V)	33.8	34.0	34.2	34.4	34.6
Maximum Power Current- $I_{mp}$ (A)	17.31	17.35	17.40	17.44	17.49
Open Circuit Voltage- $V_{oc}$ (V)	40.9	41.1	41.3	41.5	41.7
Short Circuit Current- $I_{sc}$ (A)	18.37	18.42	18.47	18.52	18.57
Module Efficiency- $\eta_m$ (%)	20.7	20.8	21.0	21.2	21.4

STC Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. \*Measuring tolerance ±3%

## ELECTRICAL DATA (NOCT)

Maximum Power- $P_{max}$ (Wp)	443	447	451	454	458
Maximum Power Voltage- $V_{mp}$ (V)	32.5	31.7	31.9	32.0	32.2
Maximum Power Current- $I_{mp}$ (A)	14.05	14.09	14.13	14.18	14.22
Open Circuit Voltage- $V_{oc}$ (V)	38.5	38.7	38.9	39.1	39.3
Short Circuit Current- $I_{sc}$ (A)	14.81	14.85	14.88	14.92	14.96

NOCT Irradiance at 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 25°C, Wind Speed 1m/s.

## MECHANICAL DATA

Solar Cells	Monocrystalline
No. of cells	120 cells
Module Dimensions	2172*1302*35 mm (85.51*51.30*1.38 inches)
Weight	30.9 kg (68.1 lb)
Glass	3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, All Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant material	EVA/POE
Backsheet	White
Frame	35mm(1.38 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm <sup>2</sup> (0.006 inches <sup>2</sup> ), Portrait: 280/280 mm(11.02/11.02 inches) Length can be customized
Connector	MC4 EVO2 / TSA*

\*Please refer to regional datasheet for specified connector.

## TEMPERATURE RATINGS

NOCT(Nominal Operating Cell Temperature)	43°C (12°C)
Temperature Coefficient of $P_{max}$	-0.34%/°C
Temperature Coefficient of $V_{oc}$	-0.25%/°C
Temperature Coefficient of $I_{sc}$	0.04%/°C

## MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
	1500V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	30A

## WARRANTY

12 year Product Workmanship Warranty  
25 year Power Warranty  
2% first year degradation  
0.55% Annual Power Attenuation

(Please refer to product warranty for details)

## PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 31 pieces  
Modules per 40' container: 558 pieces

Manufacturer: Canadian Solar

Model #: CM-240-EC

Rated Maximum Continuous Output Power: 240.00 W

Night Tare Loss: 0.03 W

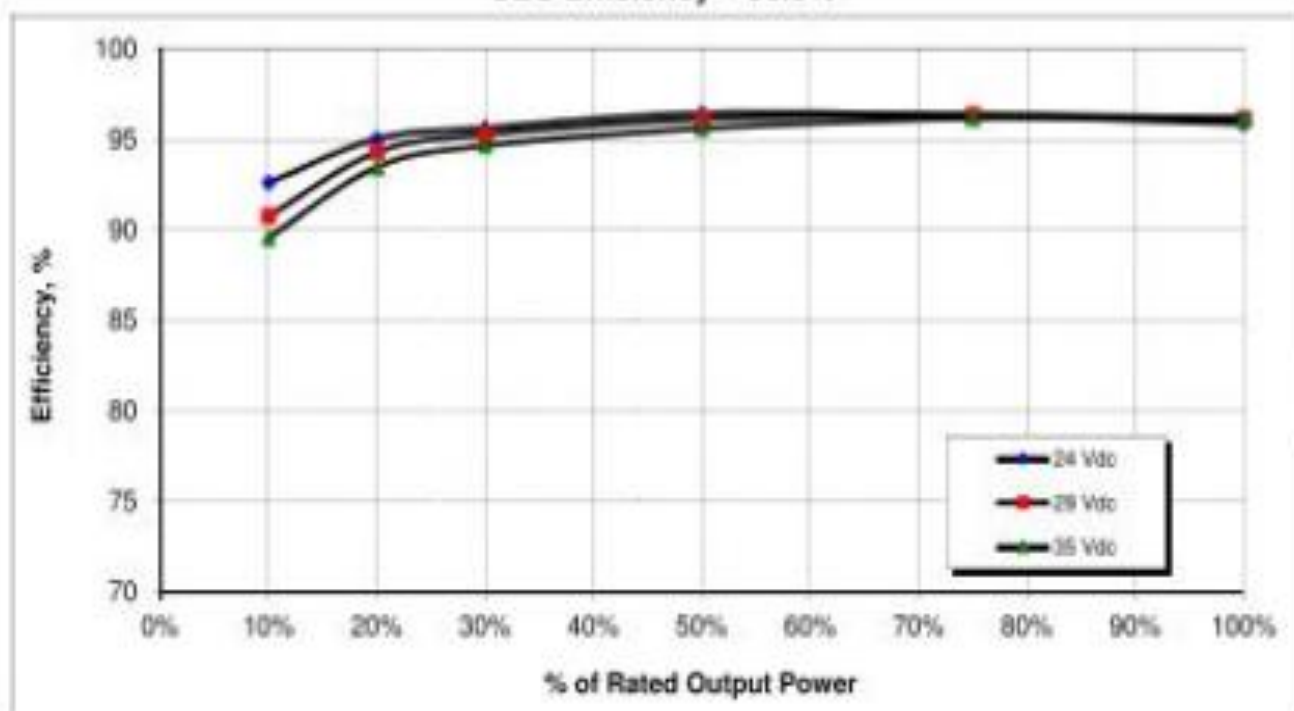
Vmin: 24 Vdc

Vnom: 29 Vdc

Vmax: 35 Vdc

Input Voltage (Vdc)	Power Level (%; kW)						Wtd
	10%	20%	30%	50%	75%	100%	
Vmin 24	92.6	95.0	95.6	96.4	96.3	95.9	96.0
Vnom 29	90.7	94.3	95.3	96.1	96.4	96.2	95.8
Vmax 35	89.6	93.5	94.7	95.6	96.2	96.2	95.5

**CEC Efficiency = 96.0%**





## THREE PHASE STRING INVERTER 40-50 KW

### CSI-40KTL-GI-FL | CSI-50KTL-GI

Canadian Solar's grid-tied, transformer-less string inverters help to accelerate the use of three-phase string architecture for commercial rooftop and small ground-mount applications. An NRTL approved, cost-effective alternative to central inverters, these inverters are modular design building blocks that provide high yield and enable significant BoS cost savings. They provide up to 99% conversion efficiency, a wide operating range of 200-1000 V<sub>DC</sub> and four MPPTs for maximum energy harvest.

5  
years

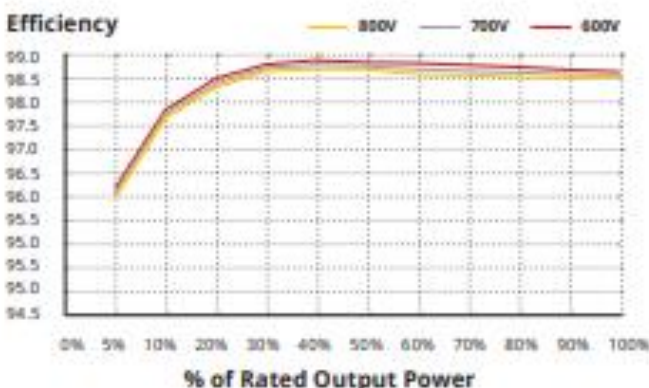
Standard warranty, extension up to 20 years

#### KEY FEATURES

- Maximum efficiency of 99%, Maximum IEC efficiency of 98.8%
- 4 MPPTs to achieve higher system efficiency
- Transformerless design
- High switching frequency and ultra fast MPPT (<5 sec.) for maximum efficiency over a wide load range

#### EFFICIENCY CURVE

CSI-50KTL-GI@380 Vac



#### HIGH RELIABILITY

- Advanced thermal design and convection cooling
- Built in over-voltage and over-current protection
- DC reverse polarity and AC short circuit protection

#### BROAD ADAPTIBILITY

- IP65 rated for outdoor application
- Utility interactive controls: Active power derating, reactive power control and over frequency derating
- Supports up to 12 DC string inputs (3 per MPPT)
- Integrated DC load rated disconnects
- Wide MPPT range for flexible string sizing

**CANADIAN SOLAR (USA), INC.** is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 25 GW deployed around the world since 2001,

<b>SYSTEM/TECHNICAL DATA</b>		
<b>MODEL NAME</b>	<b>CSI-40KTL-GI-FL</b>	<b>CSI-50KTL-GI</b>
<b>DC INPUT</b>		
Max. PV Power	48 kW (16 kW/MPPPT)	58 kW (22.5 kW/MPPPT)
Max. DC Input Voltage	1100 V <sub>DC</sub>	
Operating DC Input Voltage Range	200-1000 V <sub>DC</sub>	
Start-up DC Input Voltage/Power	200 V	
Number of MPP Trackers	4	
MPPT Voltage Range	454-850 V <sub>DC</sub>	439-850 V <sub>DC</sub>
Operating Current (Imp)	88 A (22 A per MPPPT)	114 A (28.5 A per MPPPT)
Max. Input Current (Isc)	137.2 A (34.3 A per MPPPT)	178 A (44.5 A per MPPPT)
Number of DC Inputs	8 (2 per MPPPT)	12 (3 per MPPPT)
DC Disconnection Type	Load rated DC switch	
<b>AC OUTPUT</b>		
Rated AC Output Power	40 kW	50 kW
Max. AC Output Power	44 kW	55 kW
Rated Output Voltage	380/400 V <sub>AC</sub>	
Output Voltage Range*	304-480 V <sub>AC</sub>	
Grid Connection Type	3 Ø/PE	
Nominal AC Output Current @480 Vac	60.8/58 A	76/72.2 A
Rated Output Frequency	50/60 Hz	
Output Frequency Range*	47-52/57-62 Hz	
Power Factor	1 default (±0.8 adjustable)	
Current THD	< 3 %	
<b>SYSTEM</b>		
Topology	Transformerless	
Max. Efficiency	98.8 %	98.8 %
CEC Efficiency	98.4%	98.4 %
Night Consumption	< 1 W	
<b>ENVIRONMENT</b>		
Protection Degree	IP65	
Cooling	Natural Convection Cooling	Intelligent Redundant Cooling
Operating Temperature Range	-25 ° C to +60 ° C	
Storage Temperature Range	-40 ° C to +70 ° C	
Operating Humidity	0 - 100 % condensing	
Operating Altitude	4000 m	
Audible Noise	<60 dBA @ 1 m	
<b>DISPLAY AND COMMUNICATION</b>		
Display	LCD + LED	
Communication	Standard: RS485 (Modbus)	
<b>MECHANICAL DATA</b>		
Dimensions (W / H / D)	630 x 700 x 357 mm	
Weight	61 kg	63 kg
Installation Angle	90 degrees from horizontal	
DC Inputs	MC4 compatible	
<b>SAFETY</b>		
Safety and EMC Standard	IEC62109-1A-2, AS3100, EN61000-6-1, EN61000-6-3, NB/T 32004	
Grid Standard	EN50438, G59/3, AS4777, VDE0126-1-1, IEC61727	
Smart-Grid Features	Voltage-Ride Thru, Frequency-Ride Thru, Soft-Start, Volt-Var, Frequency-Watt, Volt-Watt	

\*The "Output Voltage Range" and "Output Frequency Range" may differ according to specific grid standard.