



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL EN INVERNADEROS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Autor: Jaime Serrano Álvarez

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

Agosto de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Diseño de Sistemas de Control Ambiental en Invernaderos de Producción Agrícola

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

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



Fdo.: Jaime Serrano Álvarez

Fecha: 28 / 08 / 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Norverto Moriño

Fecha: 28 / 08 / 2025

DE NORVERTO MORIÑO
JUAN - 09746499L

Firmado digitalmente por DE NORVERTO
MORIÑO JUAN - 09746499L
Fecha: 2025.08.28 08:04:13 +02'00'



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL EN INVERNADEROS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Autor: Jaime Serrano Álvarez

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

Agosto de 2025

DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL EN INVERNADEROS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Autor: Serrano Álvarez, Jaime.

Director: Norverto Moriñigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto plantea el diseño de un sistema de control ambiental en un invernadero destinado al cultivo de pimientos, regulando variables clave como la temperatura, humedad y concentración de CO₂ apoyado de una instalación fotovoltaica. El objetivo principal es optimizar las condiciones climáticas internas para aumentar la productividad del cultivo. Se analiza la viabilidad técnica y económica, considerando costes de instalación, operación y mantenimiento. Finalmente, se evalúa la rentabilidad del proyecto en función del incremento en la producción agrícola y la sostenibilidad energética.

Palabras clave: CO₂, Temperatura, Regulación, Pimiento, Invernadero, Óptimo

1. INTRODUCCIÓN

En el escenario actual de transformación del sector agroenergético, los sistemas de control ambiental en invernaderos se presentan como una herramienta clave para mejorar la productividad agrícola, reducir costes energéticos y avanzar hacia modelos de cultivo más sostenibles. Entre las diferentes técnicas, la regulación de CO₂ destaca por su capacidad de incrementar la fotosíntesis y optimizar el rendimiento de los cultivos de pimiento en entornos controlados.

El presente trabajo se centra en el diseño y análisis de un invernadero de 1,8 hectáreas dotado de un sistema de calefacción mediante caldera de gasóleo y un apoyo energético con paneles fotovoltaicos. La caldera no solo asegura las condiciones térmicas adecuadas, sino que también permite la inyección de CO₂ en el ambiente interior para favorecer el crecimiento del cultivo.

A lo largo del proyecto se estudian aspectos técnicos y económicos, que abarcan desde el dimensionamiento de la instalación y el comportamiento de los sistemas auxiliares, hasta la evaluación del consumo energético y los costes de operación. También se incluyen consideraciones de eficiencia, así como un modelo financiero que determina la rentabilidad del proyecto en función del aumento esperado en la producción agrícola.

El objetivo fundamental es demostrar la viabilidad de integrar un sistema de calefacción con regulación de CO₂ y apoyo fotovoltaico en un invernadero, ofreciendo un marco práctico que combine innovación tecnológica y rentabilidad económica.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Este trabajo aborda el diseño y la evaluación técnica de un invernadero de pimientos de 1,8 hectáreas, equipado con un sistema de calefacción mediante caldera de gasóleo y un conjunto fotovoltaico auxiliar. El emplazamiento se ha seleccionado por sus condiciones climáticas favorables y por la disponibilidad de recursos energéticos que permiten un uso eficiente de la tecnología instalada. El sistema combina el aporte térmico necesario para mantener la temperatura con la inyección de CO₂ derivado de la combustión, lo que contribuye a mejorar la productividad agrícola.

La estructura del proyecto se organiza en tres bloques principales: la regulación de las condiciones ambientales internas (temperatura, humedad y concentración de CO₂), el suministro y gestión de la energía necesaria para mantener dichos parámetros, y la evaluación económica y de sostenibilidad del sistema. Para ello, se ha realizado una estimación de la producción esperada de cultivo, considerando el efecto del enriquecimiento carbónico y las condiciones climáticas del entorno.

En el ámbito energético, se estudia el funcionamiento de la caldera, su consumo de gasóleo y los sistemas auxiliares asociados, así como el aporte fotovoltaico al balance eléctrico.

Finalmente, se ha elaborado un modelo económico que analiza la viabilidad del proyecto a través de indicadores como el VAN y la TIR, teniendo en cuenta los costes de inversión, operación y mantenimiento. Este análisis se completa con una revisión del marco normativo vigente, tanto en materia agrícola como energética, que condiciona el desarrollo e implantación del sistema.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El proyecto se ha desarrollado combinando metodologías reconocidas en ingeniería agrícola y energética junto con diversas herramientas. Esta integración ha permitido garantizar un diseño fiable, calcular con precisión el incremento esperado en la producción de pimientos y realizar un análisis económico consistente que determine la viabilidad del sistema de climatización y regulación de CO₂.

En cuanto a la vertiente ambiental, se revisaron las normativas europeas y nacionales aplicables, especialmente las relacionadas con emisiones y eficiencia energética. Con ello se asegura que la introducción de CO₂ en el interior del invernadero se realice de manera controlada, segura y sostenible. Paralelamente, se consideraron efectos sociales y económicos asociados al empleo de tecnologías energéticamente más limpias en la actividad agrícola.

El estudio del emplazamiento se llevó a cabo utilizando bases de datos climáticas. Gracias a estas fue posible valorar la radiación solar, la humedad relativa y la temperatura media, información a partir de la cual se definieron las necesidades del sistema.

Desde el punto de vista técnico, se detallan tanto la caldera de combustión —cuyo funcionamiento aporta simultáneamente calor y CO₂ utilizable por el cultivo— como los dispositivos de humidificación. Junto a ello se dimensionó la planta solar, que permite reducir la dependencia energética externa y, por tanto, los costes de explotación.

Finalmente, el análisis financiero se construyó en hojas de cálculo, estimando indicadores clave como el VAN y la TIR. Este modelo integra la inversión inicial, los gastos de mantenimiento y operación, la durabilidad de los equipos, la evolución prevista de los precios del gasóleo y el efecto de la inflación en el valor de venta de la producción agrícola. De esta forma, se ofrece una visión global que contempla la viabilidad técnica, económica y ambiental del sistema diseñado para el invernadero.

4. RESULTADOS

El análisis financiero arroja un Valor Actual Neto (VAN) de 215.866,52 € aplicando una tasa de descuento del 6%. Este resultado evidencia que, una vez descontados los costes iniciales, el proyecto genera un valor añadido que respalda su rentabilidad dentro del periodo de estudio.

Por otro lado, la Tasa Interna de Retorno (TIR) se sitúa en el 9%, superando el 6% fijado como umbral mínimo de aceptación. Esto confirma que la inversión resulta financieramente atractiva, ya que la TIR excede la rentabilidad exigida.

En conjunto, los indicadores ponen de manifiesto que la propuesta no solo es viable desde el punto de vista técnico, sino que también presenta solidez económica, garantizando un retorno capaz de cubrir los riesgos asumidos.

5. CONCLUSIONES

El proyecto desarrollado ha permitido demostrar la viabilidad técnica y económica de un invernadero de pimientos con control ambiental avanzado y apoyo fotovoltaico en Tenerife. El sistema de calefacción mediante caldera de gasóleo, junto con la regulación de humedad y la inyección de CO₂, ofrece una mejora significativa en la productividad del cultivo. La instalación fotovoltaica contribuye a reducir los costes energéticos y la dependencia de combustibles fósiles. El análisis financiero refleja un VAN positivo y una TIR superior a la tasa de descuento, confirmando la rentabilidad del proyecto. Desde el punto de vista ambiental, se consigue un uso más eficiente de los recursos y una disminución de emisiones. En el plano social, la propuesta favorece la modernización del sector agrícola y la creación de actividad económica vinculada a la energía y la agricultura. El diseño se ha realizado conforme a la normativa vigente, asegurando su

viabilidad constructiva y operativa. Además, el proyecto integra de forma coherente los aspectos técnicos, económicos y medioambientales. En definitiva, se trata de una propuesta completa que puede servir como referencia para futuros desarrollos en agricultura tecnificada.

DESIGN OF ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEMS IN AGRICULTURAL PRODUCTION GREENHOUSES

Author: Serrano Álvarez, Jaime.

Supervisor: Norverto Moriñigo, Juan.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

Keywords: CO₂, Temperature, Regulation, Pepper, Greenhouse, Optimal

1. ABSTRACT

In the current context of transformation within the agro-energy sector, environmental control systems in greenhouses emerge as a key tool to enhance agricultural productivity, reduce energy costs, and move towards more sustainable cultivation models. Among the different techniques, CO₂ regulation stands out for its ability to increase photosynthesis and optimize the yield of pepper crops in controlled environments.

This study focuses on the design and analysis of a 1.8-hectare greenhouse equipped with a heating system powered by a diesel boiler and supported by photovoltaic panels. The boiler not only ensures suitable thermal conditions but also enables the injection of CO₂ into the internal environment to stimulate crop growth.

Throughout the project, both technical and economic aspects are examined, ranging from system sizing and the performance of auxiliary equipment to the assessment of energy consumption and operating costs. Efficiency considerations are also included, together with a financial model that evaluates the profitability of the project based on the expected increase in agricultural production.

The main objective is to demonstrate the feasibility of integrating a heating system with CO₂ regulation and photovoltaic support into a greenhouse, providing a practical framework that combines technological innovation with economic profitability.

2. PROYECT DESCRIPTION

This work addresses the design and technical evaluation of a 1.8-hectare pepper greenhouse, equipped with a heating system powered by a diesel boiler and supported by an auxiliary photovoltaic installation. The site was chosen for its favorable climatic conditions and the availability of energy resources that allow efficient use of the installed technology. The system combines the thermal input required to maintain optimal temperature with the injection of CO₂ derived from combustion, which contributes to improving agricultural productivity.

The project is structured into three main areas: the regulation of internal environmental conditions (temperature, humidity, and CO₂ concentration), the supply and management

of the energy required to sustain these parameters, and the economic and sustainability assessment of the system. To this end, an estimation of the expected crop yield was carried out, considering both the effect of CO₂ enrichment and the local climatic conditions.

From an energy perspective, the study analyzes the operation of the boiler, its diesel consumption, and the associated auxiliary systems, as well as the photovoltaic contribution to the electrical balance.

Finally, an economic model was developed to evaluate the feasibility of the project using indicators such as Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR), taking into account investment, operation, and maintenance costs. This analysis is complemented by a review of the current regulatory framework, both agricultural and energy-related, which conditions the development and implementation of the system.

3. METHODOLOGY DESCRIPTION

The project was developed by combining well-established methodologies in agricultural and energy engineering with a range of specialized tools. This approach ensured a reliable design, enabled precise estimation of the expected increase in pepper production, and allowed for a consistent economic analysis to determine the feasibility of the climate control and CO₂ regulation system.

On the environmental side, both European and national regulations were reviewed, particularly those related to emissions and energy efficiency. This guarantees that CO₂ injection inside the greenhouse is carried out in a safe, controlled, and sustainable manner. At the same time, social and economic impacts linked to the use of cleaner energy technologies in agriculture were also considered.

The site study was conducted using climatic databases, which provided key information on solar radiation, relative humidity, and average temperature. These data served as the basis for defining the system's requirements.

From a technical standpoint, the project details the diesel boiler—which simultaneously provides heat and usable CO₂ for the crop—along with the humidification devices. In addition, a photovoltaic plant was sized to reduce external energy dependence and, consequently, operating costs.

Finally, the financial analysis was carried out using spreadsheet models, estimating key indicators such as Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR). This model integrates the initial investment, operation and maintenance expenses, equipment lifespan, the projected evolution of diesel prices, and the effect of inflation on agricultural product sales. As a result, the project provides a comprehensive view of the technical, economic, and environmental feasibility of the greenhouse system.

4. RESULTS

The financial analysis yields a Net Present Value (NPV) of €215,866.52 when applying a 6% discount rate. This outcome shows that, after accounting for initial costs, the project generates added value that supports its profitability within the analyzed timeframe.

Meanwhile, the Internal Rate of Return (IRR) reaches 9%, exceeding the 6% minimum threshold established. This indicates that the investment is financially attractive, as the IRR surpasses the required rate of return.

Overall, the indicators demonstrate that the proposal is not only technically feasible but also economically sound, ensuring returns sufficient to cover the risks involved.

5. CONCLUSIONS

The project carried out has demonstrated the technical and economic feasibility of a pepper greenhouse with advanced environmental control and photovoltaic support in Tenerife. The heating system powered by a diesel boiler, combined with humidity regulation and CO₂ injection, provides a significant improvement in crop productivity. The photovoltaic installation helps reduce energy costs and dependence on fossil fuels. The financial analysis shows a positive NPV and an IRR above the discount rate, confirming the profitability of the project. From an environmental perspective, the system ensures more efficient use of resources and a reduction in emissions. Socially, the proposal supports the modernization of the agricultural sector and the creation of economic activity linked to both energy and farming. The design has been developed in accordance with current regulations, ensuring its constructive and operational feasibility. Furthermore, the project integrates technical, economic, and environmental aspects in a coherent manner. Ultimately, it represents a comprehensive proposal that may serve as a reference for future developments in high-tech agriculture.

ÍNDICE DEL TRABAJO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	22
1.1 MOTIVACIÓN	22
1.2 OBJETIVOS	24
1.3 ESTADO DE LA CUESTIÓN	25
1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO	26
1.5 INTRODUCCIÓN A LA FOTOVOLTAICA	28
1.5.1 EFECTO FOTOVOLTAICO	28
1.5.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	30
1.5.3 IRRADIANCIA E IRRADIACIÓN EN ESPAÑA	31
1.5.4 AGROVOLTAICA	33
1.6 INTRODUCCIÓN A LA REGULACIÓN DE CO ₂	33
1.6.1 CO ₂ EN LA AGRICULTURA	33
1.6.2 ORIGEN DE LA REGULACIÓN	34
CAPÍTULO 2. ODS E IMPACTO	35
2.1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	35
2.2 IMPACTO	37
2.2.1 MEDIOAMBIENTAL	37
2.2.2 SOCIAL	38
CAPÍTULO 3. TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR	40
3.1 TEORÍA DEL ESTUDIO AGRÍCOLA	40
3.1.1 FUNCIONAMIENTO DE UN INVERNADERO Y NECESIDADES PARA CORRECTO FUNCIONAMIENTO	40
3.1.2 VENTAJAS DE LOS INVERNADEROS	41
3.1.3 ZONAS CON MAYOR CONCENTRACIÓN DE INVERNADEROS	42
3.1.4 CULTIVOS MÁS FRECUENTES EN INVERNADEROS EN ESPAÑA	43
3.1.5 CONDICIONES DESEADAS PARA CADA CULTIVO	46
3.2 TEORÍA DE LOS ELEMENTOS DE REGULACIÓN	48

ÍNDICE

3.2.1	UTILIDAD DE LOS ELEMENTOS REGULATORIOS	48
3.2.2	TECNOLOGÍAS MÁS FRECUENTES.....	49
3.3	TEORÍA DEL ESTUDIO ELÉCTRICO.....	55
3.3.1	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	55
3.3.2	INVERSORES	57
CAPÍTULO 4. INVERNADERO TIPO		59
4.1	EMPLAZAMIENTO	59
4.1.1	CRITERIOS DE ELECCIÓN.....	59
4.1.2	UBICACIÓN ELEGIDA.....	60
4.2	CULTIVO	61
4.2.1	CRITERIOS DE ELECCIÓN.....	61
4.2.2	CULTIVO ELEGIDO	62
4.3	MODELO.....	63
4.3.1	TIPO DE INVERNADERO	63
4.3.2	TAMAÑO	64
4.3.3	MATERIAL	64
CAPÍTULO 5. NORMATIVA		65
5.1	GENERAL	65
5.1.1	ESTATAL.....	65
5.1.2	AUTONÓMICA Y MUNICIPAL	65
5.2	AGRARIA E INVERNADEROS	66
5.3	INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y FOTOVOLTAICA	66
5.4	CONTROL AMBIENTAL Y CO2	67
CAPÍTULO 6. INSTALACIÓN AMBIENTAL		68
6.1	CONDICIONES AMBIENTALES LOCALES.....	68
6.2	CONDICIONES IDEALES PARA EL CULTIVO.....	70
6.2.1	EFEECTO DEL CO2 EN EL CULTIVO	70
6.2.2	EFEECTO DE LA TEMPERATURA EN EL CULTIVO	71
6.2.3	EFEECTO DE LA HUMEDAD EN EL CULTIVO	73
6.3	SELECCIÓN DE ELEMENTOS.....	74

ÍNDICE

6.3.1	CALEFACCIÓN	74
6.3.2	REFRIGERACIÓN	83
6.3.3	CO2	85
6.3.4	HUMEDAD	99
CAPÍTULO 7. INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA		104
7.3	RADIACIÓN SOLAR LOCAL	104
7.3	REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS	105
7.3	SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS ELÉCTRICOS	105
7.3.1	SELECCIÓN DE MÓDULOS	105
7.3.2	SELECCIÓN DE INVERSORES	108
CAPÍTULO 8. VIABILIDAD DEL PROYECTO		111
8.1	PRESUPUESTO DE LA INSTALACIÓN	111
8.2	VIABILIDAD ECONÓMICA	113
8.2.1	PRODUCCIÓN	113
8.2.2	OPEX	114
8.2.3	RESULTADOS	115
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES		118
CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFÍA		120

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Evolución de la población y PIBpc expresado en miles de habitantes. Fuente: Montaña Sanz B, (2019)	22
Ilustración 2. Incremento en la temperatura global. Fuente: EPData (2024).....	23
Ilustración 3. Primer panel solar. Fuente: Solarplak (2023).	28
Ilustración 4. Efecto fotovoltaico. Fuente: Panel Power (2025).....	29
Ilustración 5. Componentes de un panel solar. Fuente: Panel Power (2025).....	31
Ilustración 6. Irradiancia global media. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2012).....	32
Ilustración 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Naciones Unidas (2025).....	36
Ilustración 8. Evolución del balance de comercio exterior de los principales cultivos en invernaderos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)	46
Ilustración 9. Ritmo relativo de fotosíntesis en relación a la concentración de CO ₂ . Fuente: Nutricontrol (2020).	47
Ilustración 10. Calefacción por agua caliente. Fuente: ULMA Agrícola (2015).....	50
Ilustración 11. . Calefacción por aire caliente. Fuente: ULMA Agrícola (2015).	50
Ilustración 12. Calefacción por suelo radiante. Fuente: Novagric (2024).	51
Ilustración 13. Fogger. Fuente: Novagric (2024).....	52
Ilustración 14. Deshumidificador. Fuente: DryGair (2024).	52
Ilustración 15. Generador de CO ₂ . Fuente: Calcán Green (2025).	53
Ilustración 16. Caldera de combustión. Fuente: ULMA Agrícola (2015).	54
Ilustración 17. Tanque de CO ₂ . Fuente: Asco Carbon Dioxide (2025).....	54
Ilustración 18. Módulos monocristalinos y policristalinos. Fuente: Mipanel Solar (2025).56	
Ilustración 19. Funcionalidad de inversores. Fuente: Fotovoltaica Solar (2025).	58
Ilustración 20. Potencial eléctrico fotovoltaico. Fuente: GlobalSolarAtlas (2024).	61
Ilustración 21. Estructura raspa y amagado. Fuente: Infoagro (n.d.).....	63
Ilustración 22. Temperaturas en Tenerife. Fuente: WeatherSpark (2025).....	68
Ilustración 23. Concentración de CO ₂ en Izaña, Tenerife. Fuente: AEMET (2025).	69
Ilustración 24. Reducción en la producción de fruto con respecto a la temperatura. Fuente: Rosmaina & Zulfahmi (2022).	72
Ilustración 25. Velocidad del viento media diaria. Fuente: WeatherSpark (2025).	76
Ilustración 26. Caldera EUROMAX S. Fuente: YGNIS (2025).	77
Ilustración 27. Caldera EUROMAX S. Fuente: YGNIS (2025).	79
Ilustración 28. Esquema de quemador. Fuente: YGNIS (2025).	80
Ilustración 29. Bomba de recirculación. Fuente: YGNIS (2025).	82
Ilustración 30. Mallas de sombreado MALBL24005. Fuente: MACOGLASS (2025).....	84
Ilustración 31. Ciclón MXCCZ-027. Fuente: VENTDEPOT (2025).....	97
Ilustración 32. Deshumidificador DG-6 50Hz Estándar. Fuente: DryGair (2025).	101

ÍNDICE

Ilustración 33. Deshumidificador DG-6 50Hz Estándar. Fuente: DryGair (2025).	102
Ilustración 34. Energía solar diaria por metro cuadrado en Tenerife. Fuente: WeatherSpark (2025).	104
Ilustración 35. Módulos LR5-66HIH-500. Fuente: Longi Solar (2025).	106
Ilustración 36. Inversor SUN2000 -4KTL-M1. Fuente: Huawei (2025).	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución temporal del trabajo. Fuente: Elaboración propia	27
Tabla 2. Superficie ocupada por invernaderos por CCAA. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)	42
Tabla 3. Producción de invernaderos por CCAA. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)	43
Tabla 4. Superficie ocupada por los principales cultivos en invernaderos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)	44
Tabla 5. Producción de los principales cultivos en invernaderos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)	45
Tabla 6. Exportaciones en volumen de los principales cultivos en invernaderos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)	45
Tabla 7. Condiciones requeridas para distintos cultivos. Fuente: Ruiz-Celma, Salmerón, Pulido-Granado, y Mera-Bravo (2022).	47
Tabla 8. <i>Comparativa de módulos monocristalinos y policristalinos. Fuente: EnergySage (2025).</i>	56
Tabla 9. Temperaturas medias en España en verano de 2022. Fuente: EPData (2025).....	60
Tabla 10. Temperaturas en Tenerife. Fuente: WeatherSpark (2025).....	68
Tabla 11. Humedad relativa media en Tenerife. Fuente: Climate-Data (2022).....	69
Tabla 12. Coeficiente de pérdidas con viento a n m/s. Fuente: ASAE (2000).....	76
Tabla 13. Velocidad del viento media mensual. Fuente: WeatherSpark (2025).	76
Tabla 14. Especificaciones técnicas EUROMAX S. Fuente: YGNIS (2025)	78
Tabla 15. Presión de vapor del agua líquida.....	79
Tabla 16. Especificaciones técnicas del quemador. Fuente: YGNIS (2025).....	81
Tabla 17. Accesorios para EUROMAX S. Fuente: YGNIS (2025).....	81
Tabla 18. Reacción a varios niveles de sombreado. Fuente: Kesumawati & Rahmawati (2020).....	83
Tabla 19. Especificaciones de las mallas MALBL24005. Fuente: MACOGLASS (2025).....	85
Tabla 20. Características técnicas de MXCCZ-027. Fuente: VENTDEPOT (2025).....	98
Tabla 21. Características técnicas de DG-6 50Hz Estándar. Fuente: DryGair (2025)	102
Tabla 22. Características eléctricas módulos LR5-66HIH-500. Fuente: Longi Solar (2025).	106
Tabla 23. Características térmicas módulos LR5-66HIH-500. Fuente: Longi Solar (2025).	107
Tabla 24. Características técnicas del inversor SUN2000 -4KTL-M1. Fuente: Huawei (2025).....	109
Tabla 25. Presupuesto final. Fuente: Elaboración propia.	112

ÍNDICE

Tabla 26. Resultados financieros. Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 27. <i>Resultados financieros. Fuente: Elaboración propia.</i>	117

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En la actualidad, se presenta una necesidad evidente de mejorar la eficiencia en la producción agrícola al mismo tiempo que se disminuye el impacto ambiental, constituyendo este uno de los principales desafíos del siglo XXI. En un entorno global definido por la escasez de recursos naturales y el crecimiento continuo de la población, resulta evidente la urgencia de desarrollar tecnologías sostenibles que permitan un uso más eficiente de dichos recursos. Este trabajo responde precisamente a esa necesidad, proponiendo un sistema innovador para el control ambiental en invernaderos acompañado de la integración de energías renovables.

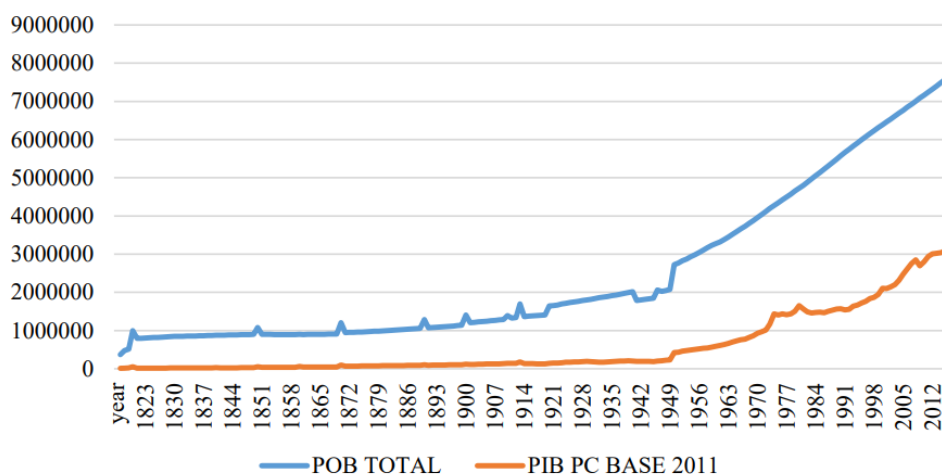


Ilustración 1. Evolución de la población y PIBpc expresado en miles de habitantes. Fuente: Montañó Sanz B, (2019)

Hoy en día, el cambio climático representa uno de los mayores riesgos para la agricultura, ya que provoca aumentos de temperatura, irregularidades en las precipitaciones y una mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos.

INTRODUCCIÓN

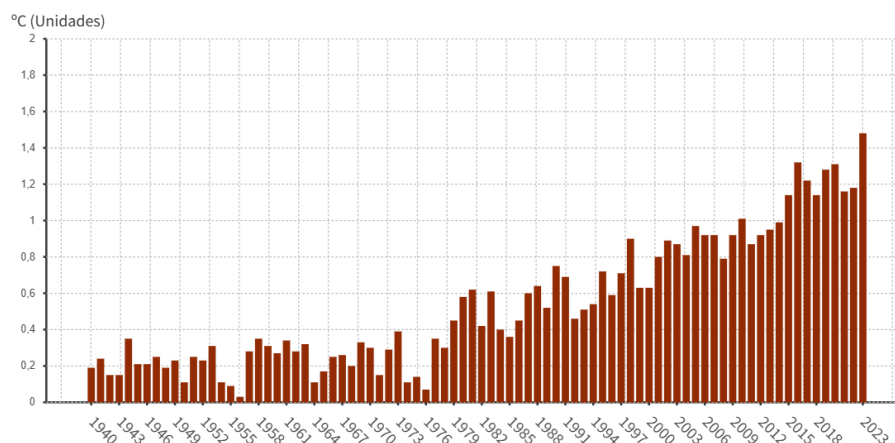


Ilustración 2. Incremento en la temperatura global. Fuente: EPData (2024)

Estas condiciones afectan negativamente a los cultivos y, en consecuencia, ponen en peligro la seguridad alimentaria mundial. Aunque los invernaderos permiten paliar en parte estos efectos al ofrecer un mayor control sobre el entorno de cultivo, en muchos casos este control se logra mediante el uso de fuentes de energía convencionales que incrementan las emisiones de CO₂, agravando así los mismos problemas que se busca evitar. Por ello, incorporar fuentes de energía renovable no solo reducirá el impacto ambiental, sino que también mejorará la eficiencia económica a largo plazo. El uso de paneles solares permitirá disminuir la dependencia energética externa y los costes asociados, facilitando a su vez la transición hacia un modelo agrovoltaico más resistente frente a los desafíos climáticos.

Además, el aumento continuo de la población mundial somete al sector agrícola a una presión creciente, lo que convierte la optimización de los recursos disponibles en una prioridad absoluta. En este sentido, la aplicación de sistemas de control ambiental permitirá establecer condiciones ideales para el desarrollo de los cultivos, incrementando su calidad y eficiencia, y reduciendo al mismo tiempo las pérdidas. Asimismo, mantener un entorno controlado donde se limita la propagación de plagas y enfermedades disminuye considerablemente la necesidad de emplear productos químicos como fertilizantes o pesticidas. Esto no solo mejora la calidad final de los productos, sino que también satisface la creciente demanda de alimentos más saludables y libres de residuos químicos.

1.2 OBJETIVOS

El primero de los objetivos de este proyecto consiste en el diseño de un sistema de control ambiental destinado a invernaderos de alto rendimiento, capaz de regular variables clave como la concentración de CO₂, la humedad, la temperatura y el uso de biocidas, con el fin de crear las condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos. La relevancia de esta propuesta radica en la necesidad de mejorar las condiciones de cultivo para incrementar la productividad agrícola y minimizar el uso innecesario de recursos naturales. El sistema pretende ajustar los niveles de CO₂ a las demandas fotosintéticas de las plantas, regular la temperatura mediante sistemas de calefacción y mantener una humedad adecuada para prevenir enfermedades y optimizar la producción de fruto.

El segundo objetivo fundamental es la incorporación de energías renovables para alimentar el sistema descrito anteriormente, concretamente a través de una instalación fotovoltaica. En la actualidad, gran parte de los invernaderos dependen de la red eléctrica convencional, lo que implica tanto un coste elevado como un impacto ambiental considerable. Para abordar esta situación, se plantea la integración de paneles solares en las estructuras de los invernaderos, buscando una sinergia entre la generación de energía y la producción agrícola, sin que esta última se vea afectada negativamente. En este contexto, se analizará el dimensionamiento óptimo del sistema fotovoltaico para satisfacer las demandas energéticas del sistema de control ambiental.

Por último, el proyecto contempla también la realización de un estudio económico y de impacto ambiental, cuyo propósito es valorar la viabilidad financiera de la propuesta y su capacidad para reducir las emisiones de CO₂, disminuyendo así la huella de carbono. Este análisis incluirá una estimación de los costes de inversión, instalación y mantenimiento, comparándolos con los beneficios obtenidos mediante el ahorro energético y el incremento en la productividad agrícola. Asimismo, se calculará la reducción efectiva de la huella de carbono antes y después de la puesta en marcha del sistema integrado.

1.3 ESTADO DE LA CUESTIÓN

Durante los últimos años, los sistemas de control ambiental en invernaderos han evolucionado notablemente gracias a la incorporación de tecnologías avanzadas como sensores, automatización y redes IoT. Estas herramientas permiten monitorizar en tiempo real variables esenciales como el CO₂, la temperatura y la humedad, lo que facilita la optimización de las condiciones ambientales para el desarrollo de los cultivos. Además, en fechas recientes, se han comenzado a aplicar sistemas de inteligencia artificial con capacidad predictiva que permiten anticiparse a las condiciones climáticas futuras y, a partir de esa información, adaptar los recursos y parámetros internos para mejorar la eficiencia y el rendimiento del sistema.

No obstante, estas soluciones tecnológicas presentan una serie de limitaciones. En primer lugar, la mayoría de estos sistemas dependen de fuentes de energía convencionales, lo cual incrementa tanto el impacto ambiental como los costes de operación. Por otro lado, suele haber una falta de integración entre los diferentes elementos que conforman el sistema, generando ineficiencias en la gestión global del invernadero. También resulta importante mencionar que los altos costes de adquisición e instalación representan una barrera económica significativa, especialmente para pequeños y medianos agricultores, lo cual dificulta la adopción generalizada de estas tecnologías.

Respecto al uso de energías renovables, en los últimos años los sistemas agrovoltaicos han emergido como una alternativa sostenible para el suministro energético de los invernaderos. Estos sistemas combinan paneles solares con estructuras agrícolas, lo que permite un uso eficiente del espacio y la generación de energía limpia. Sin embargo, al igual que las soluciones tecnológicas previamente mencionadas, las instalaciones agrovoltaicas también enfrentan desafíos como la variabilidad de la producción energética y, en los casos en que se pretende alcanzar una optimización completa del sistema, la necesidad de integrar almacenamiento energético.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para el desarrollo de este proyecto se adoptará un enfoque teórico-analítico, combinando una revisión exhaustiva de la literatura científica existente, el análisis de tecnologías actuales y una evaluación de la aplicabilidad en el diseño de un sistema de control ambiental para invernaderos de alto rendimiento con el objetivo de abordar de forma rigurosa y eficiente tanto el diseño del sistema de control ambiental como el dimensionamiento de la instalación fotovoltaica encargada de suministrarle energía. Durante todo el proceso, se procuró mantener la coherencia entre las decisiones técnicas adoptadas, la normativa aplicable y los principios de sostenibilidad y eficiencia energética.

La primera fase consistió en el análisis de las condiciones climáticas y agrícolas de distintas regiones del país, con el fin de seleccionar un entorno representativo para la instalación de un invernadero tipo. Se valoraron aspectos como la radiación solar promedio, las temperaturas extremas, la humedad relativa, la estacionalidad de los cultivos, la disponibilidad de espacio y el acceso a fuentes de agua. Esta etapa permitió establecer un perfil climático de referencia para fundamentar el diseño posterior.

Con base en estas condiciones, se llevó a cabo el diseño del sistema de control ambiental del invernadero, determinando los valores críticos que debían mantenerse dentro de ciertos rangos para favorecer el desarrollo óptimo de los cultivos, tales como temperatura, humedad y concentración de CO₂. Para ello, se seleccionaron los dispositivos necesarios para regular estas variables, incluyendo sistemas de ventilación, iluminación, humidificación y calefacción. Se optó por soluciones técnicas que priorizan un bajo consumo energético, combinando estrategias pasivas y activas.

Simultáneamente, se dimensionó la instalación fotovoltaica que garantizaría el suministro energético del sistema. Esta fase implicó calcular la demanda energética del invernadero según distintas condiciones estacionales, elegir el tipo y número de paneles solares, analizar el mercado y dimensionar los componentes auxiliares como los inversores. Todo este proceso se realizó conforme a la normativa técnica vigente.

INTRODUCCIÓN

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se desarrolló una estimación detallada de los costes de inversión y operación, incluyendo materiales, instalación y mantenimiento. Se calcularon indicadores clave como el VAN o el TIR

Como cierre del trabajo, se elaboró la memoria técnica, donde se recopilaban de forma estructurada los resultados técnicos, económicos y ambientales obtenidos. Esta documentación fue preparada conforme a las exigencias académicas establecidas, y se diseñó la presentación correspondiente para la defensa del proyecto, resaltando de forma clara los aspectos más relevantes del diseño propuesto.

CONTENIDOS	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO
INVESTIGACIÓN Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA				
SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS				
DISEÑO DEL SISTEMA				
ESTUDIOS AMBIENTAL Y FINANCIERO				
REDACCIÓN DE LA MEMORIA				

Tabla 1. Distribución temporal del trabajo. Fuente: Elaboración propia

1.5 INTRODUCCIÓN A LA FOTOVOLTAICA

1.5.1 EFECTO FOTOVOLTAICO

El efecto fotovoltaico, descubierto en el siglo XIX por el físico francés Alexandre Edmon Becquerel, es el responsable de que tengamos la capacidad de transformar la energía de la luz solar en energía eléctrica a través de paneles solares. El descubrimiento surge de uno de los experimentos de Becquerel en el que, por casualidad, se observó que, al exponer una pila electrolítica al sol, esta era capaz de producir una mayor cantidad de electricidad.

A raíz de este descubrimiento fueron muchos los que investigaron sobre este fenómeno, pero no fue hasta finales del siglo XIX que se consiguieron avances significativos. En el año 1876 el profesor inglés William Grylls Adams introdujo el selenio en la ecuación descubriendo que al exponer este elemento a la luz se generaba un flujo eléctrico a través de él.

Tras este descubrimiento, se aprovechó este conocimiento para construir el primer panel solar de la historia en el año 1883, invento que se atribuye a Charles Fritts, que tuvo la idea de poner selenio sobre una estructura metálica y recubrirlo de una capa de oro. En aquel momento la eficiencia era insignificante comparada con la actual, consiguiendo una eficiencia de un 1-2%.



Ilustración 3. Primer panel solar. Fuente: Solarplak (2023).

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el elemento principal con el que se logra la generación eléctrica es el silicio. El proceso comienza cuando la luz solar incide en las celdas fotovoltaicas, que están compuestas por dos capas de silicio modificadas estratégicamente. Una de estas capas se modifica añadiendo boro, de tal forma que se cree una carga positiva mientras que la otra capa se modifica con fósforo, para crear una carga opuesta, es decir, negativa.

Una vez impacta sobre las celdas la luz solar, los fotones absorbidos por las celdas fotovoltaicas reaccionan con el silicio provocando que el material libere electrones que posteriormente se transformarán en electricidad. La electricidad mencionada surge del movimiento de los electrones liberados por el silicio que se mueven debido al campo eléctrico generado por las cargas positiva y negativa de las distintas capas de silicio modificado.

El proceso descrito, fundamentado en la interacción de la luz solar y el silicio (modificado de distintas maneras), es la base de la generación eléctrica a través de paneles solares, permitiendo aprovechar una energía existente que de otra forma estaríamos desperdiciando.

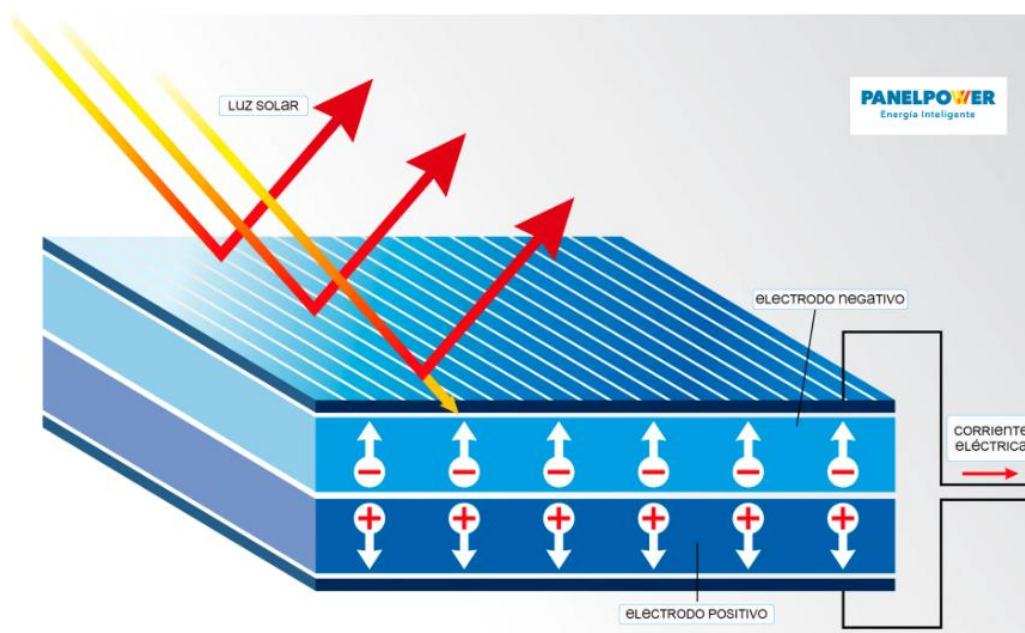


Ilustración 4. Efecto fotovoltaico. Fuente: Panel Power (2025).

(Axial Structural, 2015; Panel Power, 2025)

1.5.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Los paneles solares están compuestos por diversos componentes, sin embargo, la célula fotovoltaica se podría considerar sin lugar a duda el corazón de cualquier panel solar. La célula es la encargada directa de transformar la luz solar incidente en energía eléctrica, en forma de corriente continua. En la actualidad la configuración más habitual de un panel solar es aquel compuesto por 72 celdas o 144 celdas en caso de tratarse de una configuración de celda partida.

Dada la importancia de las celdas, es importante protegerlas convenientemente y, por tanto, los paneles solares llevan instalados diversos elementos para asegurar estas. En primera instancia se coloca un panel de vidrio cuya función es proteger las celdas fotovoltaicas de las inclemencias temporales que puedan surgir. Habitualmente se utiliza vidrio templado ya que este será capaz de soportar fuertes esfuerzos mecánicos y temperaturas extremas, utilizándose habitualmente en láminas de un grosor de 3-4 mm. Lógicamente será importante que el panel de vidrio permita una transmisión alta y por tanto se usarán paneles con bajo contenido en hierro y un revestimiento antirreflejante.

Adicionalmente, a la hora de ensamblar un panel solar, se suele aplicar una capa de encapsulante EVA (Etileno Acetato de Vinilo), se trata de un polímero altamente transparente. Se requerirá que el material del EVA sea altamente duradero y altamente tolerante a situaciones climáticas extremas ya que en gran parte dependerá de él la vida útil del panel solar evitando que entre humedad y otros elementos que puedan ensuciar las celdas.

Finalmente se añadirán también una lámina trasera que servirá para prevenir que entre la humedad y actuará a su vez como un revestimiento final. Habitualmente esta lamina trasera se fabrica utilizando plásticos como pueden ser el PP, PET y PVF en función de las propiedades de aislamiento eléctrico y resistencia que se deseen. Además, todo panel cuenta con su marco metálico, cables y conectores.

(Panel Power, 2025)

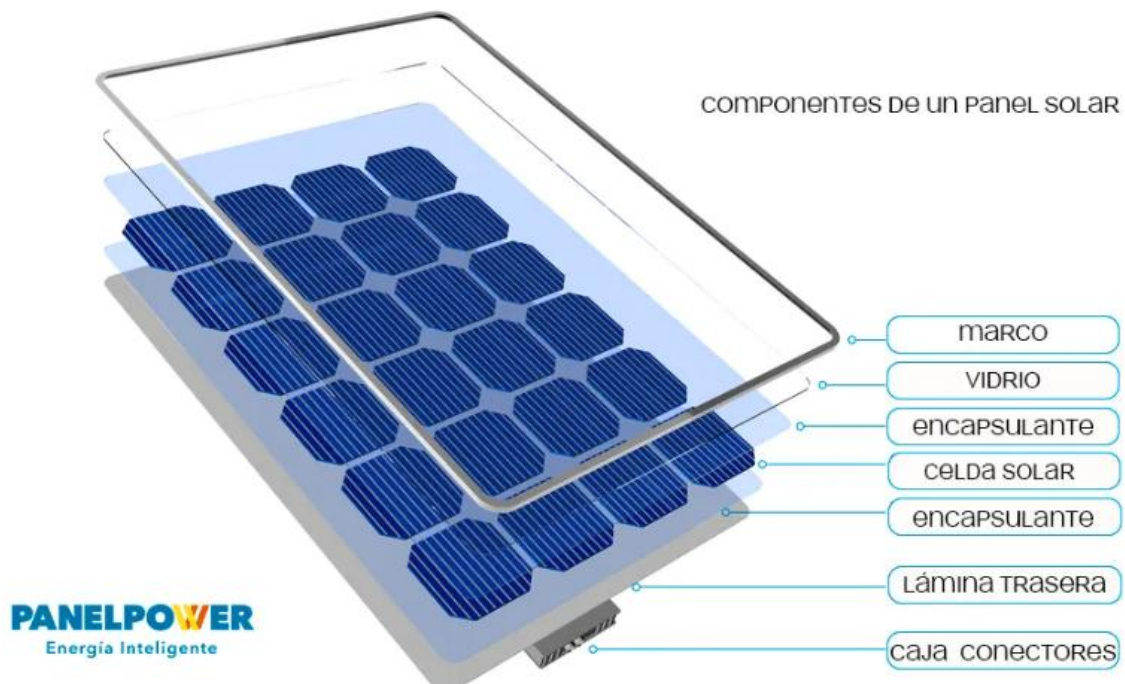


Ilustración 5. Componentes de un panel solar. Fuente: Panel Power (2025).

1.5.3 IRRADIANCIA E IRRADIACIÓN EN ESPAÑA

Por todos es sabido que España es una de las ubicaciones más privilegiadas del mundo en términos de clima y en especial de luz solar, convirtiéndose en un destino ideal para instalar paneles solares fotovoltaicos. Sin embargo, en la actualidad, en España existe una cierta confusión a la hora de hablar de radiación, irradiación e irradiancia solar. Es habitual que estos términos se utilicen indistintamente, sin embargo, existe una diferencia entre ellos que merece la pena aclarar.

Radiación solar: radiación electromagnética que procede del sol. W/m² (potencia)

INTRODUCCIÓN

Irradiancia solar (I): potencia incidente en un único instante en una superficie determinada. W/m² (potencia)

Irradiación solar (H): potencia incidente durante un periodo en una superficie determinada. Wh/m² (energía)

$$H = \int_{t_1}^{t_2} I dt$$

Conocido esto, se debe tener en cuenta que los valores de estos parámetros no son constantes durante el transcurso de un año y por tanto pueden existir grandes cambios en la generación eléctrica en función del momento. En España en especial los cambios pueden llegar a ser especialmente notorios como se muestra en las siguientes imágenes en las que se puede apreciar la diferencia de irradiancia durante los meses de primavera y verano

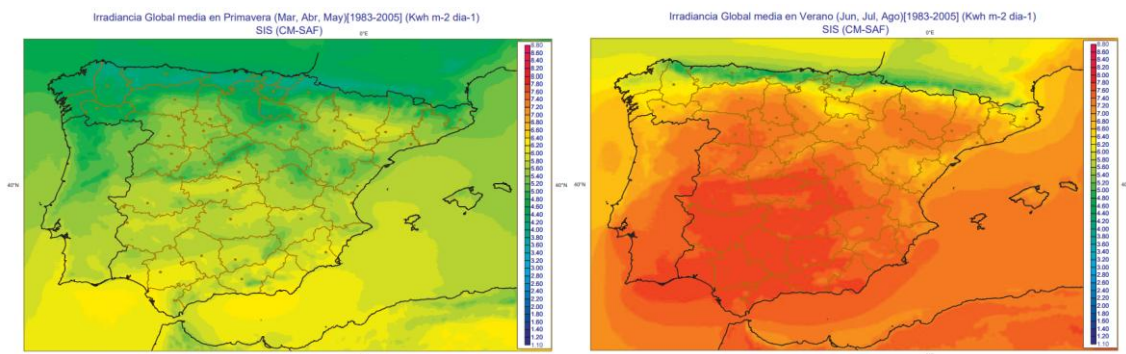


Ilustración 6. Irradiancia global media. Fuente: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2012).

(Agencia Andaluza de la Energía, n.d.)

1.5.4 AGROVOLTAICA

La agrovoltaica representa una estrategia innovadora que persigue integrar la generación de energía solar con las prácticas agrícolas convencionales. Este planteamiento permite maximizar el aprovechamiento de los recursos disponibles y generar beneficios simultáneos para los sectores energético y agrícola.

Fundamentalmente, la agrovoltaica consiste en instalar paneles solares en ubicaciones destinadas al cultivo sin que ello suponga una interferencia significativa en las actividades agrícolas. Estos sistemas se diseñan de forma que permiten el desarrollo adecuado de los cultivos, mientras se produce energía renovable. No obstante, este tipo de instalación requiere una planificación y un diseño detallado, adaptado a cada caso concreto para garantizar su viabilidad, tal como se analizará más adelante en el desarrollo del propio proyecto.

1.6 INTRODUCCIÓN A LA REGULACIÓN DE CO₂

1.6.1 CO₂ EN LA AGRICULTURA

El CO₂ es un elemento esencial en el proceso de fotosíntesis, mediante el cual las plantas transforman la energía luminosa en energía química para su desarrollo. Durante este proceso, el CO₂ presente en el aire se combina con agua y, gracias a la energía solar captada por la clorofila, se convierte en azúcares que sirven como fuente de energía y material estructural para la planta. Cuando la concentración de CO₂ es baja, la fotosíntesis se ve limitada, reduciendo el crecimiento y la productividad. En cambio, mantener niveles más altos, siempre dentro de rangos óptimos, permite acelerar el desarrollo, aumentar la producción y mejorar la calidad de los cultivos, especialmente en invernaderos donde se controlan otras variables como temperatura, luz y humedad.

1.6.2 ORIGEN DE LA REGULACIÓN

El origen de la regulación de CO₂ en invernaderos surge en Estados Unidos cuando en los años sesenta, experimentos realizados en Colorado evidenciaron que, en invernaderos cerrados situados en climas fríos y soleados, los cultivos de crecimiento rápido podían reducir la concentración interna de CO₂ por debajo de los niveles ambientales habituales (en torno a 340 ppm), lo que limitaba la fotosíntesis. Se observó que, al elevar esa concentración hasta aproximadamente 1000 ppm, muchas especies respondían con mejoras notables en su desarrollo.

La situación era diferente en la franja costera de California. Allí, la ventilación frecuente, incluso en invierno, impedía mantener niveles altos de CO₂ durante largos periodos, lo que reducía el potencial de esta técnica. Para evaluar esta limitación, entre 1985 y 1986 se aplicó el método convencional de enriquecimiento en un cultivo de rosas, se aumentaba la concentración hasta 1000 ppm por la mañana y al final de la tarde, manteniéndolo sin ventilación. Los resultados no mostraron mejoras significativas ni en el rendimiento ni en la calidad de las flores.

Durante estas pruebas, se detectó un fenómeno relevante, incluso con ventilación, el CO₂ en el interior podía caer hasta 225 ppm, un nivel que afectaba más a la fotosíntesis que la ausencia de enriquecimiento por encima de 340 ppm. Esto llevó, en 1986-1987, a un nuevo ensayo en el que se suministró CO₂ de forma localizada a la altura de las hojas, manteniendo la concentración por encima de 350 ppm durante todo el día. Esta estrategia, aplicada desde el verano hasta la primavera siguiente, aumentó la producción en un 12 %, generó tallos más largos y robustos, y flores con mayor peso seco. El coste adicional, estimado en 0,18 dólares por flor, resultó asumible en épocas de alta demanda.

En otoño de 1988, el ensayo se repitió con la otra variedad de rosas, obteniéndose resultados en la misma línea, aunque el estudio tuvo que interrumpirse por motivos presupuestarios.

(University of California Agriculture and Natural Resources [UCANR], 2018)

CAPÍTULO 2. ODS E IMPACTO

2.1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Este proyecto guarda coherencia con diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas, los cuales buscan dar respuesta a algunos de los desafíos globales más urgentes y relevantes. Gracias a su enfoque centrado en la disminución del impacto ambiental, la mejora de la eficiencia en la agricultura y la incorporación de tecnologías sostenibles, la propuesta contribuye de manera directa al cumplimiento de varios de estos objetivos.

ODS 2 Hambre Cero: La producción agrícola desempeña un papel fundamental en la garantía de la seguridad alimentaria, especialmente en un escenario donde la población mundial continúa creciendo y los recursos naturales son cada vez más escasos. Este proyecto, al plantear un sistema eficiente que optimiza las condiciones necesarias para el desarrollo de los cultivos, se vincula directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 2. A través del uso de tecnología avanzada para controlar variables clave en la producción agrícola, se logra aumentar de forma notable la productividad en los invernaderos, obteniendo mayores volúmenes de productos de alta calidad y reduciendo significativamente el riesgo de pérdida de cosechas debido a condiciones climáticas adversas.

ODS 7 Energía Asequible y no Contaminante: tiene como finalidad asegurar el acceso universal a energías sostenibles, fiables, asequibles y modernas. En este sentido, el presente proyecto contribuye directamente a dicho objetivo mediante la incorporación de fuentes renovables, concretamente energía solar. La integración de sistemas fotovoltaicos en los invernaderos no solo permite la generación de energía limpia, sino que también reduce la dependencia de fuentes convencionales, habitualmente basadas en recursos no renovables. Además, se promueve la autosuficiencia energética, especialmente en entornos rurales, donde un posible excedente de producción eléctrica podría aprovecharse en otras aplicaciones, favoreciendo así una gestión más eficiente y responsable de los recursos energéticos.

ODS 12 Producción y Consumo Responsables: el objetivo de promover un modelo de consumo y producción sostenible se refleja claramente en las ventajas que ofrece este proyecto. La propuesta contribuye de forma significativa a la sostenibilidad en el ámbito agrícola, al reducir el impacto ambiental mediante el empleo de energías renovables y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos disponibles. Gracias al control preciso de las condiciones internas del invernadero, es posible minimizar el consumo de insumos y reducir considerablemente la necesidad de aplicar productos químicos como pesticidas, lo que se traduce en cultivos de mayor calidad y más respetuosos con el medio ambiente.

ODS 13 Acción por el Clima: Uno de los ejes centrales del es la adopción urgente de medidas destinadas a combatir el cambio climático y mitigar sus efectos. En esta línea, el proyecto presentado representa una herramienta valiosa para avanzar hacia dicho objetivo. Al incorporar fuentes de energía renovables en los invernaderos, se logra una reducción significativa de la huella de carbono, contribuyendo así a la acción climática y ayudando a frenar los impactos del calentamiento global. Este aspecto resulta especialmente relevante en el sector agrícola, uno de los más vulnerables frente a los efectos del cambio climático. Asimismo, al mejorar la capacidad de adaptación de los sistemas agrícolas mediante las tecnologías descritas, el proyecto permite afrontar de manera más eficaz los múltiples desafíos que este fenómeno plantea sobre la producción agrícola.



Ilustración 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Naciones Unidas (2025)

2.2 IMPACTO

2.2.1 MEDIOAMBIENTAL

La agricultura en invernaderos, especialmente cuando se combina con fuentes de energía renovable como la solar fotovoltaica, representa una solución sostenible para mejorar la productividad agrícola con un impacto ambiental reducido. No obstante, este tipo de proyectos también puede generar ciertos efectos sobre el entorno que deben ser considerados y gestionados adecuadamente desde las fases iniciales de diseño.

Entre los aspectos positivos, destaca la disminución significativa del consumo energético procedente de fuentes convencionales gracias al uso de energía solar, lo que implica una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la producción agrícola bajo invernadero permite un uso más eficiente del agua, una mayor planificación del cultivo y un menor uso de pesticidas, lo cual contribuye al respeto por el medio ambiente. La posibilidad de aprovechar superficies no aptas para el cultivo tradicional y la mejora del rendimiento por metro cuadrado también refuerzan su papel en el desarrollo sostenible.

Sin embargo, es importante reconocer ciertos impactos potenciales asociados a este tipo de instalaciones. Por un lado, la construcción de invernaderos y de instalaciones fotovoltaicas supone una ocupación del suelo que puede alterar el uso previo del terreno y, en ocasiones, modificar la dinámica natural del entorno. Asimismo, durante la fase de obra pueden producirse efectos temporales como movimientos de tierra, generación de residuos o alteración de la flora y fauna local, especialmente si no se respetan criterios ambientales en la selección del emplazamiento. En cuanto a la instalación solar, aunque no emite contaminantes durante su funcionamiento, requiere materiales y componentes cuya producción tiene un impacto indirecto, así como una adecuada gestión al final de su vida útil.

La normativa medioambiental vigente establece la necesidad de realizar estudios de impacto ambiental (EIA) o evaluaciones simplificadas en función del tamaño y características del proyecto. Estos análisis permiten identificar los posibles efectos sobre el entorno y proponer medidas preventivas, correctoras o compensatorias. Entre las acciones más comunes se encuentran el diseño de sistemas de drenaje adecuados, la revegetación de áreas afectadas, la integración

paisajística de los invernaderos y paneles solares, y la planificación de las fases de obra para minimizar molestias.

La implementación de buenas prácticas, como el uso de materiales reciclables, la optimización del consumo energético interno del sistema de control ambiental, y la ubicación estratégica de los paneles solares, permite reducir los impactos negativos y mejorar la eficiencia global del proyecto. El seguimiento ambiental posterior puede ser útil para comprobar que el funcionamiento del sistema no genera efectos imprevistos y para ajustar las medidas de mitigación si fuera necesario.

En resumen, los sistemas de producción agrícola en invernaderos alimentados por energía fotovoltaica presentan ventajas claras desde el punto de vista medioambiental. Si el diseño y la ejecución del proyecto incorporan criterios sostenibles, es posible compatibilizar el aumento de la productividad agrícola con la preservación del entorno natural, favoreciendo así un modelo de desarrollo rural resiliente y respetuoso con el medio ambiente.

2.2.2 SOCIAL

La implantación de un sistema de control ambiental en invernaderos, alimentado mediante una instalación fotovoltaica, conlleva una serie de efectos sociales que deben ser valorados con el fin de maximizar sus beneficios para el entorno rural y minimizar posibles impactos negativos.

Uno de los principales efectos positivos es el impulso a la actividad agrícola sostenible, ya que este tipo de sistemas permite mejorar la productividad y la calidad de los cultivos, garantizando unas condiciones ambientales óptimas durante todo el año. Esto puede traducirse en una mayor estabilidad económica para los agricultores, así como en una menor dependencia de insumos externos, promoviendo un modelo de producción más resiliente y adaptado al cambio climático. Además, la utilización de energía solar reduce significativamente los costes operativos a medio y largo plazo, lo que favorece la rentabilidad de las explotaciones.

La instalación del sistema también puede suponer un estímulo para el empleo en el entorno, tanto por la demanda de mano de obra durante las fases de montaje y

puesta en marcha, como por la necesidad de mantenimiento técnico periódico. Este efecto es especialmente relevante en zonas rurales con limitado acceso a oportunidades laborales, ya que puede contribuir a fijar población y fomentar la capacitación en energías renovables y tecnologías agrícolas.

Desde el punto de vista del desarrollo local, la ejecución de este tipo de proyectos puede ir acompañada de mejoras en infraestructuras básicas, como caminos rurales o redes eléctricas, que también benefician a otros usos y habitantes del entorno. Asimismo, la priorización de proveedores y mano de obra locales permite que una parte significativa de la inversión tenga un retorno directo en la economía del municipio.

En cuanto a la aceptación social, estos sistemas suelen presentar buena acogida al no implicar impactos visuales o acústicos relevantes, y al integrarse fácilmente en el paisaje agrícola existente. No obstante, es importante mantener una comunicación clara y constante con la comunidad, especialmente en lo relativo a los beneficios esperados, la distribución del espacio y las condiciones de uso compartido del terreno. En proyectos a mayor escala, podrían contemplarse medidas de apoyo técnico o acuerdos de colaboración con cooperativas o asociaciones locales.

Por otro lado, este tipo de instalaciones puede tener un valor educativo significativo, al servir como ejemplo de buenas prácticas agrícolas y energéticas. Su implementación puede aprovecharse en programas de formación agraria, visitas escolares o campañas de concienciación sobre sostenibilidad, promoviendo así una cultura de innovación responsable en el medio rural.

En resumen, el impacto social del sistema propuesto se considera mayoritariamente positivo, siempre que se adopte un enfoque inclusivo y transparente que tenga en cuenta las necesidades del entorno y fomente la implicación de la comunidad local en el desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO 3. TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

3.1 TEORÍA DEL ESTUDIO AGRÍCOLA

3.1.1 FUNCIONAMIENTO DE UN INVERNADERO Y NECESIDADES PARA CORRECTO FUNCIONAMIENTO

Un invernadero es una construcción cerrada, cubierta con materiales transparentes. Su estructura incluye una capa exterior translúcida, generalmente hecha de plástico o cristal, que permite la entrada de los rayos solares al interior. Esto posibilita la creación de condiciones artificiales óptimas para el adecuado crecimiento de los cultivos.

Entre los factores críticos que se pueden modificar para optimizar las condiciones en los invernaderos destacan:

Temperatura: La radiación solar penetra a través de la estructura translúcida, lo que genera un aumento de la temperatura en el interior del invernadero. Los rayos solares liberan radiación infrarroja, con una longitud de onda mayor que la de la luz solar, que queda atrapada en el interior, contribuyendo al calentamiento. Esta alternativa posibilita mantener una temperatura interior 5º más alta que la exterior, lo que favorece el desarrollo adecuado de todas las especies plantadas, ya que proporciona protección contra lluvias, vientos o granizos.

Humedad: Es de vital importancia conocer los niveles de humedad y asegurarse de que se encuentre en un porcentaje correcto ya que casi todos los cultivos requieren agua. Además, hay que tener en cuenta que la mayoría de los cultivos necesitan que el nivel de humedad sea constante pudiendo aparecer plagas en caso de que la humedad sea demasiado alta.

Luminosidad: La luz solar es esencial para el crecimiento de cualquier planta, por lo que se convierte en un factor clave al seleccionar la ubicación del invernadero. Este debe recibir al menos 6 horas de luz diaria. Un aspecto importante al instalarlo

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

es orientarlo a lo largo del eje este-oeste para aprovechar la luz de manera óptima. Además, es crucial evitar la acumulación de agua y polvo en la cubierta, ya que esto puede reducir la cantidad de luz que llega al interior.

Ventilación: El invernadero debe contar con una ventilación adecuada para asegurar el crecimiento óptimo de los cultivos y evitar que la temperatura se eleve demasiado. En caso de ser necesario, se pueden instalar ventiladores en su interior. De manera similar, si las temperaturas son demasiado bajas, se pueden emplear bombas de calor para alcanzar el rango térmico adecuado.

CO₂: En la agricultura actual, la mejora de las condiciones dentro de los invernaderos es esencial para lograr cosechas abundantes y de excelente calidad. Los sistemas de control de CO₂ se basan en una serie de directrices específicas para gestionar de forma eficiente la dosificación de este gas, creando un ambiente óptimo para el crecimiento de las plantas.

La concentración de CO₂ dentro del invernadero se ajusta de acuerdo con varios parámetros ambientales clave, los cuales determinan de forma constante el punto de consigna:

- La demanda de calor del invernadero
- La radiación solar
- La velocidad del viento
- El grado de apertura de la ventilación

(Terrenos, 2025; Mundoriego, 2025; Novagric, 2025)

3.1.2 VENTAJAS DE LOS INVERNADEROS

Una de las principales fortalezas del cultivo en invernaderos es que permite mantener frutas y hortalizas en condiciones térmicas adecuadas, preservando así su calidad. Asimismo, el riesgo de infestaciones por insectos se reduce notablemente y el suelo se ve menos afectado. Al desarrollarse en espacios cerrados o controlados, esta modalidad de cultivo posibilita la producción durante todo el año.

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

Entre las razones que justifican el impulso de esta técnica agrícola se encuentra la capacidad de decidir qué productos consumir, promoviendo un modelo de alimentación sostenible y accesible para distintos niveles económicos.

(Terrenos, 2025)

3.1.3 ZONAS CON MAYOR CONCENTRACIÓN DE INVERNADEROS

Se debe tener en cuenta que, debido a la diferencia de clima en las distintas partes de España, la presencia de invernaderos es inconsistente siendo las más destacadas en términos de presencia de invernaderos las zonas del sur. Como se puede ver en la siguiente tabla, la mayor presencia de invernaderos en España se encuentra en la zona de Andalucía seguido de regiones cercanas.

Superficie (ha)	2022/2023	Avance 2023/2024	Media 5	Variaciones 2023/2024	
				vs 2022/2023	vs Media 5
Andalucía	43.138	45.175	43.285	4,7%	4,4%
R. Murcia	4.275	4.076	4.302	-4,7%	-5,2%
C. Valenciana	2.180	2.059	2.146	-5,6%	-4,0%
Canarias	1.308	1.446	1.343	10,6%	7,7%
Resto CCAA	6.924	6.723	7.119	-2,9%	-5,6%
TOTAL	57.825	59.479	58.194	2,9%	2,2%

Tabla 2. Superficie ocupada por invernaderos por CCAA. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)

A nivel territorial, se ha observado una disminución en la mayoría de las comunidades autónomas, excepto en Andalucía, que se mantiene como líder en superficie de hortícolas protegidos, y Canarias. En otras áreas productoras clave de España, como Murcia y la Comunidad Valenciana, se registran descensos significativos.

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

Por otro lado, en cuanto a la producción, observamos que existen variaciones en las diferentes CCAA, de nuevo destacando Andalucía como la mayor productora.

Volumen (t)	2022/2023	Avance 2023/2024	Media 5	Variaciones 2023/2024	
				vs 2022/2023	vs Media 5
Andalucía	3.245.682	3.322.918	3.368.322	2,4%	-1,3%
R. Murcia	433.687	429.120	424.500	-1,1%	1,1%
C. Valenciana	138.257	134.086	140.801	-3,0%	-4,8%
Canarias	97.688	110.162	107.587	12,8%	2,4%
Resto CCAA	266.571	295.406	292.090	10,8%	1,1%
TOTAL	4.181.885	4.291.692	4.333.301	2,6%	-1,0%

Tabla 3. Producción de invernaderos por CCAA. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)

En cuanto a los territorios, la mayoría de las comunidades autónomas han experimentado avances. Andalucía, como principal productor, alcanzaría los 3,3 millones de toneladas, una cifra mayor que la de la campaña anterior, aunque aún por debajo del promedio. En otras de las regiones más productivas, como Murcia y la Comunidad Valenciana, se han registrado retrocesos.

(Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2024).

3.1.4 CULTIVOS MÁS FRECUENTES EN INVERNADEROS EN ESPAÑA

Dadas las condiciones climáticas de nuestro país, hábitos de consumo y exportaciones, existen ciertos cultivos que aparecen con mayor frecuencia en los invernaderos españoles.

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

En términos de superficie dedicada a cada cultivo, los que destacan notablemente sobre los demás son los siguientes.

Superficie (ha)	2022/2023	Avance 2023/2024	Media 5	Variaciones 2023/2024	
				vs 2022/2023	vs Media 5
Tomate (Rec. X-XII, I-V)	14.098	14.780	14.039	4,8%	5,3%
Pimiento	21.190	21.411	21.625	1,0%	-1,0%
Pepino	8.020	8.246	7.778	2,8%	6,0%
Calabacín	10.969	11.546	11.160	5,3%	3,5%
Berenjena	3.548	3.496	3.593	-1,5%	-2,7%
TOTAL	57.825	59.479	58.194	2,9%	2,2%

Tabla 4. Superficie ocupada por los principales cultivos en invernaderos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)

Se prevé que la superficie cultivada en 2023/24 aumente un 2,9% en comparación con 2022/23. Se destaca la recuperación de casi todas las hortalizas de invernadero, en particular el tomate, el pepino y el calabacín, los cuales han ganado parte del terreno perdido en los últimos años. También se observa un incremento del 3,3% en la superficie de berenjena en Andalucía, principal productor, a pesar de la disminución a nivel nacional.

Por otro lado, también resulta fundamental tener en consideración la cantidad producida de cada uno de los cultivos, ya que este dato nos permite identificar cuáles presentan un mayor volumen de producción. De este modo, es posible determinar qué cultivos son más eficientes en términos de la relación entre la cantidad obtenida y el espacio que requieren para su desarrollo. Este análisis no solo facilita la optimización del uso del terreno disponible, sino que también contribuye a tomar decisiones más acertadas sobre qué especies priorizar, maximizando así la productividad global de la explotación.

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

Volumen (t)	2022/2023	Avance 2023/2024	Media 5	Variaciones 2023/2024	
				vs 2022/2023	vs Media 5
Tomate (Rec. X-XII, I-V)	1.175.390	1.227.932	1.223.514	4,5%	0,4%
Pimiento	1.429.989	1.481.354	1.475.703	3,6%	0,4%
Pepino	750.271	721.364	760.014	-3,9%	-5,1%
Calabacín	562.585	564.237	610.334	0,3%	-7,6%
Berenjena	263.650	296.805	263.736	12,6%	12,5%
TOTAL	4.181.885	4.291.692	4.333.301	2,6%	-1,0%

Tabla 5. Producción de los principales cultivos en invernaderos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)

Por último, también es interesante conocer cuáles son los cultivos producidos en los invernaderos españoles más destinados a la exportación. Esto nos puede aportar una perspectiva diferente del motivo de su plantación, diferenciándose de variables como el hábito de consumo o las posibles condiciones climáticas que puedan favorecer a un cultivo u otro.

Volumen acumulado (t): Sep.23 – Ago.24	2022/2023	2023/2024	Media 5	Variaciones 2023/2024	
				vs 2022/2023	vs Media 5
Tomate	606.000	633.110	691.588	4,5%	-8,5%
Pimiento	774.648	820.369	843.347	5,9%	-2,7%
Pepino	686.305	685.895	689.773	-0,1%	-0,6%
Calabacín	372.208	384.970	404.462	3,4%	-4,8%
Berenjena	163.774	189.581	164.063	15,8%	15,6%
Hortalizas Invernadero	2.602.934	2.713.926	2.793.232	4,3%	-2,8%

Tabla 6. Exportaciones en volumen de los principales cultivos en invernaderos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

En cuanto al balance de comercio exterior, las exportaciones exceden notablemente a las importaciones de estos alimentos como se puede ver en el siguiente gráfico.

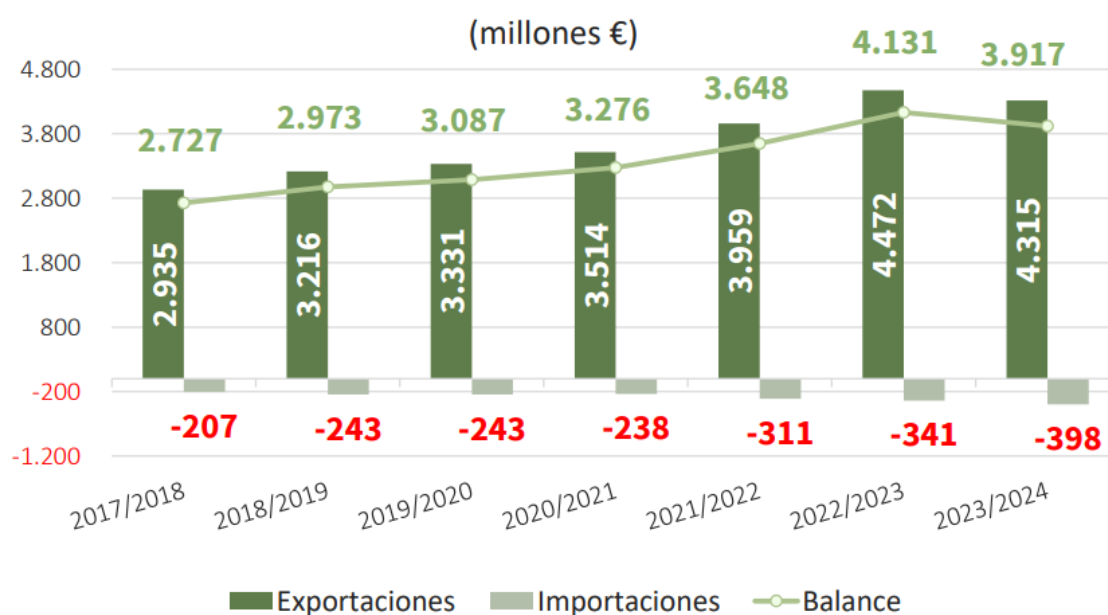


Ilustración 8. Evolución del balance de comercio exterior de los principales cultivos en invernaderos. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (2024)

(Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2024).

3.1.5 CONDICIONES DESEADAS PARA CADA CULTIVO

En cuanto a las condiciones deseadas para los cultivos, se debe tener en cuenta que dependiendo del tipo de cultivo que se vaya a trabajar, las condiciones en el interior del invernadero deben ser distintas si nuestro objetivo es optimizar el proceso al máximo. En la siguiente tabla se muestran como ejemplo los rangos de las variables críticas para el crecimiento de los cultivos en los que algunos de estos se encuentran en condiciones óptimas o condiciones críticas.

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

Cultivo	Temperatura mínima letal (°C)	Temperatura mínima biológica (°C)	Temperatura óptima (°C) Día	Temperatura óptima (°C) Noche	Temperatura biológica máxima (°C)	Temperatura mínima de germinación (°C)	Temperatura óptima de germinación (°C)	Humedad relativa (%)	pH óptimo	Luminosidad óptima (klx)
Tomate	-2 - 0	8 - 10	22 - 26	13 - 16	26 - 30	9 - 10	20 - 30	60 - 80	5,8 - 7,2	1-4
Pepino	0	10 - 13	24 - 28	18 - 20	28 - 32	14 - 16	20 - 30	65 - 80	5,7 - 7,2	1-2
Melón	0	12 - 14	24 - 30	18 - 21	30 - 34	14 - 16	20 - 30	65 - 80	5,7 - 7,2	1-2
Frijol	0	10 - 14	21 - 28	16 - 18	28 - 35	12 - 14	20 - 30	65 - 70	5,8 - 6,8	2-3
Pimienta	-2 - 0	10 - 12	22 - 28	16 - 18	28 - 32	12 - 15	20 - 30	70 - 75	6,3 - 7,8	1-3
Berenjena	-2 - 0	9 - 10	22 - 26	15 - 18	30 - 32	12 - 15	20 - 30	50 - 65	5,4 - 6,0	2-5
Calabacín	0	4 - 8	20 - 25	10 - 12	28 - 35	14 - 16	20 - 25	65-80	5,6 - 6,8	1-2
Lilium	0	10 - 12	20 - 25	12 - 16	25 - 30	12	14	80 - 85	5,5 - 6,5	2-3

Tabla 7. Condiciones requeridas para distintos cultivos. Fuente: Ruiz-Celma, Salmerón, Pulido-Granado, y Mera-Bravo (2022).

Como se puede ver, las condiciones óptimas varían en función del cultivo y por tanto se debe ajustar estas variables con los sistemas de control ambiental de tal forma que se adapten al cultivo vigente.

También se debe tomar en cuenta las necesidades de CO₂ de los cultivos. Para lograr una producción de calidad y cantidad óptimas, la planta necesita una concentración de CO₂ que varíe entre 700 y 1000 ppm. No obstante, la concentración externa se encuentra entre 350 y 380 ppm, mientras que, en el interior del invernadero, si no se mantiene una ventilación adecuada, los niveles pueden descender incluso por debajo de los 100 ppm.

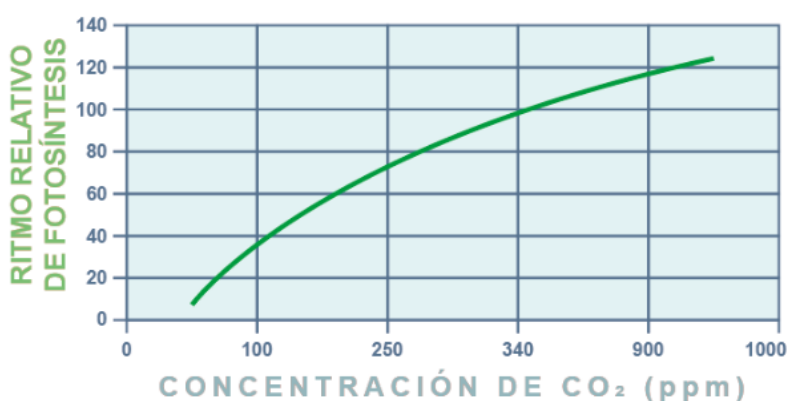


Ilustración 9. Ritmo relativo de fotosíntesis en relación a la concentración de CO₂. Fuente: Nutricontrol (2020).

(Nutricontrol, 2020)

3.2 TEORÍA DE LOS ELEMENTOS DE REGULACIÓN

3.2.1 UTILIDAD DE LOS ELEMENTOS REGULATORIOS

En la región mediterránea, las condiciones de radiación solar alcanzan niveles muy elevados, lo que convierte a esta zona en un entorno con un notable potencial agrícola. Sin embargo, para que este recurso natural se traduzca en un rendimiento productivo real, es imprescindible gestionar de forma adecuada otros factores que intervienen en el desarrollo de los cultivos. El aprovechamiento eficiente de la luz solar depende, entre otros aspectos, de que las plantas conviertan esa energía en compuestos asimilables que formen parte de su estructura, prestando especial atención a aquellos órganos con valor comercial.

La incorporación de tecnología en los invernaderos permite actuar sobre diferentes parámetros que influyen directamente en el crecimiento, como la temperatura, la humedad, la radiación o la concentración de CO₂, además de aspectos como la ventilación, el suministro de agua y nutrientes, el control de plagas o la duración de la etapa productiva. Gracias a esta regulación, es posible mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de las plantas, manteniendo la calidad del producto final.

En la práctica, buena parte de la horticultura de esta región se realiza todavía en invernaderos de bajo nivel tecnológico, sin sistemas de control activos y con un consumo energético muy reducido. Esta limitación provoca que las cosechas dependan casi por completo del clima local, lo que genera periodos de producción concentrados, menores volúmenes de cultivo, pérdida de calidad y ciclos acortados por deterioro prematuro de las plantas. Estas condiciones pueden agravarse por la incidencia de plagas, enfermedades o el uso de agua de baja calidad. Ante esta realidad, el desafío radica en seleccionar soluciones que incrementen la productividad y mantengan un enfoque sostenible, aprovechando al máximo la radiación disponible y reduciendo el uso de recursos no renovables, la generación de residuos y el impacto ambiental.

Los avances en materiales, sistemas de control y manejo de cultivos, así como el empleo de variedades más eficientes en la captación y uso de la luz, han permitido incrementar gradualmente los rendimientos. Sin embargo, cada innovación tecnológica introducida en el invernadero puede alterar la respuesta fisiológica de las plantas, lo que a su vez interactúa con el microclima y obliga a reajustar los

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

parámetros de control. En este contexto, los modelos biofísicos resultan útiles para prever y adaptar las condiciones de cultivo a estos cambios, evitando pérdidas y optimizando la producción.

3.2.2 TECNOLOGÍAS MÁS FRECUENTES

De cara a este apartado abordaré las tecnologías que actualmente son más frecuentes en los sistemas de control ambiental haciendo foco en 3 variables clave siendo estas la temperatura, humedad y CO₂

3.2.2.1 TEMPERATURA

Actualmente existen varios métodos para la regulación de la temperatura dentro de los invernaderos destacando entre ellos métodos de ventilación (natural o forzada), pantallas térmicas o control de sombreado y, por último, el método en el que se hará un mayor foco, la calefacción.

Los métodos de calefacción son diversos destacando 4 sobre todos los demás, estos son la calefacción por agua caliente, calefacción por aire caliente, calefacción por suelo radiante y por último la calefacción por radiación infrarroja.

Calefacción por agua caliente: Este método funciona a través de una caldera (gas, gasóleo, biomasa o eléctrica) que eleva la temperatura del agua, la cual se distribuye por tuberías instaladas a lo largo del invernadero. El calor se transfiere gradualmente al ambiente y a las plantas, logrando una temperatura homogénea. Entre sus principales ventajas destaca la uniformidad en la distribución del calor, la posibilidad de aprovechar el CO₂ generado en la combustión y un buen rendimiento en superficies grandes. Sin embargo, presenta desventajas como el alto coste de instalación, la respuesta lenta ante cambios de temperatura y la necesidad de un mantenimiento periódico tanto de la caldera como de las tuberías.

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR



Ilustración 10. Calefacción por agua caliente. Fuente: ULMA Agrícola (2015).

Calefacción por aire caliente: En este método se utilizan generadores o aerotermos que calientan el aire mediante resistencias eléctricas o intercambiadores de calor y lo impulsan al interior con ventiladores. Este sistema permite un aumento rápido de la temperatura y su instalación es sencilla, pudiendo trasladarse con facilidad. Como contrapartida, el calor tiende a distribuirse de forma menos uniforme, el consumo energético es más elevado y, si no se ventila correctamente, se pueden generar capas de aire caliente en la parte superior del invernadero.



Ilustración 11. . Calefacción por aire caliente. Fuente: ULMA Agrícola (2015).

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

Calefacción por suelo radiante: este método emplea tuberías de agua caliente o cables eléctricos colocados bajo el suelo o el sustrato, de manera que el calor se transfiere directamente a la zona radicular. Esto reduce las pérdidas por convección y mejora la eficiencia, ya que la energía se dirige donde más se necesita. Entre sus ventajas se encuentra el ahorro energético y la estabilidad térmica en las raíces, aunque su instalación resulta más compleja y costosa, y las reparaciones son complicadas una vez instalado el sistema.



Ilustración 12. Calefacción por suelo radiante. Fuente: Novagric (2024).

(Novagric, 2024; ULMA Agrícola, 2015)

3.2.2.2 HUMEDAD

Para la regulación de la humedad en invernaderos actualmente existen diversos métodos destacando sobre los demás los nebulizadores y los deshumidificadores.

Nebulizadores: dentro de este segmento se encuentran los foggers. Los foggers funcionan mediante boquillas de alta presión que generan microgotas de agua suspendidas en el aire. Este sistema eleva rápidamente la humedad relativa y, al mismo tiempo, ayuda a reducir la temperatura del invernadero por enfriamiento evaporativo. Su principal ventaja es la rapidez y uniformidad del efecto, aunque

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

requiere un sistema de bombeo potente y una filtración de agua eficiente para evitar obstrucciones, lo que incrementa el coste y el mantenimiento.



Ilustración 13. Fogger. Fuente: Novagric (2024).

Deshumidificadores: estos extraen el exceso de vapor de agua del aire, condensándolo y expulsando aire más seco. Son muy efectivos para prevenir problemas de condensación y hongos, especialmente en épocas frías o lluviosas. Sin embargo, requieren una inversión inicial alta y su consumo eléctrico puede ser considerable en grandes superficies.



Ilustración 14. Deshumidificador. Fuente: DryGair (2024).

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

3.2.2.3 *CO₂*

En cuanto a los sistemas de enriquecimiento con CO₂, actualmente existen 3 métodos que prevalecen sobre los demás. Estos métodos son el uso de generadores de CO₂, el aprovechamiento de gases generados por calderas de combustión y la utilización de tanques comprimidos.

Generadores de CO₂: estos funcionan quemando gas natural, propano o gasóleo en equipos diseñados para liberar gases ricos en CO₂ al interior del invernadero. Además de CO₂, producen calor, lo que puede ser ventajoso en épocas frías. Entre sus ventajas están el suministro continuo y la alta concentración alcanzada, aunque requieren una depuración adecuada para evitar contaminantes y su uso implica consumo de combustible fósil, con el consiguiente coste y emisiones.



Ilustración 15. *Generador de CO₂. Fuente: Calcán Green (2025).*

Calderas de combustión: consiste en capturar y purificar el CO₂ generado durante la combustión en sistemas de calefacción, como calderas de agua caliente. De esta forma, se utiliza un subproducto del proceso de calefacción sin necesidad de instalar un generador específico. Su principal ventaja es que no requiere combustible adicional, pero depende del funcionamiento de la caldera, por lo que su aporte de CO₂ no es constante si no hay demanda de calor.

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR



Ilustración 16. Caldera de combustión. Fuente: ULMA Agrícola (2015).

Tanques comprimidos: emplea depósitos de CO₂ líquido que se vaporiza y se introduce en el invernadero mediante tuberías. Este método aporta un gas limpio, libre de contaminantes y con un control muy preciso de la concentración. Su mayor inconveniente es el coste de adquisición y reposición del gas, así como la necesidad de logística para el suministro de los tanques.



Ilustración 17. Tanque de CO₂. Fuente: Asco Carbon Dioxide (2025).

3.3 *TEORÍA DEL ESTUDIO ELÉCTRICO*

3.3.1 *MÓDULOS FOTOVOLTAICOS*

En cuanto al estudio eléctrico de la instalación fotovoltaica, se centrará el foco en 2 tipos de paneles solares fotovoltaicos, los monocristalinos y los policristalinos ya que estos son los más habituales en la industria.

Los paneles fotovoltaicos monocristalinos están fabricados a partir de un único cristal de silicio de alta pureza, lo que les proporciona un color oscuro uniforme y un acabado característico con bordes redondeados. Este tipo de panel destaca por su alta eficiencia, que suele situarse entre el 18 % y el 23 %, y por su buen rendimiento incluso en condiciones de baja radiación solar o temperaturas moderadas. Entre sus principales ventajas se encuentran su elevada eficiencia energética, la necesidad de menos superficie para generar la misma potencia que otros tipos, una vida útil prolongada que suele superar los 25 años y un buen comportamiento en climas fríos o con luz difusa. Sin embargo, su precio es más alto que el de otras tecnologías y su proceso de fabricación es más complejo, generando mayor desperdicio de material.

Los paneles fotovoltaicos policristalinos se producen a partir de múltiples cristales de silicio fundidos, lo que les otorga un color azulado y un patrón cristalino irregular en su superficie. Su eficiencia es algo menor que la de los monocristalinos, normalmente entre el 15 % y el 18 %, por lo que requieren una mayor superficie para alcanzar la misma potencia. Su principal ventaja es un coste más bajo, resultado de un proceso de fabricación más sencillo y con menor desperdicio de silicio, manteniendo una buena durabilidad y fiabilidad a lo largo del tiempo. Como desventajas, ofrecen un rendimiento inferior en condiciones de baja radiación o altas temperaturas y ocupan más espacio para la misma producción eléctrica que los paneles monocristalinos.

Uno de los parámetros clave para evaluar el rendimiento de los módulos fotovoltaicos es el denominado coeficiente de temperatura, que indica la pérdida de eficiencia que experimenta el panel a medida que aumenta su temperatura de operación. Cuanto menor sea este valor, más estable será el desempeño del módulo en entornos calurosos. En este aspecto, los modelos monocristalinos

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

presentan coeficientes algo más bajos que los policristalinos, lo que les otorga un comportamiento más favorable cuando la temperatura ambiente es elevada.

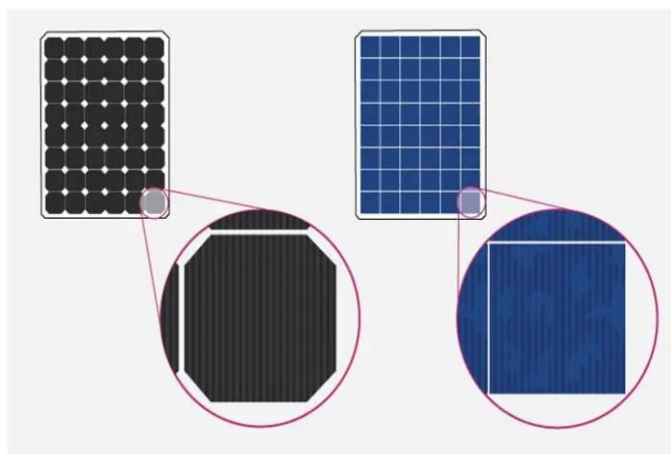


Ilustración 18. Módulos monocristalinos y policristalinos. Fuente: Mipanel Solar (2025).

Ambos tipos de módulos comparten una durabilidad semejante. Su vida útil suele situarse entre 25 y 30 años, manteniendo una degradación de rendimiento reducida a lo largo del tiempo,

	Monocrystalline panels	Polycrystalline panels
Cost	More expensive	Less expensive
Efficiency	More efficient	Less efficient
Aesthetics	Solar cells are a black hue	Solar cells have a blue-ish hue
Lifespan	25+ years	25+ years
Temperature coefficient	Lower temperature coefficient/more effective when temperature changes	Higher temperature coefficient/less effective when temperature changes

Tabla 8. Comparativa de módulos monocristalinos y policristalinos. Fuente: EnergySage (2025).

(Mipanel Solar, 2025; EnergySage, 2025)

3.3.2 INVERSORES

Un inversor solar es el dispositivo encargado de transformar la corriente continua (CC) generada por los paneles fotovoltaicos en corriente alterna (CA), que es la forma de electricidad utilizada por la mayoría de los equipos eléctricos y la que se inyecta a la red eléctrica. Este componente es esencial en prácticamente cualquier instalación fotovoltaica conectada a consumo doméstico, industrial o a la red, ya que los paneles solares, por sí solos, no pueden alimentar directamente la mayoría de los aparatos eléctricos.

El funcionamiento de un inversor solar se basa en un proceso de conmutación electrónica. El dispositivo recibe la electricidad en corriente continua producida por los paneles y, mediante transistores y circuitos de control, genera una onda alterna con la misma frecuencia y tensión que la red eléctrica (en Europa, 230 V y 50 Hz). En instalaciones aisladas, el inversor produce una onda alterna estable, independiente de la red, para alimentar el consumo. Además, muchos inversores modernos incorporan funciones adicionales, como el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para optimizar la energía extraída de los paneles, monitorización en tiempo real y protección contra fallos eléctricos. Existe variedad en los tipos de inversores, ajustándose cada tipo a diferentes funcionalidades.

Inversores centrales: estos equipos concentran la energía de un gran número de paneles solares conectados en paralelo y la convierten en corriente alterna en un único punto. Se utilizan principalmente en plantas fotovoltaicas a gran escala, donde su alta capacidad (de cientos de kW a varios MW) permite reducir costes de instalación y mantenimiento por unidad de potencia instalada. Su principal ventaja es la economía de escala, pero presentan la desventaja de que una avería en el inversor puede afectar a una parte considerable de la producción.

Inversores string: son los más comunes en instalaciones residenciales y comerciales medianas. Gestionan uno o varios “strings” (series) de paneles conectados entre sí, convirtiendo su corriente continua en alterna. Ofrecen un equilibrio entre coste, eficiencia y facilidad de mantenimiento, y permiten cierta flexibilidad en el diseño. Sin embargo, si un panel del string se sombrea o reduce su producción, afecta a toda la serie.

Microinversores: se instalan directamente en cada panel o en grupos muy pequeños, de modo que cada módulo trabaja de forma independiente. Esto evita

TEORÍA DE LOS ELEMENTOS A UTILIZAR

pérdidas de rendimiento por sombras parciales o fallos en otros paneles y facilita la ampliación del sistema. Son muy eficientes en instalaciones con condiciones de luz variables, aunque suponen un coste inicial más elevado y pueden requerir más intervenciones si hay fallos, ya que están dispersos en la estructura.

Inversores híbridos: combinan la función de conversión de corriente continua a alterna con la capacidad de gestionar sistemas de almacenamiento. Pueden trabajar conectados a la red, aislados o en modo mixto, cargando y descargando baterías según las necesidades. Ofrecen gran versatilidad y son ideales para instalaciones que buscan independencia energética, aunque su precio es más alto y su configuración requiere mayor complejidad técnica.

Inversores aislados: están diseñados para instalaciones sin conexión a la red, generando la corriente alterna directamente desde la energía almacenada en baterías. Algunos modelos incorporan reguladores de carga para optimizar el flujo energético desde los paneles a las baterías. Son fundamentales en entornos remotos, pero dependen completamente del almacenamiento y su autonomía queda limitada por la capacidad de las baterías instaladas.

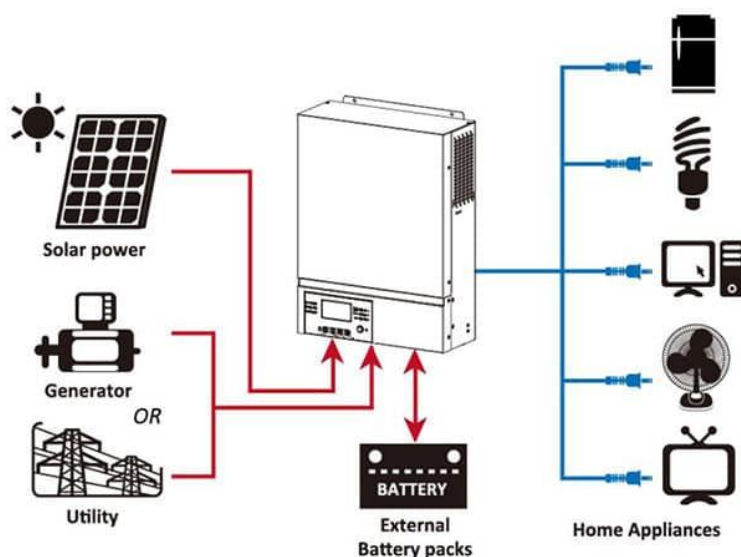


Ilustración 19. Funcionalidad de inversores. Fuente: Fotovoltaica Solar (2025).

(SotySolar, 2025; AutoSolar, n.d.)

CAPÍTULO 4. INVERNADERO TIPO

4.1 EMPLAZAMIENTO

4.1.1 CRITERIOS DE ELECCIÓN

La elección del emplazamiento para el invernadero se basó en la combinación de factores climáticos y energéticos, prestando especial atención a aquellos que permiten maximizar la eficacia del sistema de enriquecimiento con CO₂. Para que este proceso sea eficiente, resulta fundamental que las condiciones ambientales permitan mantener concentraciones elevadas durante largos periodos, evitando pérdidas por ventilación excesiva. En zonas con climas muy cálidos, las altas temperaturas obligan a ventilar con frecuencia, lo que provoca la rápida dispersión del CO₂ y reduce la eficiencia de la instalación. Por ello, se priorizaron emplazamientos con temperaturas moderadas, estabilidad térmica y baja incidencia de extremos, favoreciendo un control ambiental más preciso.

Junto a este criterio, se valoró también que el emplazamiento contara con un alto nivel de radiación solar a lo largo del año, condición imprescindible para optimizar la producción de energía mediante la instalación fotovoltaica. El objetivo fue encontrar un equilibrio entre la disponibilidad de recursos solares y la posibilidad de mantener las condiciones internas del invernadero que permitan aprovechar al máximo el CO₂ enriquecido. Esta combinación de clima templado y elevada insolación se consideró determinante para garantizar el rendimiento global del proyecto.

También se tuvo en cuenta que el emplazamiento ofreciera condiciones de baja variabilidad climática y ausencia de extremos térmicos, facilitando así un control ambiental más preciso y constante a lo largo del año. La combinación de alta radiación solar y clima templado fue considerada clave para lograr un equilibrio entre la producción energética y la eficiencia del sistema de enriquecimiento de CO₂.

4.1.2 UBICACIÓN ELEGIDA

Aplicando estos criterios, se identificaron áreas que combinaban alta radiación solar con un clima moderado que favoreciera el aprovechamiento del CO₂. Entre las opciones estudiadas, Tenerife, y en particular las zonas de media altitud situadas entre 600 y 900 metros en el sur y sureste de la isla, presentó las condiciones más favorables.

En términos energéticos, la isla cuenta con uno de los niveles de radiación solar más elevados de España, alcanzando valores medios superiores a 7 kWh/m² diarios, lo que asegura una producción fotovoltaica elevada y estable a lo largo de todo el año. Climáticamente, la altitud y la influencia oceánica mantienen temperaturas medias anuales de 18–19 °C, con escasa presencia de extremos térmicos, lo que reduce notablemente la necesidad de ventilación intensiva durante los meses cálidos.

Esta combinación permite que el sistema de enriquecimiento con CO₂ funcione con alta eficiencia, manteniendo concentraciones elevadas durante más tiempo gracias a la menor pérdida por ventilación. Al mismo tiempo, las condiciones de insolación garantizan el aporte energético necesario para alimentar los sistemas del invernadero, optimizando así el rendimiento conjunto de la instalación fotovoltaica y el sistema de control ambiental.

Junto con anomalía sobre el periodo 1981-2010

	Anomalía (°C)	Temperatura media (°C)
España peninsular	2,2	24
Baleares	2	26,2
Canarias	0,9	22,4

Tabla 9. Temperaturas medias en España en verano de 2022. Fuente: EPData (2025).

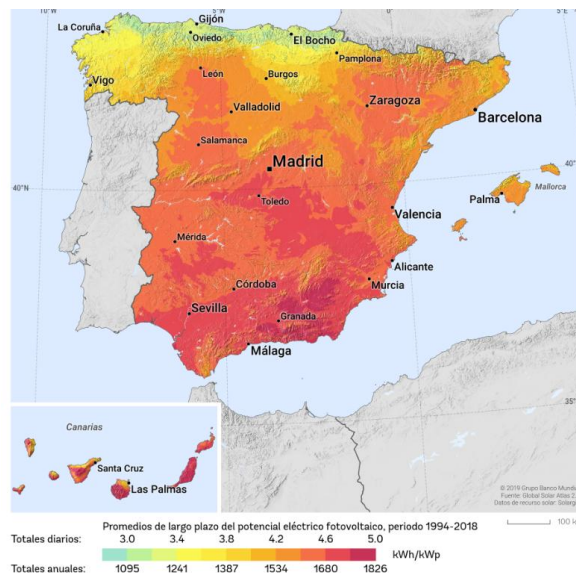


Ilustración 20. Potencial eléctrico fotovoltaico. Fuente: GlobalSolarAtlas (2024).

4.2 CULTIVO

4.2.1 CRITERIOS DE ELECCIÓN

La selección del cultivo se basó en criterios técnicos orientados a maximizar la eficiencia productiva y la rentabilidad del invernadero bajo condiciones de control ambiental avanzado. En primer lugar, se priorizó que presentara una respuesta positiva al enriquecimiento con CO₂. Esta característica permite aprovechar al máximo la inversión en sistemas de dosificación de CO₂ y optimizar la fotosíntesis, siempre que se mantengan condiciones adecuadas de temperatura, luz y humedad.

Asimismo, se buscó una adaptación óptima a climas templados, con un rango de temperatura que favorezca el crecimiento y reduzca la necesidad de ventilación intensiva. Este factor es clave para minimizar la pérdida de CO₂ por intercambio de aire y mantener una atmósfera interior enriquecida durante más tiempo. La estabilidad térmica y la ausencia de extremos favorecen un control más preciso del microclima y una mayor eficiencia del sistema.

Otro criterio fundamental fue la alta demanda lumínica, de modo que el cultivo pueda beneficiarse plenamente de la elevada radiación solar del emplazamiento. Un nivel elevado de luz, combinado con una concentración de CO₂ adecuada, permite alcanzar tasas fotosintéticas más altas y, en consecuencia, incrementos en la producción comercializable.

Finalmente, se consideró la viabilidad económica, evaluando la demanda del mercado, el valor de venta, la duración del ciclo productivo y la capacidad de generar ingresos estables a lo largo del año. Un ciclo prolongado facilita el aprovechamiento de la infraestructura y mejora el retorno de la inversión en sistemas de climatización, control ambiental y energía fotovoltaica.

4.2.2 CULTIVO ELEGIDO

La elección del pimiento (*Capsicum annuum*) como cultivo principal responde a criterios técnicos que maximizan la eficiencia del sistema de control ambiental y la rentabilidad del invernadero. Este cultivo presenta una respuesta fisiológica muy positiva al enriquecimiento con CO₂, con incrementos de rendimiento documentados de entre el 20 % y el 30 % cuando las concentraciones se mantienen en el rango de 800–1.000 ppm durante el periodo de luz. La tasa fotosintética se incrementa notablemente bajo estos niveles, especialmente si se asegura un adecuado balance de luz, temperatura y humedad.

En cuanto a adaptación climática, el pimiento muestra su óptimo productivo con temperaturas diurnas de 22–26 °C y nocturnas de 18–20 °C, evitando descensos por debajo de 16 °C y picos superiores a 30–32 °C. Esta exigencia se alinea con la necesidad de emplazamientos de clima templado, que reducen la ventilación excesiva y, por tanto, limitan la pérdida de CO₂.

Desde el punto de vista de la demanda lumínica, el cultivo requiere una densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) de 350–600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ como base, pudiendo aprovechar intensidades de hasta 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ cuando el CO₂ se mantiene elevado. El índice de luz diaria (DLI) óptimo se sitúa entre 20 y 30 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$, parámetros que resultan alcanzables en el emplazamiento elegido gracias a la alta radiación solar disponible.

En términos de rentabilidad, el pimiento presenta un ciclo de cultivo prolongado de 8 a 10 meses en invernadero, lo que permite un uso continuado de la infraestructura y una amortización eficiente de la inversión en sistemas de climatización y CO₂. A nivel comercial, ofrece un valor añadido elevado y demanda sostenida tanto en el mercado nacional como en exportación, con precios estables para variedades de calidad y calibre homogéneo.

La conjunción de estas características, alta respuesta al CO₂, compatibilidad con climas templados, elevada demanda lumínica y buena rentabilidad convierte al pimiento en un cultivo idóneo para explotar al máximo las sinergias entre el enriquecimiento con CO₂ y la producción de energía fotovoltaica, optimizando así la productividad global del sistema.

(Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017)

4.3 MODELO

4.3.1 TIPO DE INVERNADERO

Se modeló un invernadero con estructura tipo raspa y amagado, al ser esta la tipología más empleada en el cultivo de pimiento en las principales zonas productoras. Su uso extendido se debe a su bajo coste, facilidad de construcción y adaptación a las condiciones climáticas locales, lo que lo convierte en la opción más representativa para este tipo de instalaciones.

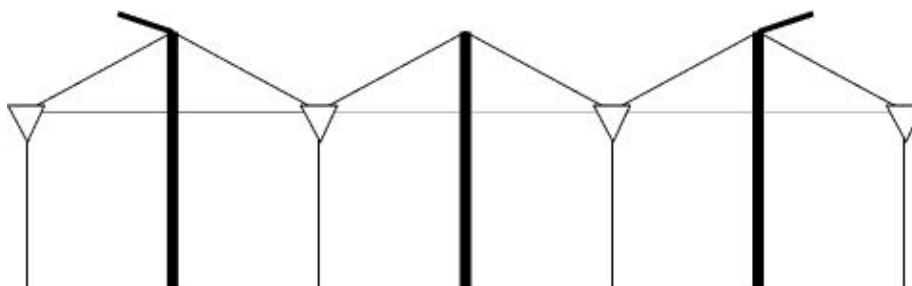


Ilustración 21. Estructura raspa y amagado. Fuente: Infoagro (n.d.).

4.3.2 TAMAÑO

En cuanto al tamaño de invernadero, dado que los tamaños más habituales de los invernaderos tipo raspa y amagado para el cultivo de pimiento se sitúan en un rango de entre 10.000 y 30.000 m², se optó por modelar un invernadero tipo de 18.000 m², representativo de la media industrial en este tipo de explotaciones.

El diseño previsto para el invernadero se desarrolló a partir de una configuración modular, con el objetivo de facilitar el manejo del cultivo. Para ello, se definió la separación en bloques de 100 metros de longitud y 60 metros de anchura, dimensiones habituales que permiten optimizar la superficie cultivable y, al mismo tiempo, garantizar un acceso adecuado para las labores de mantenimiento, riego y recolección. En cuanto a la altura, se estableció una altura lateral de 4 metros, suficiente para favorecer la circulación de aire a nivel del cultivo, mientras que la altura máxima en cumbrera será de 6 metros, lo que aporta un mayor volumen interno de aire. Este diseño será óptimo para crear condiciones más estables y adecuadas para el desarrollo del pimiento bajo invernadero.

Adicionalmente, en la región existen múltiples terrenos disponibles en el mercado que cuentan con las dimensiones necesarias para albergar una instalación de estas características, lo que asegura la viabilidad física del proyecto.

4.3.3 MATERIAL

El material seleccionado para la cubierta del invernadero tipo propuesto es el plástico de polietileno, dado que constituye la opción más utilizada en este tipo de estructuras para el cultivo de pimiento. El uso habitual de este material se entiende por su bajo coste, su facilidad de instalación, reparación y sustitución, factores de gran importancia en explotaciones agrícolas. Además, este material ofrece una adecuada transmisión de luz para el desarrollo del cultivo y puede incorporar aditivos que mejoran su comportamiento frente a la radiación ultravioleta, la condensación o la acumulación de polvo. Estas características, unidas a su amplia disponibilidad en el mercado y a la experiencia consolidada en las principales zonas productoras, justifican que se considere el plástico como la solución de referencia y la más adecuada para el modelo de invernadero a desarrollar.

CAPÍTULO 5. NORMATIVA

5.1 GENERAL

La implantación de un sistema de control ambiental en invernaderos que funcione mediante energía fotovoltaica está sujeta a un marco normativo amplio, que incluye tanto disposiciones generales de carácter nacional como regulaciones específicas en los ámbitos agrícola, energético y medioambiental.

5.1.1 ESTATAL

Ley 21/2013, de Evaluación Ambiental: Regula la necesidad de evaluación ambiental ordinaria o simplificada para proyectos con impacto potencial en el medio ambiente.

Ley 24/2013, del Sector Eléctrico: Marco general para la generación, distribución y autoconsumo de energía eléctrica en España.

Ley 31/1995, de Prevención de Riesgos Laborales: Obliga a garantizar la seguridad y salud de los trabajadores en la instalación y mantenimiento.

Código Técnico de la Edificación (CTE) y Documento Básico DB-HE: Regulan eficiencia energética y uso de energías renovables si la instalación se integra en una edificación legal.

Real Decreto-ley 23/2020: desarrolla procedimientos y garantías para acceso y conexión de instalaciones de generación eléctrica.

5.1.2 AUTONÓMICA Y MUNICIPAL

Ley 11/1997, de regulación del Sector Eléctrico Canario: facilita y simplifica la tramitación de conexiones y acometidas eléctricas en el archipiélago.

Ley 6/2022, de Cambio Climático y Transición Energética de Canarias: impulsa el autoconsumo, el abandono de energías fósiles y la integración renovable, especialmente en la administración pública.

Ordenanzas Municipales sobre residuos (Santa Cruz de Tenerife): regulan la gestión de residuos, incluyendo posibles impactos de la instalación (restos de obra, plásticos, etc.).

5.2 AGRARIA E INVERNADEROS

Real Decreto 1201/2002: Establece criterios para la producción integrada en cultivos hortícolas bajo invernadero.

Real Decreto 1938/2004: Programa nacional para el control de vectores de virus en cultivos, que condiciona el diseño estructural de los invernaderos.

Reglamento (UE) 2018/848: Normativa europea para la producción ecológica en invernaderos.

Ley de Aguas (Texto Refundido del Real Decreto Legislativo 1/2001): Aplicable si hay uso o concesión de recursos hídricos para riego o humidificación.

5.3 INSTALACIÓN ELÉCTRICA Y FOTOVOLTAICA

Real Decreto 244/2019, de 5 de abril → Regula modalidades de autoconsumo, compensación de excedentes y requisitos técnicos.

Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre → Condiciones técnicas y administrativas de conexión a red para instalaciones de pequeña potencia (<100 kW).

Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre → Normativa de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT) – Real Decreto 842/2002 → Requisitos técnicos y de seguridad para instalaciones eléctricas de baja tensión.

UNE-EN 62446-1:2016 → Norma técnica para la verificación, puesta en servicio y documentación de instalaciones fotovoltaicas conectadas a red.

5.4 CONTROL AMBIENTAL Y CO₂

Real Decreto 1891/2008, de 14 de noviembre: Regula el control de emisiones de gases fluorados en sistemas de climatización.

Real Decreto 487/1997: Prevención y control de la legionelosis, aplicable en sistemas de humidificación y nebulización.

UNE 170001 y normas técnicas de climatización en invernaderos: Incluyen estándares para control de temperatura, humedad y ventilación.

Directrices técnicas de seguridad para sistemas de enriquecimiento con CO₂: Basadas en normativas de prevención laboral (Ley 31/1995) y límites de exposición establecidos por INSST.

CAPÍTULO 6. INSTALACIÓN AMBIENTAL

6.1 CONDICIONES AMBIENTALES LOCALES

Para el diseño del sistema de control ambiental se necesitará primero conocer las condiciones ambientales de Tenerife, lugar para el emplazamiento del invernadero tipo.

En cuanto a las temperaturas, en Tenerife se mantienen suaves y estables durante todo el año. Las máximas oscilan entre los 21 °C en enero y los 28 °C en agosto y septiembre, mientras que las mínimas rara vez bajan de los 15 °C en invierno, alcanzando alrededor de 22 °C en los meses más cálidos. La temperatura media se sitúa generalmente entre 18 °C en los meses invernales y 25 °C en pleno verano.

Average	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
High	21°C	22°C	22°C	23°C	24°C	25°C	27°C	28°C	28°C	26°C	24°C	23°C
Temp.	18°C	18°C	19°C	19°C	21°C	22°C	24°C	25°C	24°C	23°C	21°C	19°C
Low	16°C	15°C	16°C	17°C	18°C	19°C	21°C	22°C	21°C	20°C	19°C	17°C

Tabla 10. Temperaturas en Tenerife. Fuente: WeatherSpark (2025)

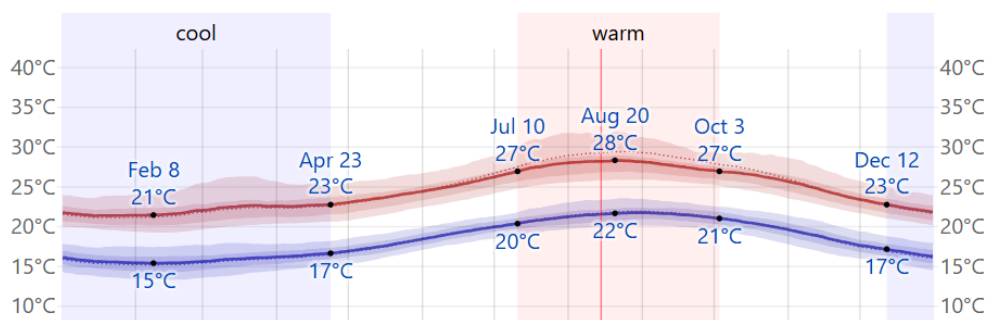


Ilustración 22. Temperaturas en Tenerife. Fuente: WeatherSpark (2025).

INSTALACIÓN AMBIENTAL

En cuanto a las condiciones de humedad relativa en la región, es comprensible que los datos sean altos ya que se trata de una isla. Teniendo en cuenta que las temperaturas son estables durante el año también es de esperar que la humedad relativa sea bastante estable como se puede ver en la siguiente tabla.

	enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	junio	julio	agosto	septiem- bre	octubre	noviem- bre	diciembre
Humedad(%)	71%	72%	74%	73%	74%	78%	79%	79%	77%	76%	72%	71%

Tabla 11. Humedad relativa media en Tenerife. Fuente: Climate-Data (2022)

Por último, en cuanto a la concentración de CO₂ ambiental en la región de Tenerife, a lo largo de los últimos años el crecimiento en la concentración ha sido constante habiendo alcanzado máximos históricos este mismo año llegando a 430ppm como se puede ver en la siguiente gráfica.

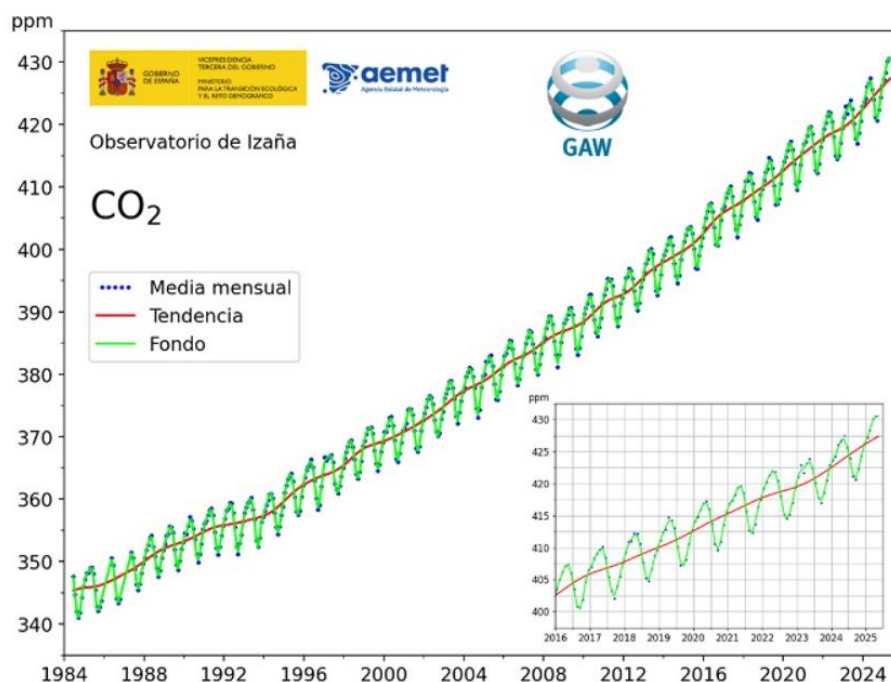


Ilustración 23. Concentración de CO₂ en Izaña, Tenerife. Fuente: AEMET (2025).

6.2 CONDICIONES IDEALES PARA EL CULTIVO

El pimiento es un cultivo especialmente sensible a las variaciones de temperatura. En un invernadero, la temperatura del aire debe situarse entre 15 °C y 30 °C, ya que valores superiores a 30 °C dificultan el crecimiento de frutos y provocan tanto marchitez en las hojas como pardeamiento en los frutos. Para favorecer un buen desarrollo vegetativo, se recomienda mantener durante el día temperaturas de 20 °C a 25 °C, y por la noche entre 16 °C y 18 °C. En la fase de fructificación, las condiciones óptimas se alcanzan con temperaturas diurnas de 26 °C a 28 °C y nocturnas de 18 °C a 20 °C. El sustrato debe conservarse a una temperatura superior a la del aire, ya que valores por debajo de 15 °C en el mismo afectan negativamente al crecimiento de las raíces, al desarrollo vegetativo y a la floración.

En cuanto a la humedad relativa, lo más favorable para el cultivo es mantenerla en torno al 75 %. La aplicación de enriquecimiento con dióxido de carbono, en concentraciones de entre 800 y 1 000 ppm, favorece tanto el crecimiento como la producción. Además, este cultivo es muy sensible a las corrientes de aire, que deben evitarse para preservar su buen estado y rendimiento.

(Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017)

6.2.1 EFECTO DEL CO₂ EN EL CULTIVO

La motivación principal para implementar el enriquecimiento con CO₂ en cultivos de invernadero es incrementar la producción. Diversos estudios han demostrado de forma consistente que este incremento se produce, sin embargo, la magnitud de este, en relación con los costes asociados a su aplicación, es el factor decisivo para determinar si esta práctica resulta o no rentable desde el punto de vista económico.

El rendimiento final de un cultivo está condicionado tanto por la cantidad de frutos obtenidos como por el peso de cada uno de ellos. En el caso del enriquecimiento con CO₂, los incrementos productivos observados suelen estar vinculados, en mayor medida, a un aumento en el número de frutos generados. También se han

registrado mejoras en el peso medio de los frutos en especies como pepino, tomate y berenjena, aunque este efecto no se ha constatado en el cultivo de pimiento.

La respuesta de los cultivos al enriquecimiento con CO₂ suele reflejarse en incrementos de la producción de frutos que, según Kimball (1983), pueden oscilar entre un 14 % y un 61 %, dependiendo de la especie, las condiciones de cultivo y la forma en que se gestione el enriquecimiento (fuente utilizada, dosis aplicada y estrategia seguida, entre otros factores). En un análisis posterior, Kimball (1986b) estimó que, en especies C3, duplicar la concentración atmosférica de CO₂ genera un aumento medio de la producción del 34%, (Kimball, 1993). Resultados similares fueron reportados por Cure (1985) y Allen (1991), quienes documentaron incrementos promedio del 33%.

(Alonso Ramírez, 2011)

6.2.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL CULTIVO

En cuanto a la motivación principal para implementar sistemas de control de temperatura, se encuentra que la producción de fruto puede verse afectada significativamente atendiendo a esta variable y se busca que la producción sea óptima. Se registran perjuicios tanto por exceso de temperatura como por defecto.

Cuando las temperaturas descienden por debajo de los 15 °C, el crecimiento del pimiento se ralentiza de forma considerable, ya que la actividad enzimática y los procesos metabólicos de la planta disminuyen. En estas condiciones, la floración se retrasa y la tasa de cuajado de frutos se reduce, aumentando el riesgo de caída de flores y frutos pequeños. Además, el desarrollo vegetativo se vuelve irregular, con plantas más débiles y un retraso generalizado en la maduración. Este ambiente frío también incrementa la susceptibilidad a enfermedades, debido a que la planta destina más recursos a sobrevivir que a crecer. Como consecuencia, la producción final se ve reducida tanto en cantidad como en calidad, afectando la rentabilidad del cultivo.

Cuando las temperaturas superan los 30-32 °C, el cultivo de pimiento empieza a sufrir un marcado estrés térmico. En estas condiciones, la fotosíntesis se ve limitada y aumenta la transpiración, lo que provoca un desequilibrio energético en

INSTALACIÓN AMBIENTAL

la planta. Uno de los efectos más graves es la reducción drástica en la cuaja de frutos, las flores abortan con facilidad y los frutos recién formados caen antes de desarrollarse. Estudios experimentales han demostrado que un aumento de tan solo 2 °C en la fase de floración puede reducir la producción en torno al 50 %, y que temperaturas extremas cercanas a los 39 °C pueden ocasionar pérdidas de hasta un 87 %. Además, el calor excesivo favorece la aparición de desórdenes fisiológicos y da lugar a frutos deformados, con problemas de coloración y menor calidad comercial.

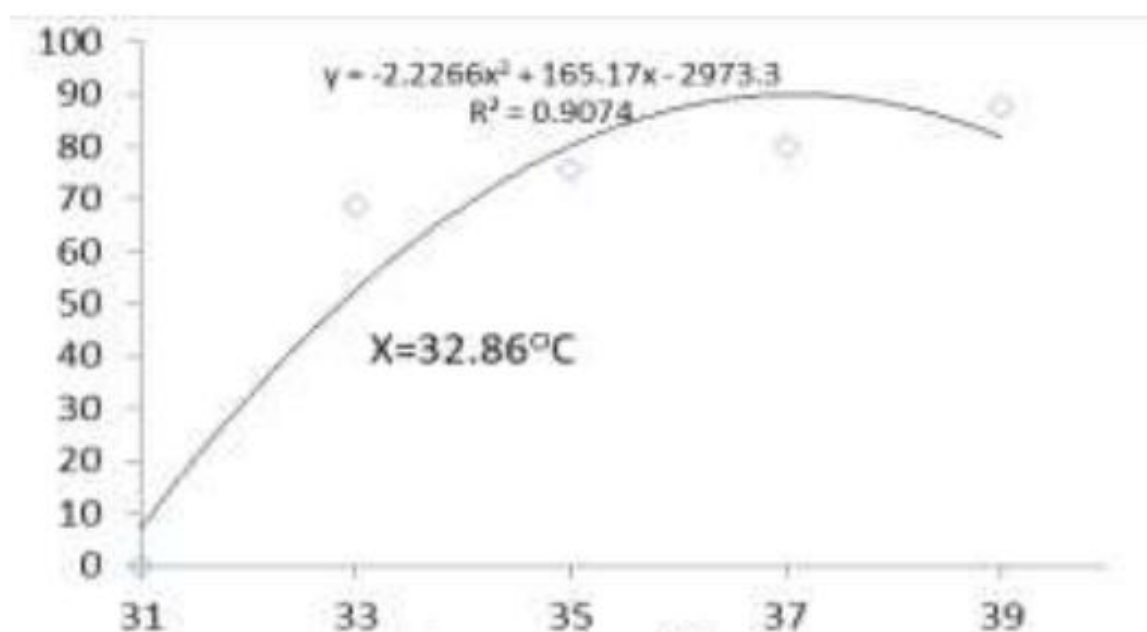


Ilustración 24. Reducción en la producción de fruto con respecto a la temperatura. Fuente: Rosmaina & Zulfahmi (2022).

(Rosmaina & Zulfahmi, 2022)

6.2.3 EFECTO DE LA HUMEDAD EN EL CULTIVO

La humedad relativa dentro del invernadero constituye un factor determinante para el correcto desarrollo del cultivo de pimiento. Mantenerla fuera de los rangos adecuados puede generar efectos negativos tanto a nivel fisiológico de la planta como en la sanidad del cultivo y la calidad final del fruto.

Cuando la humedad relativa es demasiado elevada, por encima del 80-85 %, se reduce la transpiración de la planta y, con ello, la absorción de nutrientes esenciales, lo que afecta al crecimiento y a la consistencia del fruto. Además, estas condiciones dificultan la viabilidad del polen y reducen la eficacia de la polinización y el cuajado, provocando una menor producción. El exceso de humedad también favorece la aparición de condensaciones sobre hojas y frutos, lo que genera un ambiente propicio para el desarrollo de enfermedades fúngicas y bacterianas como botritis, oídio o mildiu, que comprometen tanto la salud de la planta como el rendimiento global del cultivo.

En contraste, una humedad relativa demasiado baja, inferior al 50-55 %, incrementa la transpiración hasta niveles que pueden provocar estrés hídrico en la planta, incluso aunque el riego sea suficiente. Esto ocasiona marchitez, caída de flores y aborto de frutos recién cuajados, reduciendo notablemente la producción. Asimismo, la baja humedad favorece el endurecimiento del polen, lo que disminuye la fecundación, y aumenta la incidencia de fisiopatías como la necrosis apical del fruto (blossom-end rot), cuya frecuencia se ve incrementada de manera significativa en condiciones de sequedad ambiental. Por otro lado, ambientes secos tienden a favorecer plagas como trips, araña roja o mosca blanca, que encuentran en estas condiciones un entorno favorable para su propagación.

(Muñoz, Antón, & Montero, 2004; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017)

6.3 SELECCIÓN DE ELEMENTOS

6.3.1 CALEFACCIÓN

La tecnología seleccionada para la calefacción del invernadero es la caldera de combustión, debido a la sinergia que presenta con el sistema de regulación de CO₂. Este tipo de instalación no solo permite mantener unas condiciones térmicas óptimas para el desarrollo de los cultivos, sino que además posibilita el aprovechamiento de los gases de combustión para enriquecer el ambiente con dióxido de carbono. De esta forma, se logra un doble beneficio, por un lado, se garantiza la temperatura adecuada en el interior del invernadero, y por otro, se incrementa la concentración de CO₂ disponible para las plantas, lo que favorece el proceso de fotosíntesis y, en consecuencia, mejora la productividad del cultivo.

A la hora de seleccionar las tecnologías a implementar en el invernadero, lo primero es conocer las necesidades energéticas. Dadas las condiciones ideales del cultivo se ha decidido que la temperatura que se mantendrá en el invernadero en el periodo diurno será de 25 °C mientras que en el periodo nocturno será de 18 °C. Adicionalmente, ya que en la época de fructificación se quiere que las temperaturas sean ligeramente superiores, se diseñará el sistema para que sea capaz de llevar la temperatura hasta los 28 °C ideales en esta fase. De esta forma, dadas las condiciones ambientales locales, el sistema de climatización debe diseñarse para cubrir un rango de temperaturas comprendido entre 15 °C y 28 °C. Para garantizar su correcto funcionamiento, resulta necesario dimensionar la instalación de manera que cuente con la potencia suficiente para satisfacer las demandas térmicas del invernadero. Esto supone la elección de equipos con la capacidad adecuada para aportar la energía necesaria.

Para determinar la potencia necesaria del sistema se deben tener en cuenta múltiples factores como son las temperaturas deseadas y temperaturas exteriores, tipo de cultivos, ventilación, radiación y otros muchos aspectos. Con el fin de determinar la potencia necesaria se han revisado y contrastado diversos suministradores y proveedores y finalmente, con el objetivo de hacer más simple el estudio, se usa como referencia la guía del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) llamada “Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura”,

más en concreto la sección titulada “Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos”.

De esta forma se obtiene que la potencia térmica necesaria depende fundamentalmente del gradiente de temperatura existente entre la temperatura exterior y las deseadas. Atendiendo a este criterio se obtiene un gradiente de 13 °C que nace de los 15 °C de mínima durante el año y los 28 °C óptimos en las fases de fructificación. Se tomará de esta forma ya que, a pesar de que el periodo más habitual para la fructificación es el verano, fase de mayor calor, el periodo para la recogida de fruto no es anual por lo que si se desea ser eficiente durante todo el año esto será lo óptimo.

Tomando estos datos y haciendo uso de la guía mencionada previamente se concluye que la potencia de las calderas necesaria será de aproximadamente 121 W/m². Se toma esta medida como la medida requerida para un diferencial térmico de 15 °C dejando un pequeño margen para ajustar en caso de que las temperaturas mínimas sufran picos.

Para demostrar que el valor que se estima es correcto se pueden aplicar diversos métodos, en este caso se hará uso de la siguiente ecuación propuesta por ASAE (2000)

$$H_g = U A (T_i - T_o)$$

H_g = Necesidad de calefacción (W)

U = Coeficiente de pérdida ($W m^{-2} K^{-1}$)

A = Superficie (m^2)

T_i = Temperatura interior (K)

T_o = Temperatura exterior (K)

INSTALACIÓN AMBIENTAL

Se obviará el término A correspondiente a la superficie para hacer el cálculo por unidad de área. De esta forma, si nos guiamos por la referencia de ASAE (2000) para determinar el coeficiente de pérdida.

Covering materials	U value W/m ² /K)
Single glass	6.0–8.8
Double glass, 9 mm air space	4.2–5.2
Double acrylic 16 mm	4.2–5.0
Single plastic	6.0–8.0
Double plastic	4.2–6.0
Single glass plus energy screen of	
- single film, non-woven	4.1–4.8
- aluminized single film	3.4–3.9

Tabla 12. Coeficiente de pérdidas con viento a n m/s. Fuente: ASAE (2000)

Teniendo en cuenta que el invernadero tipo se modela en plástico y que la región de Tenerife es una zona con vientos frecuentes como se puede observar en el siguiente gráfico y tabla.

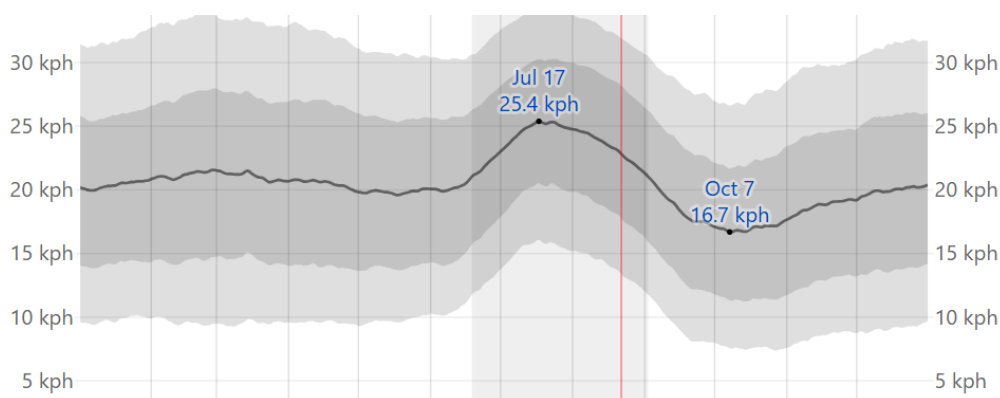


Ilustración 25. Velocidad del viento media diaria. Fuente: WeatherSpark (2025).

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Wind Speed (kph)	20.4	21.2	21.0	20.5	19.9	21.0	24.8	23.2	18.6	17.0	18.8	20.0

Tabla 13. Velocidad del viento media mensual. Fuente: WeatherSpark (2025).

INSTALACIÓN AMBIENTAL

De esta forma se tiene que tomando un gradiente térmico de 15 °C y asumiendo un coeficiente de pérdidas de 8.0 se obtiene.

$$H_g = 8 * 15 = 120 \text{ W/m}^2 \approx 121 \text{ W/m}^2$$

Como se puede comprobar este valor se acerca mucho al valor estimado previamente por lo que se podrá tomar como válido. Dado el cálculo de la potencia necesaria se procederá a la elección de la caldera que se modelará para este proyecto.

De esta manera, tomando que el tamaño del invernadero tipo será de 18000 m² la potencia necesaria de la caldera de combustión será de al menos 2178 kW. Dados estos valores, el dispositivo elegido para el sistema de calefacción será la caldera de combustión EUROMAX S 2330 kW alimentada por gasóleo, provista por la empresa YGNIS.



Ilustración 26. Caldera EUROMAX S. Fuente: YGNIS (2025).

Se ha seleccionado la empresa YGNIS como proveedor de la caldera de combustión debido a su reconocida trayectoria y prestigio en el sector. La

INSTALACIÓN AMBIENTAL

compañía cuenta con una amplia experiencia en el diseño y fabricación de equipos de calefacción industrial, lo que garantiza altos estándares de calidad, fiabilidad y eficiencia en sus productos. Esta especialización convierte a YGNIS en una opción adecuada para cubrir las necesidades del invernadero, aportando la seguridad de disponer de maquinaria robusta y probada en instalaciones de similares características.

En cuanto a las especificaciones técnicas de la caldera encontramos las siguientes características

EUROMAX S	Unidad	1170	1455	1745	2330	2910
Potencia*	kW	1.170	1.455	1.745	2.330	2.910
Consumo Gas** (metano)	Nm ³ /h	135	168	202	231	270
Consumo ** Gasóleo	kg/h	109	136	163	187	217
Pérdida de carga (lado de los humos)	mbar	4	4	4	4	4
Volumen de agua	m ³	1.791	2.178	2.270	2.600	2.848
Peso de vacío de modelo de 10 bar***	kg	2.993	3.704	4.086	4.561	6.147
Caudal másico de humo de la caldera de 10 bar (Gas metano)	g/sec	564	701	841	964	1123
LongitudTotal (A)	mm	3.290	3.649	3.790	3.990	4.295
Ancho Total (B)		1.485	1.546	1.576	1.698	1.831
Altura Total (C)		1.680	1.745	1.776	1.815	1.987
D		2.215	2.570	2.700	2.915	3.210
E		920	950	960	1.040	1.145
F		790	820	830	910	1015

Tabla 14. Especificaciones técnicas EUROMAX S. Fuente: YGNIS (2025)

INSTALACIÓN AMBIENTAL

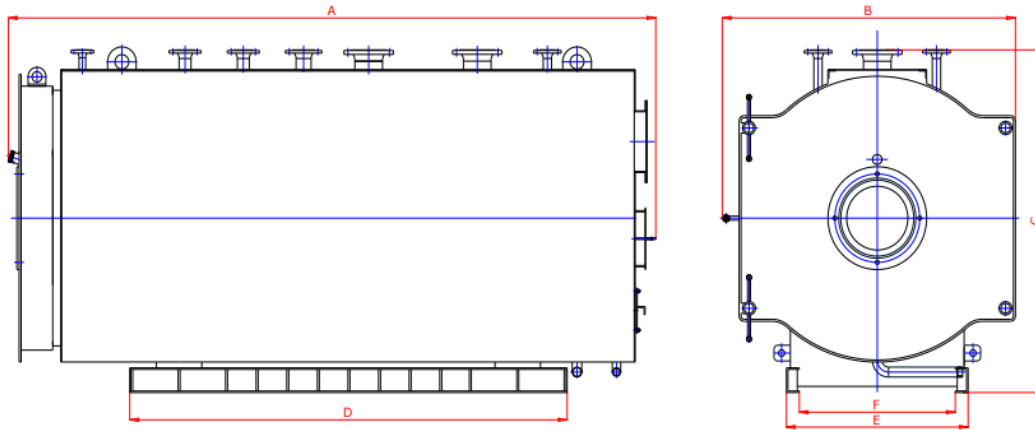


Ilustración 27. Caldera EUROMAX S. Fuente: YGNIS (2025).

En cuanto a su funcionamiento, la caldera seleccionada corresponde a un modelo de agua sobrecalentada, diseñada para trabajar a temperaturas superiores a los 100 °C sin llegar a generar vapor. Su funcionamiento se basa en el calentamiento del agua mediante la combustión de gasoil en la caldera, transmitiendo el calor a través de superficies de intercambio térmico. El agua circula a presión elevada, lo que permite alcanzar temperaturas muy superiores al punto de ebullición sin que se produzca evaporación. Este tipo de caldera resulta especialmente adecuada para aplicaciones industriales y agrícolas, ya que suministra un fluido térmico con gran capacidad de transferencia de calor, garantizando un aporte energético constante y estable para los sistemas de calefacción del invernadero. En cuanto a la presión necesaria para la caldera, dado que el invernadero tipo es relativamente grande, se puede esperar trabajar con aguas a temperaturas de hasta 120 °C. La proveedora ofrece el modelo EUROMAX S con capacidad de alcanzar un amplio rango de presiones, de 6-16 bar. Para este proyecto el modelo con capacidad de 6 bar será más que suficiente, incluso dejando margen de seguridad.

<i>T/°C</i>	<i>P / mmHg</i>	<i>P / hPa</i>
115	1267.98	1690.50
120	1489.14	1985.36
125	1740.93	2321.05

Tabla 15. Presión de vapor del agua líquida.

INSTALACIÓN AMBIENTAL

Uno de los principales componentes de la caldera es el quemador, que también será provisto por YGNIS. El quemador es el componente encargado de realizar la mezcla de combustible y aire en la caldera, asegurando la combustión adecuada para generar el calor necesario. En una caldera de agua sobrecalentada, el quemador se sitúa en la cámara de combustión e inyecta el combustible, en este caso gasóleo, en forma pulverizada o gaseosa. Mediante un ventilador integrado, se introduce también el caudal de aire requerido para que la mezcla sea homogénea y se queme de manera eficiente. Una vez encendido, el quemador mantiene una llama estable y controlada, cuya energía térmica se transfiere a los tubos de la caldera, calentando el agua a la temperatura de operación establecida.

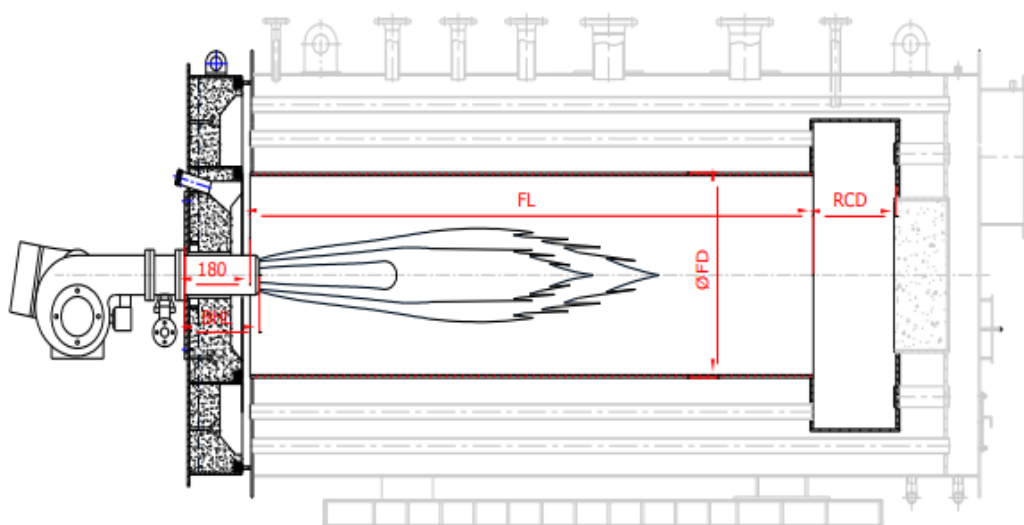


Ilustración 28. Esquema de quemador. Fuente: YGNIS (2025).

Su correcto ajuste es esencial para optimizar el rendimiento. Para la elección de las características del quemador se seguirá el consejo de la empresa proveedora, asegurando un correcto rendimiento y compatibilidad total con la caldera. Por tanto, se tomarán las especificaciones correspondientes a la caldera seleccionada de 2330 kW provistas en la siguiente tabla.

INSTALACIÓN AMBIENTAL

EUROMAX S	Unidad	1170	1455	1745	2330	2910	3500
Potencia nominal	kW	1.300	1.617	1.939	2.589	3.233	3.889
Ø cámara de combustión* (ØFD)	mm	650	700	754	776	874	920
Longitud cam. Comb. (FL)	mm	2.260	2.630	2.760	2.960	3.260	3.615
Profundidad de la cámara de inversión (RCD)	mm	430	430	430	430	430	430
Pérdida de carga	mbar	4	4	4	4	4	4
Longitud de la tobera** (BHL)	mm	210	210	210	210	210	210

Tabla 16. Especificaciones técnicas del quemador. Fuente: YGNIS (2025)

Adicionalmente, YGNIS ofrece los siguientes accesorios necesarios para la caldera

Definición	Cant.	Especificaciones especiales
Accesorios caldera		
Válvula de impulsión	1	
Válvula de retorno	1	
Válvula de descarga	1	
Válvula de seguridad	2	Apertura total, accionada por resorte
Presostato	2	Control de presiones de funcionamiento mín. y max.
Manómetros	2	Ø160 mm 0-25 bar
Transmisor de presión	1	0-25 bar si se controla mediante PLC
Llave del manómetro	2	Válvula de tres vías 3 vías 1/2"
Termómetro	2	Analógico, Ø160 mm 0-250 °C
Termómetro de resistencia	3	Pt 100
Termostatos	2	4/210°C, para límite y seguridad
Flujostato	1	
Electrodo de control de nivel mín. (opcional)	1	ON/OFF
Bomba de recirculación	2	

Tabla 17. Accesorios para EUROMAX S. Fuente: YGNIS (2025)

De todos los accesorios ofrecidos por YGNIS merece la pena destacar la bomba de recirculación ya que es un elemento que solamente se utiliza en este tipo de calderas. La función principal de la bomba de recirculación es garantizar la circulación del agua por la instalación, superando las pérdidas de carga del

INSTALACIÓN AMBIENTAL

sistema. La temperatura nominal de la bomba de recirculación debe ser superior a la temperatura de funcionamiento del sistema.



Ilustración 29. Bomba de recirculación. Fuente: YGNIS (2025).

En cuanto a la instalación y adecuación del sistema, dado que YGNIS actúa únicamente como fabricante de la caldera de combustión, será necesario recurrir a empresas instaladoras especializadas para llevar a cabo el montaje completo del sistema. Estas empresas no solo se encargarán de la instalación de la caldera, sino también de la provisión e integración de los elementos auxiliares requeridos, tales como tuberías, válvulas, bombas, sistemas de control y seguridad, pudiendo adquirir algunos de estos de YGNIS o proveedores alternativos. De esta manera, se asegura que el conjunto funcione de forma correcta y eficiente, cumpliendo con los estándares técnicos y normativos aplicables.

En este ámbito, pueden intervenir tanto grandes contratistas industriales como Elecnor, Veolia o Acciona, como empresas especializadas en climatización agrícola tales como ClimaGas, Termofrío o Infrico. Estas entidades se encargan del montaje hidráulico, la conexión al sistema de distribución de calor dentro del invernadero y la integración de la caldera con los equipos auxiliares, asegurando que el conjunto cumpla con la normativa técnica y ofrezca un funcionamiento seguro y eficiente.

6.3.2 REFRIGERACIÓN

En cuanto a la necesidad de refrigeración, atendiendo a los datos mencionados anteriormente, será necesario instalar algún sistema que reduzca la temperatura en el interior del invernadero ya que, a pesar de que en la isla las temperaturas son relativamente estables, en ocasiones surgen picos de hasta los 36 °C lo que podría arruinar las cosechas y reducir enormemente la productividad y rentabilidad del sistema.

De esta forma, para el proyecto se ha optado por la colocación de mallas de sombreo blancas con un nivel del 35 %. Esta solución resulta mucho más económica y rentable que la instalación de un sistema de refrigeración industrial, cuyo coste de inversión y operación sería considerablemente superior. Además, se considera que estas mallas son suficientes para cubrir las necesidades del invernadero, ya que permiten una reducción de la temperatura interior de hasta 8 °C respecto a las condiciones externas seleccionando las adecuadas. De este modo, se garantiza un ambiente adecuado para el cultivo del pimiento, evitando episodios de estrés térmico sin comprometer la radiación solar necesaria para el desarrollo del cultivo.

Otro motivo que justifica la elección de mallas de sombreo blancas del 35 % es que en la zona de estudio las temperaturas extremas de 36 °C se alcanzan en contadas ocasiones y, además, el tiempo de exposición a estos valores es muy reducido. En este contexto, emplear mallas con un mayor porcentaje de sombreo no sería conveniente, ya que reducirían en exceso la radiación disponible para el cultivo, lo que podría repercutir de manera negativa en la producción. Con un sombreo del 35 %, en cambio, la disminución en la productividad es muy poco significativa y se logra un equilibrio adecuado entre protección frente al calor y aprovechamiento de la luz solar.

Parameters	N ₀	N ₁
	(non-shade)	(25%shade)
Number of Fruits per plant	7.73 c	6.25 b
Length of Fruit per plant	3.54 b	3.59 b
Weight per fruit	1.75 b	1.82 b

Tabla 18. Reacción a varios niveles de sombreo. Fuente: Kesumawati & Rahmawati (2020)

INSTALACIÓN AMBIENTAL

Como se puede observar en la tabla, con sombreados cercanos al 25% la producción de fruto a penas baja un 20% con respecto a un modelo sin sombreado (mucho menos de lo que bajaría en caso de no utilizar un sistema para reducir la temperatura del invernadero). Adicionalmente se observan ligeros incrementos tanto en tamaño como en el peso del fruto. Se debe tener en cuenta que los datos de la tabla surgen de un experimento en el que se aplico cada nivel de sombreado durante todo el proceso desde el sembrado hasta la recogida de los frutos por lo que es de esperar que en el invernadero tipo de este proyecto los efectos sean mucho menos significativos ya que el sombreado se aplicará ocasionalmente, cuando las temperaturas superen valores críticos, dichos valores siendo muy poco comunes a lo largo del año.

Tomando todo lo comentado en cuenta y habiendo contrastado diversos proveedores del sector, el proveedor seleccionado será la empresa MACOGLASS (MACOGLASS S.L.). Se trata de una empresa con sede en Valladolid que opera nacionalmente y ofrece precios competitivos. La empresa con más de 25 años de experiencia en el sector ofrece todo tipo de productos y accesorios populares en el sector hortícola.

De esta forma, el producto seleccionado para la instalación en el invernadero será las mallas de sombreado MALBL24005. Estas son ideales para las necesidades del proyecto ya que aportan un sombreado del 35%. Adicionalmente, al ser blancas serán de especial utilidad para reducir la temperatura interna del invernadero ya que reflejarán una mayor cantidad de radiación solar.

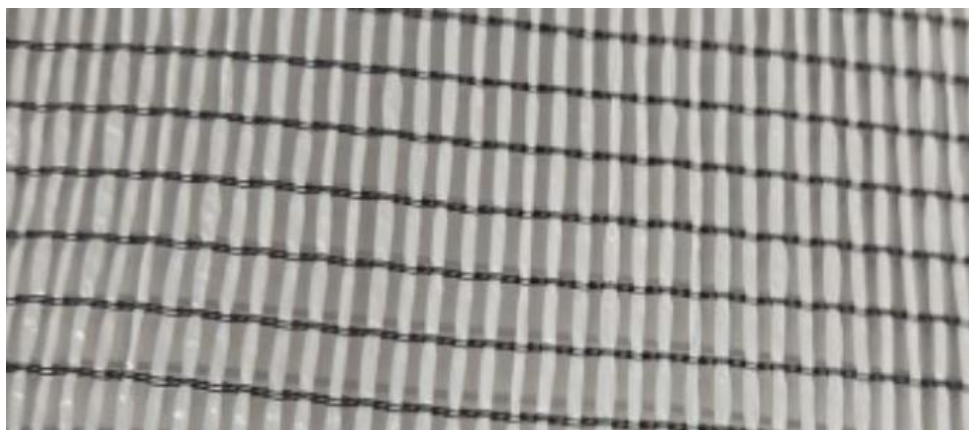


Ilustración 30. Mallas de sombreado MALBL24005. Fuente: MACOGLASS (2025).

INSTALACIÓN AMBIENTAL

MEDIDAS	3 x 100 m
COLOR	BLANCO
MATERIAL	HDPE (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD)
PESO MEDIO	50 g/m ²
PESO TOTAL	17 Kg
SOMBREO	35%

Tabla 19. Especificaciones de las mallas MALBL24005. Fuente: MACOGLASS (2025)

En cuanto a la instalación de las mallas, se colocarán en el exterior del invernadero ya que resulta más eficaz para la reducción de temperatura, debido a que la radiación solar se bloquea antes de penetrar en la estructura. De este modo, se evita que el calor se acumule en el interior, lo que mejora la eficiencia del sombreado y reduce la necesidad de otros sistemas de refrigeración. Además, esta disposición permite una mayor durabilidad de los materiales plásticos y de la propia estructura del invernadero, al disminuir la exposición directa a la radiación.

6.3.3 CO₂

Como se mencionó anteriormente, la elección de las calderas de combustión estuvo motivada en parte por la sinergia que generan con la estrategia de mantener una concentración elevada de CO₂ en el interior del invernadero. Este tipo de equipos, además de aportar la energía térmica necesaria para la calefacción, producen como subproducto gases de combustión que pueden ser aprovechados para enriquecer el ambiente interno con CO₂. De esta forma, se cubren simultáneamente las necesidades de climatización y se favorece la fotosíntesis de los cultivos, incrementando la eficiencia global del sistema.

Sin embargo, dado que la generación de gases de combustión está directamente vinculada al funcionamiento de la caldera y, por tanto, a la necesidad de

calefacción del invernadero, en aquellas épocas del año en las que no se requiera aporte térmico no se producirá CO₂ adicional para el enriquecimiento del ambiente. Esto implica que el aprovechamiento de este subproducto queda condicionado a las demandas de climatización, limitando su disponibilidad en periodos más cálidos o de menor necesidad energética.

A pesar de lo señalado, y teniendo en cuenta las condiciones de temperatura propias de la zona, la caldera se empleará durante la mayor parte del año, salvo en situaciones puntuales en las que no sea necesario aportar calefacción. Por este motivo, el efecto de la falta de generación de CO₂ en determinados periodos no resultará especialmente significativo dentro del funcionamiento global del sistema.

Lo primero que se requiere para este estudio es determinar la cantidad de CO₂ necesaria para alcanzar una concentración adecuada en el invernadero. En este caso, se establecerá como condición de referencia un nivel de 800 ppm, ya que se encuentra dentro del rango óptimo para el desarrollo de los cultivos. No se prevé llegar hasta los 1000 ppm, puesto que el incremento de la producción en relación con el aumento de CO₂ presenta un comportamiento asintótico, lo que implica que, a partir de cierto punto, el beneficio adicional obtenido resulta marginal frente al coste de mantener concentraciones más elevadas. Adicionalmente, se ha fijado dicho nivel para dejar un margen de seguridad, evitando superar concentraciones a partir de las cuales las plantas pueden sufrir efectos negativos. Por ello, se considera que 800 ppm representa un equilibrio adecuado entre productividad y rentabilidad.

De esta forma, para determinar la cantidad de CO₂ que será necesario aportar se hará uso de las siguientes ecuaciones.

Como se indicó anteriormente, en la actualidad la concentración de CO₂ ambiental en la zona de Tenerife asciende hasta los 430 ppm. De esta forma lo que se debe conseguir es aumentar esta concentración hasta los 800 ppm, por lo que se necesitará aportar 370 ppm.

$$\Delta C = C_f - C_i = 800 - 430 = 370 \text{ ppm}$$

INSTALACIÓN AMBIENTAL

Para el cálculo de la cantidad de CO₂ correspondiente a los 370 ppm calculados se hará uso de la siguiente ecuación utilizada para calcular la concentración

$$ppm = \frac{V_{CO_2}}{V_{aire}} * 10^6$$

De esta forma se tendrá que para el volumen del invernadero tipo propuesto se obtiene

$$V_{CO_2} = \frac{ppm * V_{aire}}{10^6} = \frac{370 * 9 * 10^7 L}{10^6} = 33300 L$$

Adicionalmente se calcula cual es la masa de CO₂ por litro en estado gaseoso, para ello, con una temperatura media a lo largo del año de 21°C y asumiendo una presión de 1 atm se hará uso de la ecuación de gases ideales.

$$n = \frac{P * V}{R * T} = \frac{1 atm * 1 L}{0,082 \frac{L * atm}{K * mol} * 294 K} = 0,0415 mol/L$$

Conocidas las masas molares del C (12 g/mol) y O (16 g/mol) se obtiene que la masa molar de CO₂ es de 44 g/mol. De esta manera se consigue la masa por litro.

$$\frac{g}{L} = 0,0415 \frac{mol}{L} * 44 \frac{g}{mol} = 1,826 g/L = 0,001826 Kg/L$$

De esta forma, teniendo en cuenta el volumen de CO₂ necesario calculado previamente, se obtiene la masa necesaria.

$$Kg = 0,001826 \frac{Kg}{L} * 33300 L = 60,81 Kg$$

Tomando estos cálculos en cuenta ahora se debe determinar la capacidad de generar CO₂ que tiene la caldera dispuesta en el proyecto. YGNIS ofrece dentro de su catálogo calderas diseñadas para funcionar tanto con gasóleo como con metano, lo que permite adaptar el sistema a diferentes contextos y necesidades energéticas. En el caso del presente proyecto se ha considerado más conveniente la elección de gasóleo como combustible de referencia por dos motivos principales. El primero está relacionado con el propio proceso de combustión, ya que el gasóleo libera una cantidad mayor de CO₂ en comparación con el metano, lo que favorece el objetivo de enriquecer la atmósfera del invernadero con dióxido de carbono y potenciar así la fotosíntesis de los cultivos. El segundo motivo responde a las particularidades del emplazamiento, dado que en las Islas Canarias no existe una red de distribución de gas natural canalizado. Esto significa que el metano no está disponible mediante suministro por tubería, lo cual encarece y complica de manera notable su utilización al requerir soluciones alternativas como el transporte y almacenamiento en depósitos especiales. Por estas razones, el gasóleo se presenta como la opción más adecuada y viable tanto desde un punto de vista técnico como económico.

En cuanto a las emisiones en la combustión del gasóleo, se estima que, por cada litro de gasóleo, aproximadamente 0,84 kg, se consiguen 2,6 Kg de CO₂. Puede parecer que se esté violando la ley de conservación de la masa, pero en realidad no. La masa adicional surge del oxígeno del aire que reacciona con el carbono del gasóleo durante la combustión. Teniendo esto en cuenta se puede calcular la cantidad de gasóleo necesaria para satisfacer las necesidades. En este caso, dados los 60,81 Kg de CO₂ necesarios, se concluye que se requerirá de la combustión de 19,647 Kg de gasóleo.

Una vez conocida la cantidad de gasóleo requerida y la capacidad de funcionamiento de la caldera, se observa que esta no solo es suficiente para cubrir las necesidades de CO₂ del invernadero, sino que en realidad su potencial de

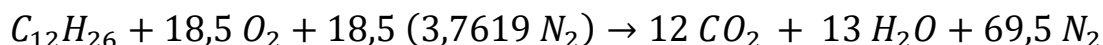
INSTALACIÓN AMBIENTAL

generación excede con creces la concentración deseada. Esto implica que no todo el volumen de gases producidos podrá ser introducido en el recinto, ya que se superaría el nivel óptimo y podría convertirse en una sustancia perjudicial. En consecuencia, será necesario liberar al exterior la parte sobrante de las emisiones, garantizando así que únicamente se aporte al invernadero la fracción de CO₂ estrictamente necesaria para mantener las condiciones óptimas de crecimiento.

Por este motivo, será imprescindible la instalación de sensores de CO₂ en el interior del invernadero, con el fin de monitorizar en todo momento la concentración presente en el ambiente. Estos dispositivos permitirán detectar de manera precisa cualquier desviación respecto al nivel óptimo establecido y activar los sistemas de control necesarios para evitar que se superen los valores recomendados. De esta forma, se garantiza un enriquecimiento carbónico seguro y eficiente, protegiendo a los cultivos frente a posibles excesos que puedan resultar perjudiciales para su desarrollo.

En cuanto al sistema, se modelará el caudal de gases de manera que el sistema sea capaz de alcanzar la concentración objetivo de CO₂ en el interior del invernadero en un plazo de 1 hora funcionando a máximo rendimiento, partiendo de una situación inicial de 0 ppm adicionales. Este criterio de diseño permitirá garantizar una respuesta rápida y eficiente del sistema, asegurando que los cultivos dispongan del nivel adecuado de dióxido de carbono en un tiempo razonable, sin comprometer su desarrollo ni la estabilidad de las condiciones ambientales internas, teniendo en cuenta que la tasa de reposición es de 0,5-1 renovaciones por hora.

De esta forma, si se atiende a las características técnicas de la caldera, dado que se produce un consumo de gasóleo de 187 kg/h, y dado que para alcanzar la concentración deseada solo es necesaria la combustión de 19,647 kg, solo será necesaria una fracción de los gases correspondiente al 10,5% de las emisiones totales. Por tanto, para determinar el caudal másico de las emisiones se debe conocer cual es la masa de gases que se produce por la combustión de cada kg de gasóleo. Aplicando estequiometría para la reacción de combustión en presencia de aire, se tiene que la reacción ideal será

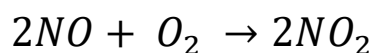
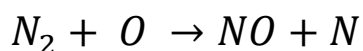


Tomando las masas molares del C (12 g/mol), O (16 g/mol), H (1 g/mol) y N (14 g/mol) se concluye que se obtienen 15,95 kg en gases emitidos por cada kg de gasóleo combustionado. Se obtiene este valor a raíz de la reacción ideal, aunque aparecen otros gases en la combustión como se mencionó anteriormente, estos son minoritarios por lo que se tomará este como el valor de referencia para calcular el caudal másico.

De esta manera, tomando el 10,5% de los gases emitidos se tendrá que el caudal másico destinado al invernadero será de 304 kg/h como máximo.

Tomando en consideración lo anterior, es importante señalar que las calderas de combustión no solo generan CO₂, sino también otros gases que pueden resultar perjudiciales para el ambiente del invernadero, como óxidos de nitrógeno o azufre. Por este motivo, será necesario evaluar el impacto que pueden tener estos compuestos sobre el cultivo y la productividad. Con ello se garantiza que el enriquecimiento carbónico se realice de manera segura, evitando la acumulación de compuestos nocivos que puedan afectar tanto a los cultivos como a la calidad del aire. Los gases más perjudiciales para el crecimiento de las plantas en un invernadero son principalmente los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el monóxido de carbono (CO). Aunque en la actualidad no existen estudios sólidos que definan con exactitud a partir de qué concentración estos compuestos resultan nocivos específicamente para el cultivo del pimiento, ni tampoco investigaciones concluyentes sobre el impacto directo en su productividad, la fisiología vegetal ofrece referencias generales. Diversos estudios indican que a partir de concentraciones en el rango de 0,1 ppm a 0,3 ppm de NO_x y SO_x comienzan a observarse daños en tejidos vegetales y procesos fisiológicos.

En cuanto a los compuestos de óxidos de nitrógeno (NO_x), se originan en la combustión del gasóleo principalmente a través del llamado NO_x térmico. Este mecanismo ocurre cuando las elevadas temperaturas en la cámara de combustión favorecen la reacción del nitrógeno presente en el aire con el oxígeno, dando lugar a la formación de óxidos como el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂).



INSTALACIÓN AMBIENTAL

Las emisiones de compuestos NO_x se estima que se producen en una concentración de 20 – 100 ppm en la combustión de gasóleo. Dada esta concentración se puede extrapolar cual será la concentración de estas una vez se inyectan los gases en el invernadero, para ello se debe calcular primeramente cuanto volumen suponen. Dado que en la combustión del gasóleo el CO₂ compone aproximadamente un 14% en volumen y sabido que la cantidad de CO₂ que se debe introducir al invernadero es 33300L se obtiene que el volumen total de gases será de

$$33300L * \frac{100}{14} = 237857 L$$

Si tomamos como límite para la concentración de NO_x en el invernadero 0,1 ppm, eso corresponderá a un volumen de

$$V_{NO_x} = \frac{ppm * V_{aire}}{10^6} = \frac{0,1 * 9 * 10^7}{10^6} = 9 L$$

Lo que corresponde a una concentración máxima en la combustión de

$$ppm = \frac{V_{NO_x}}{V_{emitido}} * 10^6 = \frac{9}{237857} * 10^6 = 37,84 ppm$$

En caso de que se tome como concentración máxima 0,3 ppm se obtendría un volumen de

$$V_{NO_x} = \frac{ppm * V_{aire}}{10^6} = \frac{0,3 * 9 * 10^7}{10^6} = 27 L$$

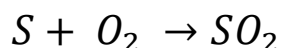
Lo que correspondería a una concentración máxima en la combustión de

$$ppm = \frac{V_{NO_x}}{V_{emitido}} * 10^6 = \frac{27}{237857} * 10^6 = 113,52 ppm$$

Dado que no se dispone de información precisa sobre el punto exacto a partir del cual el cultivo de pimiento comienza a sufrir daños por la presencia de NO_x, ni sobre la magnitud concreta de dichos efectos en su producción, y considerando además que la cantidad exacta de NO_x generada en la combustión del gasóleo puede variar en función de las condiciones de operación, resulta necesario implementar un sistema de monitorización. Este permitirá evaluar de forma continua la concentración de estos compuestos en el invernadero y, en caso de detectarse niveles que puedan resultar perjudiciales, realizar los ajustes oportunos en la operación o en el tratamiento de los gases.

En el supuesto de que surjan problemas por concentración de NO_x, de igual manera la solución pasa necesariamente por reducir las emisiones al invernadero de tal forma que la concentración sea menor a pesar de que también se reduzca la concentración de CO₂. El motivo de esto es que la implementación de sistemas específicos para la reducción de compuestos NO_x, como la Reducción Catalítica Selectiva (SCR) o la Reducción No Catalítica Selectiva (SNCR), no resulta viable en este proyecto. El motivo principal es que el coste de instalación y operación de estas tecnologías es excesivamente elevado en relación con la escala y necesidades del invernadero, lo que hace que su aplicación no sea rentable. Por ello, se descarta su uso y se priorizan medidas más sencillas y económicas. Sin embargo, las calderas como la EUROMAX S que cuentan con homologación cuentan con catalizadores por lo que será improbable tener problemas.

En cuanto a los compuestos de azufre (SO_x), aparecen en la combustión del gasóleo debido a la presencia natural de azufre en el propio combustible.



Durante la quema, este elemento reacciona con el oxígeno formando óxidos que resultan nocivos tanto para el medio ambiente como para los cultivos. Aunque

INSTALACIÓN AMBIENTAL

existen procesos de desulfuración capaces de eliminar casi por completo estos compuestos, su aplicación resulta económicamente inviable en este contexto. Por ello, la estrategia adoptada será emplear gasóleos con muy baja concentración de azufre, inferiores al 0,1%, lo que reducirá significativamente la formación de SOx y permitirá un uso más seguro de los gases de combustión dentro del invernadero.

En este caso, se estima que las emisiones de compuestos SOx están comprendidas entre 0 – 5 ppm del gas emitido, de esta forma para calcular la concentración en la que se encontraría este compuesto en el invernadero se seguirá el mismo proceso que para los compuestos NOx. Si tomamos como límite para la concentración de SOx en el invernadero 0,1 ppm, eso corresponderá a un volumen de

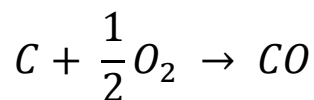
$$V_{SO_x} = \frac{ppm * V_{aire}}{10^6} = \frac{0,1 * 9 * 10^7}{10^6} = 9 L$$

Lo que corresponde a una concentración máxima en la combustión de

$$ppm = \frac{V_{SO_x}}{V_{emitido}} * 10^6 = \frac{9}{237857} * 10^6 = 37,84 ppm$$

Sabido que los compuestos SOx se encuentran en una concentración máxima estimada de 5 ppm, esto no supondrá un problema.

En cuanto al CO, el monóxido de carbono se genera en la combustión del gasóleo cuando el proceso de oxidación del carbono no es completo. Esto suele ocurrir por una falta de oxígeno en la mezcla aire-combustible, por una mala distribución del aire en la cámara de combustión o por temperaturas de llama insuficientes que impiden la oxidación total del carbono a dióxido de carbono (CO₂). En estas condiciones, parte del carbono presente en el gasóleo se combina con una sola molécula de oxígeno, dando lugar a CO en lugar de transformarse por completo en CO₂.



Es un gas que interfiere con la respiración celular y, en consecuencia, puede alterar el metabolismo vegetal en caso de acumularse en el ambiente del invernadero. Además, se trata de un compuesto altamente tóxico para los seres humanos, lo que refuerza la necesidad de mantenerlo bajo control. La concentración máxima admisible de este gas se sitúa en 50 ppm. Existen estudios, aunque no realizados específicamente sobre el pimiento, que señalan que concentraciones inferiores a este umbral no representan un riesgo para las plantas. Sin embargo, cuando se superan dichos niveles, el CO puede resultar dañino para el desarrollo vegetal y comprometer tanto la seguridad del cultivo como la de las personas que trabajan en el invernadero.

En el caso de CO se estima que las emisiones en la combustión del gasóleo se encuentran en una concentración 40 – 150 ppm. Siguiendo un procedimiento igual al visto anteriormente.

$$V_{CO} = \frac{ppm * V_{emitido}}{10^6} = \frac{150 * 237857}{10^6} = 35,68$$

Lo que corresponde con una concentración máxima de

$$ppm = \frac{V_{CO}}{V_{aire}} * 10^6 = \frac{35,68}{9 * 10^7} * 10^6 = 0,396 ppm$$

Muy por debajo del umbral de 50 ppm fijado como umbral de seguridad, tanto para humanos como para el cultivo.

Por último, se debe tener en cuenta que será necesario eliminar el hollín generado en la combustión del gasóleo. Puede tener efectos muy negativos si llega al interior del invernadero junto con el CO₂. Estas partículas sólidas se depositan sobre las

INSTALACIÓN AMBIENTAL

hojas y tallos, formando una capa que reduce la penetración de la radiación solar y limita la fotosíntesis. Además, dificultan la transpiración y los intercambios gaseosos, lo que provoca estrés en la planta y una disminución de su crecimiento. El hollín también puede ensuciar flores y frutos, afectando a su calidad comercial y reduciendo el valor de la cosecha. Por otra parte, al retener humedad, estas partículas pueden favorecer la aparición de hongos y bacterias.

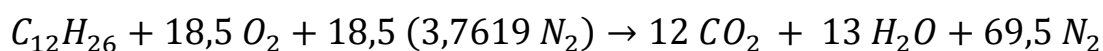
En el ambiente del invernadero, la presencia de hollín incrementa la concentración de partículas en suspensión, que ensucian plásticos, vidrios y estructuras, reduciendo la transmisión de luz. Para los trabajadores, respirar este aire con partículas resulta perjudicial para la salud. Finalmente, el hollín también genera problemas en la instalación, ya que se adhiere a tubos de calefacción, sensores o sistemas de riego, reduciendo su eficiencia y aumentando la necesidad de mantenimiento.

Por todo ello, es imprescindible eliminar el hollín antes de dirigir los gases de combustión al invernadero, garantizando que solo el CO₂ llegue a las plantas sin contaminantes asociados.

Para ello lo primero que necesitamos es estimar el caudal máximo. Atendiendo a la ficha técnica de la caldera, se consumen 187 kg/h de gasóleo y tomando en cuenta el cálculo realizado anteriormente sobre la masa de gases emitida por kg de gasóleo se tendrá que se emiten

$$187 \text{ Kg/h} * 15,95 \text{ Kg/Kg} = 2982,65 \text{ Kg/h}$$

Conocido este dato se necesita convertir este valor a m³/h por lo que se necesitará calcular la densidad de esta composición. Conocida la reacción de combustión mencionada previamente se sabe que por cada mol de gasóleo se extraen 94,6 mol de gas



INSTALACIÓN AMBIENTAL

Tomando las masas molares de cada compuesto se obtiene que por mol de gasóleo se consiguen 2,71 Kg. En cuanto al volumen, teniendo 94,6 mol a 273 K y 1 atm.

$$V = n * 22,4 = 94,6 * 22,4 = 2120 L = 2,12 m^3$$

De esta forma se tiene que la densidad a 273 K es de

$$\rho = \frac{2,71}{2,12} \approx 1,28 Kg/m^3$$

Teniendo en cuenta que los gases a la salida se encuentran a una temperatura aproximada de 473 K, la densidad será en este caso

$$\rho_{473} = \rho_{273} * \frac{273}{473} \approx 0,74 Kg/m^3$$

De esta forma, teniendo un caudal másico de 2982,64 Kg/h aplicando el factor de conversión

$$2982,65 Kg/h * 0,74 Kg/m^3 = 4030,61 m^3/h$$

Tomando esto en cuenta, se ha optado por el uso de ciclones industriales. Estos dispositivos funcionan mediante un proceso de separación mecánica, el flujo de gases se introduce en el ciclón de manera tangencial, generando un movimiento de rotación a gran velocidad. La fuerza centrífuga provoca que las partículas sólidas y el hollín presentes en el gas sean impulsados hacia las paredes del ciclón, donde pierden velocidad y caen hacia un colector en la parte inferior, mientras que el gas limpio continúa su recorrido hacia la salida superior. Este método permite una

INSTALACIÓN AMBIENTAL

eliminación eficaz de partículas sin necesidad de elementos filtrantes complejos. Además, los ciclones destacan por su bajo coste de adquisición y mantenimiento en comparación con otras técnicas de depuración, lo que los convierte en una solución económica y adecuada para el proyecto.

Dadas las características técnicas del proyecto, se ha optado por el modelo MXCCZ-027 de la empresa VENTDEPOT, empresa de ingeniería especializada en todo tipo de sistemas de limpieza y gestión de gases. La elección de este ciclón fue motivada por las características técnicas favorables para nuestro proyecto y su ajustado precio frente a otro tipo de técnicas y otros ciclones disponibles en el mercado.



Ilustración 31. Ciclón MXCCZ-027. Fuente: VENTDEPOT (2025).

La tabla 20 muestra las características técnicas del producto junto con las de otros modelos similares, con distintas capacidades.

INSTALACIÓN AMBIENTAL

Características Técnicas Específicas de los Ciclones Industriales, CycloZoom.												
Clave	Material	Calibre	Densidad del Producto	Diámetro de Partícula	Velocidad de Transporte	Flujo Másico del Material	Caida de Presión	Caudal	Peso y Dimensiones con Empaque en cm.			
			Kg/m ³	mm	m/s	Kg/min	mmh ₂ O	m ³ /hr	Kg	Base	Alto	Ancho
MXCCZ-006	Acero Inoxidable	22	900	1	27	60	876.19	600	5.0	31	100	33
MXCCZ-007	Lámina Galvanizada	22	900	1	27	80	875.51	800	6.3	35	116	37
MXCCZ-008	Acero Inoxidable	22	900	1	27	80	875.51	800	6.2	35	116	37
MXCCZ-009	Lámina Galvanizada	22	900	1	27	100	873.69	1000	8.1	39	129	41
MXCCZ-010	Acero Inoxidable	22	900	1	27	100	873.69	1000	8.0	39	129	41
MXCCZ-011	Lámina Galvanizada	22	900	1	27	120	871.59	1200	10.2	43	141	45
MXCCZ-012	Acero Inoxidable	22	900	1	27	120	871.59	1200	10.1	43	141	45
MXCCZ-013	Lámina Galvanizada	22	900	1	27	140	869.48	1400	11.7	46	153	48
MXCCZ-014	Acero Inoxidable	22	900	1	27	140	869.48	1400	11.5	46	153	48
MXCCZ-015	Lámina Galvanizada	22	900	1	27	160	867.46	1600	13.2	50	163	53
MXCCZ-016	Acero Inoxidable	22	900	1	27	160	867.46	1600	13.1	50	163	53
MXCCZ-017	Lámina Galvanizada	22	900	1	27	180	865.55	1800	14.9	53	173	55
MXCCZ-018	Acero Inoxidable	22	900	1	27	180	865.55	1800	14.8	53	173	55
MXCCZ-019	Lámina Galvanizada	20	900	1	27	200	863.75	2000	17.6	55	182	57
MXCCZ-020	Acero Inoxidable	20	900	1	27	200	863.75	2000	17.5	55	182	57
MXCCZ-021	Lámina Galvanizada	20	900	1	27	250	859.71	2500	24.8	62	204	64
MXCCZ-022	Acero Inoxidable	20	900	1	27	250	859.71	2500	24.6	62	204	64
MXCCZ-023	Lámina Galvanizada	20	900	1	27	300	856.24	3000	29.9	68	223	70
MXCCZ-024	Acero Inoxidable	20	900	1	27	300	856.24	3000	29.8	68	223	70
MXCCZ-025	Lámina Galvanizada	20	900	1	27	400	850.51	4000	38.5	78	258	80
MXCCZ-026	Acero Inoxidable	20	900	1	27	400	850.51	4000	38.3	78	258	80
MXCCZ-027	Lámina Galvanizada	20	900	1	27	450	848.11	4500	44.5	83	273	85
MXCCZ-028	Acero Inoxidable	20	900	1	27	450	848.11	4500	44.4	83	273	85

Tabla 20. Características técnicas de MXCCZ-027. Fuente: VENTDEPOT (2025)

De esta forma, considerando tanto las emisiones que serán dirigidas al invernadero como el volumen disponible en su interior, se concluye que el único gas que puede representar un posible inconveniente son los óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos compuestos, incluso en bajas concentraciones, pueden afectar a los cultivos, por lo que será necesario mantener un control cuidadoso sobre su presencia. De esta manera, se garantiza que el enriquecimiento con CO₂ se realice de forma segura y sin riesgos para el desarrollo de las plantas.

Por este motivo, se instalarán en el invernadero sensores de CO₂ y NO_x que permitan supervisar de forma continua la calidad del aire. Con esta medida se garantiza que la concentración de dióxido de carbono se mantenga en los niveles óptimos para favorecer el desarrollo de los cultivos y, al mismo tiempo, que los óxidos de nitrógeno no alcancen valores que puedan resultar perjudiciales. De esta forma, se asegura en todo momento un ambiente controlado y seguro para el crecimiento de los cultivos.

6.3.4 HUMEDAD

Dadas las condiciones óptimas de humedad, situadas en torno al 75%, y teniendo en cuenta que no será posible recurrir a la ventilación natural al buscar mantener concentraciones elevadas de CO₂ en el invernadero, se instalarán sistemas específicos de control de humedad. Estos incluirán tanto equipos de humidificación, destinados a incrementar la humedad relativa cuando descienda por debajo del rango deseado, como sistemas de deshumidificación, que permitirán reducirla en caso de exceso. Con esta solución se asegura un ambiente equilibrado que favorezca el desarrollo adecuado de los cultivos sin comprometer la estrategia de enriquecimiento carbónico.

Los dispositivos de control de humedad se dispondrán de manera que permitan ajustar las condiciones internas del invernadero desde los valores límite hasta alcanzar los niveles considerados ideales. De este modo, se garantiza la posibilidad de corregir rápidamente desviaciones tanto por exceso como por defecto, asegurando que la humedad relativa se mantenga siempre dentro del rango óptimo para el correcto desarrollo de los cultivos.

La humedad relativa (HR) es una medida que indica cuánta cantidad de vapor de agua contiene el aire en relación con la cantidad máxima que podría contener a una determinada temperatura

$$H_r = \frac{p_v}{p_{vs}} * 100$$

p_v = presión parcial del vapor de agua en el aire

p_{vs} = presión de saturación del vapor de agua a la temperatura del aire

Tomando que la presión de saturación del vapor de agua a 25 °C es 3,17 kPa (se toma 25 °C ya que será la temperatura del invernadero) entonces se puede obtener, aplicando la ecuación de los gases ideales

$$\rho_{vs} = \frac{p_{vs}}{R_v * T} = \frac{3170}{461,5 * 298} = 2,31 \text{ g/m}^3$$

p_{vs} = presión de saturación del vapor de agua a la temperatura del aire

ρ_{vs} = densidad a presión de saturación

R_v = constante específica del vapor de agua

Tomando esto en cuenta se podrá calcular las necesidades de humidificación o deshumidificación de la instalación.

Atendiendo a las condiciones locales, las humedades relativas medias alcanzan el 79%, sin embargo, se pueden producir picos mayores. De esta forma se tomará como premisa que el sistema de deshumidificación sea capaz de bajar la humedad relativa desde el 85% que se considera perjudicial hasta un nivel de entre el 70-75% óptimo.

Para ello, conocida la densidad de saturación se puede obtener cual será la densidad a distintas humedades relativas. Para el 85% y 70% se tiene que

$$\rho_{85} = \frac{H_r * \rho_{vs}}{100} = \frac{85 * 2,31 \text{ g/m}^3}{100} = 1,964 \text{ g/m}^3$$

$$\rho_{70} = \frac{H_r * \rho_{vs}}{100} = \frac{70 * 2,31 \text{ g/m}^3}{100} = 1,617 \text{ g/m}^3$$

Debido a que el invernadero está dividido en 3 módulos se tendrá que se debe bajar

$$(\rho_{85} - \rho_{70}) * V = (1,964 - 1,617) * 30000 = 10,41 \text{ Kg}$$

INSTALACIÓN AMBIENTAL

Para el sistema de deshumidificación se ha seleccionado el modelo DG-6 50Hz Estándar de la empresa DryGair, líder mundial en deshumidificadores, por dos motivos principales. En primer lugar, este equipo cuenta con la capacidad suficiente para reducir la humedad del invernadero hasta los niveles requeridos en un tiempo aproximado de media hora, disponiendo además de un margen de capacidad extra en caso de ser necesario. En segundo lugar, su diseño permite una circulación de aire muy eficiente dentro del recinto, lo que resulta especialmente beneficioso para el sistema de enriquecimiento con CO₂, ya que evita la formación de zonas con concentraciones desiguales y asegura una distribución homogénea en todo el volumen del invernadero.



Ilustración 32. Deshumidificador DG-6 50Hz Estándar. Fuente: DryGair (2025).

A continuación, se muestran sus características técnicas, como se puede ver logra una deshumidificación de 25L/h, lo que es más que suficiente para eliminar los 10 Kg que se mencionaban. Cabe destacar que los 25 L corresponden a ese volumen condensado, por ello se puede decir que es capaz de extraer 25 Kg/h.

INSTALACIÓN AMBIENTAL

TECHNICAL DETAILS	
Width	2,570 mm
Depth	933 mm
Height	1,920 mm <small>exact height can be adjusted (2,420 mm with air distribution module)</small>
Weight	~850 kg
Operating Temperature	10°C - 40°C
Water Condensation	25 L/h <small>@ 18°C / 80% RH</small>
Air Flow	~13,500 m ³ /h
Electricity Consumption	6.5 kW
Electricity Requirements	3-phase, 400V, 50 Hz <small>I (design) = 17 amp, I (oper. max) = 22 amp, I (nominal) = 32 amp</small>
Refrigerant	R513A or R134A

Tabla 21. Características técnicas de DG-6 50Hz Estándar. Fuente: DryGair (2025)

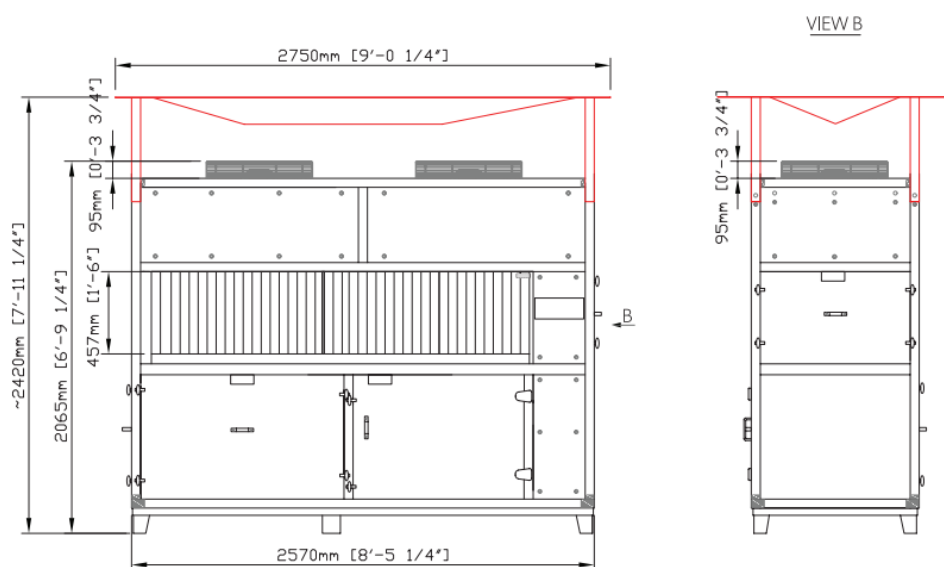


Ilustración 33. Deshumidificador DG-6 50Hz Estándar. Fuente: DryGair (2025).

INSTALACIÓN AMBIENTAL

Este producto funciona mediante un proceso de condensación del vapor de agua presente en el aire del invernadero. El equipo aspira el aire húmedo del ambiente y lo hace pasar a través de un sistema de intercambio térmico con superficies frías. Al entrar en contacto con estas, el vapor de agua se condensa y se transforma en gotas que son recogidas y evacuadas hacia un desagüe. Posteriormente, el aire ya deshumidificado se vuelve a calentar ligeramente y se devuelve al interior del invernadero. De esta forma, se reduce de manera controlada la humedad relativa.

En cuanto a la humidificación, se tomará como premisa que el sistema sea capaz de elevar la humedad de un 60% a un 75% aproximadamente. De forma análoga al cálculo de la deshumidificación

$$\rho_{60} = \frac{H_r * \rho_{vs}}{100} = \frac{60 * 2,31 \text{ g/m}^3}{100} = 1,386 \text{ g/m}^3$$

$$\rho_{75} = \frac{H_r * \rho_{vs}}{100} = \frac{75 * 2,31 \text{ g/m}^3}{100} = 1,733 \text{ g/m}^3$$

$$(\rho_{75} - \rho_{60}) * V = (1,733 - 1,386) * 30000 = 10,41 \text{ Kg}$$

A la luz de estos resultados, para la humidificación se empleará un sistema de nebulización, dimensionado para proporcionar un caudal de 15 L/h, de tal forma que se pueda reaccionar de forma veloz a diferentes necesidades. Este tipo de sistema permite incrementar la humedad relativa de forma rápida y homogénea en el invernadero, generando microgotas que se evaporan en el ambiente sin producir encharcamientos. Para su correcta implantación será necesario contratar a una empresa instaladora especializada, como por ejemplo Novagric, que se encargue tanto del diseño adaptado a las características del invernadero como de la instalación y puesta en marcha del sistema.

CAPÍTULO 7. INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

7.3 RADIACIÓN SOLAR LOCAL

Lo primero que se debe conocer a la hora de diseñar una instalación fotovoltaica es la capacidad que se tendrá de generar electricidad en el emplazamiento elegido, para ello se necesitará conocer la irradiación solar en la zona. La zona de Tenerife es una de las zonas más privilegiadas de España en este sentido haciendo de esta una zona ideal para una instalación fotovoltaica.

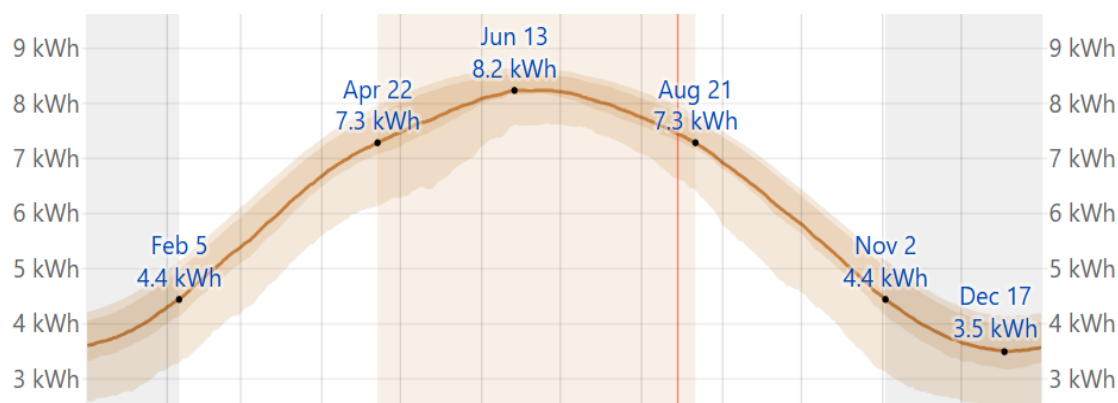


Ilustración 34. Energía solar diaria por metro cuadrado en Tenerife. Fuente: WeatherSpark (2025).

En este gráfico se puede observar un incremento progresivo desde invierno, con valores mínimos en diciembre y máximos a mediados de junio. La primavera y el verano mantienen niveles elevados, mientras que en otoño e invierno descienden. Este patrón refleja un recurso solar abundante y constante, especialmente en los meses centrales del año, lo que confirma la idoneidad de la isla para el aprovechamiento fotovoltaico.

7.3 REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS

En los invernaderos, el mayor consumo eléctrico se concentra habitualmente en el sistema de riego, el cual integra diferentes elementos como bombas, válvulas y sistemas de control que requieren un suministro continuo de energía. El gasto asociado a este proceso resulta tan elevado en comparación con otras actividades auxiliares del invernadero que el consumo eléctrico de estas últimas puede considerarse prácticamente despreciable dentro del balance energético total.

Se han llevado a cabo estudios sobre invernaderos de tipología extraordinariamente similar al planteado en este proyecto, coincidiendo en aspectos como el diseño, los materiales empleados e incluso la superficie. Dichos estudios indican que, para un invernadero tipo de 15.000 m², el requerimiento eléctrico asociado al sistema de riego asciende a 3.065,6 W. Dado que el invernadero considerado en este proyecto presenta características prácticamente equivalentes y unas dimensiones relativamente cercanas, se ha extrapolado que el consumo eléctrico destinado al riego en el invernadero tipo de este proyecto será de 3.678,72 W, valor que servirá como referencia para el análisis energético. A este valor se le debe añadir la potencia requerida por los deshumidificadores, teniendo 3, uno por cada módulo, el cálculo total será de 3698,22 W.

(López-Luque, Martínez, Reca, & Ruiz, 2017)

7.3 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS ELÉCTRICOS

7.3.1 SELECCIÓN DE MÓDULOS

Como módulos fotovoltaicos para el proyecto se ha seleccionado el modelo LR5-66HIH-500 de la marca Longi Solar, uno de los fabricantes más reconocidos a nivel internacional en el sector de la energía solar. Este módulo ofrece una potencia nominal de 500 W, con una alta eficiencia de conversión, lo que lo convierte en una solución adecuada para instalaciones que requieren un óptimo aprovechamiento del espacio disponible. Es particularmente interesante por la incorporación de la

INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

tecnología PERC (Passivated Emitter Rear Cell), que mejora la captación de luz y la eficiencia de la célula; la tecnología Half-Cell, que divide las células solares en dos mitades reduciendo las pérdidas por resistencia y aumentando el rendimiento en condiciones de sombreado parcial; y la tecnología de 9BB (9 Bus Bars), que reduce la distancia de conducción de corriente dentro de cada célula, mejorando su fiabilidad y eficiencia global. La combinación de estas innovaciones asegura un módulo robusto, de alto rendimiento y con una larga vida útil, razones por las cuales se ha elegido para el presente proyecto.

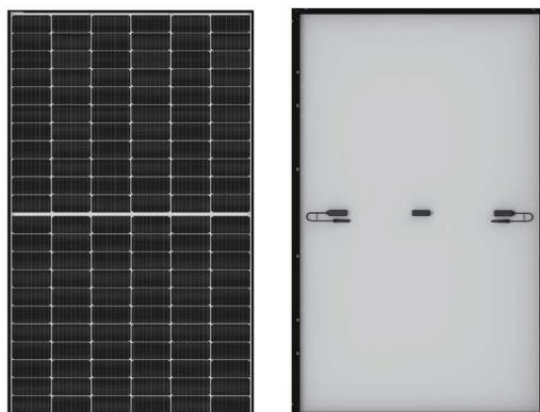


Ilustración 35. Módulos LR5-66HIH-500. Fuente: Longi Solar (2025).

En cuanto a las características eléctricas y térmicas del módulo se tiene

P_{MAX} (Potencia nominal máxima)	500 Wp
V_{MP} (Tensión en el punto de máxima potencia)	38,38 V
I_{MP} (Intensidad en el punto de máxima potencia)	13,03 A
V_{CA} (Tensión en circuito abierto)	45,55 V
I_{CC} (Corriente de cortocircuito)	13,09 A
Eficiencia	21,1 %

Tabla 22. Características eléctricas módulos LR5-66HIH-500. Fuente: Longi Solar (2025).

INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Valores de temperatura:	
β (Coeficiente de variación de tensión de circuito abierto)	-0,265 %/°C
T_{FUN} (Temperatura de funcionamiento)	-40 °C; +85 °C
T_{ONC} (Temperatura de operación nominal de la célula)	45±2 °C

Tabla 23. Características térmicas módulos LR5-66HIH-500. Fuente: Longi Solar (2025).

Dado que se utilizará este modelo y atendiendo a sus características técnicas se dispondrán 8 módulos para alimentar los procesos mencionados resultando en una potencia de 4 kW.

Para confirmar que estos módulos son aptos para este emplazamiento, a continuación, se comprobará que los módulos trabajarán dentro de su rango operativo de temperatura de célula. Para ello se calcula la temperatura máxima a la que trabajarán los módulos. Para realizar el cálculo se hace uso de los datos de la AEMET y WeatherSpark de radiación y temperatura máxima y mínima en la región siendo estos $G_{max} = 1100 \text{ W/m}^2$ $G_{min} = 300 \text{ W/m}^2$ y $T_{max} = 37 \text{ °C}$ $T_{min} = 13 \text{ °C}$. Se tendrá también que la temperatura de operación nominal de la célula es 45 °C

$$T_{célula} = T_{amb} + \frac{(T_{ONC} - 20)}{800} * G$$

De esta forma se obtiene que la temperatura máxima de la célula será de $T_{max,célula} = 71 \text{ °C}$, estando por debajo del valor máximo de 85 °C admitido.

La mínima será de $T_{min,célula} = 22 \text{ °C}$ ubicada también en el rango de operación adecuado ya que el valor mínimo admitido es de -40 °C.

7.3.2 SELECCIÓN DE INVERSORES

El inversor seleccionado para el proyecto es el Huawei SUN2000-4KTL-M1, un equipo de última generación que ofrece una potencia de salida de 4 kW. Uno de los principales motivos de su elección es que se trata de un inversor trifásico, capaz de suministrar una salida de 400 V, tensión necesaria para el correcto funcionamiento de los sistemas de humidificación previstos, tal y como se recoge en su información técnica.

Además de esta característica clave, el SUN2000-4KTL-M1 incorpora múltiples ventajas que refuerzan su idoneidad para el proyecto. Entre ellas destacan la presencia de dos MPPT independientes, que optimizan la producción al gestionar cadenas de módulos en distintas condiciones de orientación o sombreado; su elevada eficiencia de conversión, superior al 98%, que maximiza el aprovechamiento de la energía solar; y su sistema de protección activa contra arcos eléctricos (AFCI), que incrementa la seguridad de la instalación. Asimismo, cuenta con un diseño compacto y ligero que facilita su instalación, así como con conectividad inteligente para la monitorización en tiempo real mediante la plataforma de Huawei.

La combinación de estas características técnicas convierte a este modelo en la opción más adecuada, asegurando un suministro fiable y eficiente que cubre las necesidades tanto de la instalación fotovoltaica como de los equipos auxiliares del invernadero.



Ilustración 36. Inversor SUN2000 -4KTL-M1. Fuente: Huawei (2025).

INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Valores de entrada (CC)	
Nº Entradas	2 entradas
Nº MPPTs	2 entradas
V_MAX (Máxima tensión de entrada)	1100 V
V_RANGO (Rango de tensión de funcionamiento)	140 – 980 V
V_MIN (Mínima tensión de arranque)	200 V
V_NOM (Tensión nominal de entrada)	600 V
I_MAX (Máxima corriente de cortocircuito por entrada)	13,5 A
P_MAX, IN (Potencia máxima de entrada)	6000 Wp
Valores de salida (AC)	
P_MAX, OUT (Potencia máxima de salida)	4000 Wp
V_NOM (Tensión nominal de fase/línea)	230/400 V
ε (Eficiencia Máxima)	98,3 %
ε (Eficiencia Europea)	97,1 %

Tabla 24. Características técnicas del inversor SUN2000 -4KTL-M1. Fuente: Huawei (2025).

A continuación, se procederá a estudiar la compatibilidad del inversor seleccionado con la instalación fotovoltaica prevista, analizando tanto las características técnicas de los módulos como los parámetros de operación del equipo. Este análisis permitirá comprobar que las tensiones, corrientes y potencias de trabajo se encuentran dentro de los rangos admitidos por el inversor, garantizando así un funcionamiento seguro, eficiente y plenamente adaptado a las necesidades del sistema diseñado.

Para verificar que no se excede la potencia máxima admitida por el inversor se estudiará cuantos módulos es capaz de soportar el inversor, para ello

$$N_{max} = \frac{P_{max,inversor}}{P_{nom,módulo}} = \frac{6000 \text{ Wp}}{500 \text{ Wp}} = 30 \text{ módulo}$$

Dado que la instalación descrita contará con 8 módulos, será perfectamente capaz de soportar la instalación en términos de potencia.

En términos de intensidad, se debe determinar si la intensidad generada por los módulos será inferior a la máxima admitida por el inversor.

$$N_{max} = \frac{I_{max, inversor\ 1\ entrada}}{I_{cc, módulo}} = \frac{13,5\ A}{13,09\ A} = 1,031\ string$$

Dado que se trata de un inversor con dos MPPT y una entrada cada uno se ve que se podrá soportar sin problema mientras la entrada a cada MPPT se haga en un solo string (módulos en serie), ya que en caso de establecerlos en paralelo se superaría la intensidad máxima admitida por el inversor.

Por último, se comprobará que la tensión de operación se encuentre en el rango permitido por el inversor. Para ello se calcula la tensión máxima en circuito abierto la cual se consigue en condiciones frías utilizando la siguiente fórmula en función del coeficiente de variación del módulo y la tensión de circuito abierto.

$$V_{CA,MAX} = V_{CA,MOD} + V_{CA,MOD} * \beta * \frac{(T_{CEL,MIN} - 25)}{100}$$

$$V_{CA,MAX} = 45,55 + 45,55 * (-0,265) * \frac{(22 - 25)}{100} = 45,91\ V$$

Dado que se cuenta con 8 módulos, y la tensión máxima es de 980V incluso distribuyendo todos en serie, no habrá ningún problema de tensiones.

CAPÍTULO 8. VIABILIDAD DEL PROYECTO

8.1 PRESUPUESTO DE LA INSTALACIÓN

Para la evaluación económica de la instalación se ha elaborado un presupuesto detallado, el cual se presenta diferenciado en función de las distintas tecnologías empleadas. Esta clasificación permite identificar de manera clara los costes asociados a cada uno de los sistemas que componen el proyecto, facilitando el análisis de la inversión total y proporcionando una visión más precisa y estructurada de la viabilidad económica de la instalación.

El coste principal del proyecto está asociado a la adquisición de la caldera de combustión YGNIS EUROMAX, con una potencia de 2.330 kW. Este equipo representa la inversión más significativa debido a su capacidad, tecnología y relevancia dentro del sistema, al ser el elemento encargado de aportar la energía térmica necesaria y de generar los gases de combustión aprovechados para el enriquecimiento con CO₂ en el invernadero.

Debido a que la empresa YGNIS actúa únicamente como fabricante y no como instaladora, la estimación del presupuesto completo de la instalación resulta algo más compleja, ya que se deben contemplar los costes adicionales de montaje y de los elementos auxiliares necesarios. No obstante, la FAO proporciona orientaciones generales sobre este tipo de tecnologías y establece que la inversión total para implementar un sistema con las características y dimensiones del proyecto se sitúa en un rango comprendido entre 30 y 80 €/m², lo que permite disponer de una referencia fiable para valorar la viabilidad económica de la instalación.

De esta forma tomando un precio medio de 55 €/m², se tiene que la compra e instalación de una caldera de combustión de estas características costaría 990.000 €.

En cuanto a la instalación de las mallas de sombreado, dadas las características y tamaño de nuestro invernadero, se puede calcular que el área de techo del invernadero es de 18040 m². De esta forma, se requiere la compra de 61 mallas MALBL24005, teniendo en cuenta que cada malla son 300 m². El precio de cada una

VIABILIDAD DEL PROYECTO

de estas es de 192 € y si se asume un gasto del 10% destinado a los elementos necesarios para la instalación de las mallas como guías o enganches queda un presupuesto de 12.700 €.

En cuanto al ciclón, el precio del modelo seleccionado es de 22.307,65 €, sin embargo, ya que el proveedor es mexicano se estima que adicionalmente se debe añadir un 30% en concepto de transporte, aranceles e instalación. Por lo que el presupuesto final es de 29.000 €.

Los deshumidificadores DG-6 50 Estándar se encuentran en el mercado por precios que rondan los 30.000 €, por lo que, teniendo en cuenta que se necesitarán 3, el presupuesto estimado es de 90.000 €. Para los nebulizadores, la Junta de Andalucía considera que el precio de instalación es de 0,88 €/ m², por lo que serían 15.840 €.

Por último, se deben tener en cuenta los elementos eléctricos incorporados, los módulos utilizados tienen un precio de 120 €/uni por lo que el precio será de 960 € y el inversor empleado tiene un precio de 900 €. De esta forma, tomando que entre estructura, protecciones y registro se deben invertir aproximadamente 2000 € adicionales, el presupuesto total para la instalación eléctrica es de 3860 €.

A continuación, la tabla 25 muestra el presupuesto total para la instalación del sistema de control ambiental.

CONCEPTO	IMPORTE
INSTALACIÓN DE CALDERA	990.000 €
MALLAS DE SOMBREO	12.700 €
CICLÓN	29.000 €
DESHUMIDIFICADORES Y NEBULIZADORES	105.840 €
INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA	3.860 €
TOTAL SIN IVA	1.141.400 €
IVA ASOCIADO A LA INSTALACIÓN DE LA CALDERA	21%
TOTAL	1.349.300 €

Tabla 25. Presupuesto final. Fuente: Elaboración propia.

8.2 VIABILIDAD ECONÓMICA

8.2.1 PRODUCCIÓN

Es fundamental realizar una estimación de la producción, ya que el eje central del proyecto radica en que el incremento en el rendimiento del cultivo permita cubrir los gastos derivados de la instalación y, además, genere un margen de beneficios. De esta forma, la viabilidad del sistema no solo se mide en términos técnicos, sino también económicos, asegurando que la inversión realizada se traduzca en un retorno positivo a lo largo de la vida útil del proyecto.

El IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía) estima que la producción media a lo largo de un año de pimiento bajo invernadero es de aproximadamente 75.000 – 80.000 Kg/ha. De esta forma se puede estimar que la producción en un invernadero de las características de las de este proyecto, si no tuviera sistemas de control ambiental, sería de 144.000 Kg aproximadamente. Sin embargo, en ese mismo documento se detalla que la producción en invernaderos con control climático (sin control de CO₂) la producción puede llegar hasta los 150.000 Kg/ha. De esta forma se puede estimar que en un invernadero de las dimensiones del de este proyecto se alcanzarían los 270.000 Kg. Por último, como se vio anteriormente, el control de CO₂ puede incrementar la producción en rangos aproximados del 30%, por lo que, si se tiene todo en cuenta, el invernadero tipo de este proyecto podría ser capaz de producir 351.000 Kg anuales. Esto representaría una diferencia de 207.000 Kg frente a un invernadero sin control ambiental, siendo el precio medio del pimiento de 2 €/Kg. Esto resultará en 414.000 € el primer año.

En cuanto a la generación de los módulos fotovoltaicos, PVGIS establece que en la región de Tenerife se consigue una generación anual aproximada de 1,9 MWh/kWp, por lo que, dado que la instalación de este proyecto tiene 4 kWp instalados, se puede asumir una generación de 7600 kWh, lo que corresponde con 1035,52 €.

8.2.2 OPEX

Para el cálculo de los gastos operativos únicamente se tendrán en cuenta aquellos costes adicionales que no estarían presentes en la gestión de un invernadero sin sistema de control ambiental. De esta manera, se logra aislar el impacto económico real derivado de la implementación de la tecnología propuesta, diferenciando claramente entre los gastos habituales de explotación y los asociados específicamente a la mejora planteada en el proyecto.

Los costes operativos del sistema estarán determinados principalmente por la caldera de combustión, tanto en lo referente a las labores periódicas de mantenimiento necesarias para garantizar su correcto funcionamiento como al consumo de gasóleo requerido para su operación. Estos dos factores representan la mayor parte del gasto adicional frente a un invernadero convencional, por lo que resultan claves en la evaluación económica del proyecto.

Para estimar el consumo de gasóleo anual, se utilizará como base las necesidades de CO₂ del invernadero propuesto. Como se vio anteriormente, para alcanzar el punto deseado de CO₂ se necesita combustionar 19,647 Kg de gasóleo. Dado que la tasa de reposición de aire en invernaderos de este estilo oscila alrededor de 1 renovación por hora, se requerirán aproximadamente 19,647 Kg por hora. De esta forma, en un periodo anual se requerirán aproximadamente 172.100 Kg de gasóleo. Dado que el gasóleo para calefacción actualmente tiene un precio aproximado de 1,281 €/Kg, el coste de gasóleo anual será de 220.460 € el primer año.

Adicionalmente, se debe estimar los gastos de mantenimiento y operación de la maquinaria provista en el invernadero. En cuanto a la caldera de combustión, las calderas que superen una potencia de 70 kW están obligadas a mantener un contrato de mantenimiento de calderas industriales que habitualmente ronda entre 3000-6000 €/año. En cuanto a la instalación fotovoltaica, los costes suelen ser de un 1-2% del CAPEX. De esta forma, se tomará un gasto de 5000 €/año.

Por último, para considerar el gasto eléctrico de los sistemas de humidificación se ha considerado el diferencial medio anual necesario para establecer humedades de 70-75%, óptimas para el cultivo. Considerando esto, la tasa de reposición de aire y el consumo mostrado en la ficha técnica del deshumidificador, se concluye que se necesitarán 9106,02 kWh/año, lo que correspondería con 1240,72 €.

8.2.3 RESULTADOS

Para el cálculo se ha considerado un periodo de 15 años para el análisis económico, al tratarse de la vida útil media estimada de una caldera como la empleada en este proyecto. Asimismo, se ha incluido un incremento anual del 2% en el precio de venta de los cultivos, correspondiente al valor medio de la inflación, y un aumento del 5% en el precio del gasóleo, calculado a partir de la media de crecimiento registrada en los últimos ocho años. Estos supuestos permiten proyectar de manera más realista la evolución de los ingresos y costes a lo largo de la vida útil de la instalación.

Para el cálculo del Valor Actual Neto (VAN) se ha tomado una tasa de descuento del 6%, valor que se considera razonable en este tipo de proyectos agrícolas con fuerte componente tecnológico. Esta tasa refleja el coste de oportunidad del capital, es decir, la rentabilidad mínima exigida para que la inversión resulte atractiva frente a alternativas de riesgo similar. El 6% incorpora tanto la incertidumbre asociada a la evolución de los precios de la energía y los cultivos como el riesgo inherente a la explotación agrícola, situándose en un rango prudente que permite evaluar con realismo la viabilidad económica del proyecto.

De esta forma se ha obtenido

INDICADOR	VALOR
<i>VAN (6% TASA DE DESCUENTO)</i>	215.866,52 €
TIR DEL PROYECTO	9%

Tabla 26. Resultados financieros. Fuente: Elaboración propia.

VIABILIDAD DEL PROYECTO

Los resultados económicos obtenidos muestran un VAN positivo de 215.866,52 € con una tasa de descuento del 6%, lo que significa que el proyecto genera un valor adicional respecto al coste de la inversión inicial, asegurando su rentabilidad en el horizonte temporal analizado.

Asimismo, la TIR del 9% indica que la rentabilidad interna del proyecto supera el 6% exigido como tasa mínima, lo que confirma que la inversión es atractiva y viable desde el punto de vista financiero. En otras palabras, mientras la TIR se mantenga por encima de la tasa de descuento, el proyecto resulta beneficioso.

Estos resultados, en conjunto, reflejan que la instalación no solo es técnicamente factible, sino también económicamente sostenible, ofreciendo un retorno suficiente para compensar los riesgos asociados a la inversión.

VIABILIDAD DEL PROYECTO

Año	Venta de Cultivo (€)	Generación Eléctrica (€)	Gasóleo (€)	O&M (€)	Consumo Eléctrico (€)	Flujo Operativo (€)	CAPEX (€)	Flujo Neto (€)	Flujo Acumulado (€)
0	0	0	0	0	0	0	-1.349.300	-1.349.300	-1.349.300
1	414.000,00	1.035,52	220.460,00	5.000,00	1.240,72	188.334,80	0	188334,8	-1.160.965
2	422.280,00	1.035,52	231.483,00	5.000,00	1.240,72	185.591,80	0	185591,8	-975.373
3	430.725,60	1.035,52	243.057,15	5.000,00	1.240,72	182.463,25	0	182463,25	-792.910
4	439.340,11	1.035,52	255.210,01	5.000,00	1.240,72	178.924,90	0	178924,9045	-613.985
5	448.126,91	1.035,52	267.970,51	5.000,00	1.240,72	174.951,21	0	174951,2064	-439.034
6	457.089,45	1.035,52	281.369,03	5.000,00	1.240,72	170.515,22	0	170515,2193	-268.519
7	466.231,24	1.035,52	295.437,48	5.000,00	1.240,72	165.588,56	0	165588,5566	-102.930
8	475.555,87	1.035,52	310.209,36	5.000,00	1.240,72	160.141,31	0	160141,3072	57.211
9	485.066,98	1.035,52	325.719,83	5.000,00	1.240,72	154.141,96	0	154141,9566	211.353
10	494.768,32	1.035,52	342.005,82	5.000,00	1.240,72	147.557,30	0	147557,3049	358.910
11	504.663,69	1.035,52	359.106,11	5.000,00	1.240,72	140.352,38	0	140352,3805	499.263
12	514.756,96	1.035,52	377.061,41	5.000,00	1.240,72	132.490,35	0	132490,3488	631.753
13	525.052,10	1.035,52	395.914,49	5.000,00	1.240,72	123.932,42	0	123932,4173	755.685
14	535.553,15	1.035,52	415.710,21	5.000,00	1.240,72	114.637,74	0	114637,7351	870.323
15	546.264,21	1.035,52	436.495,72	5.000,00	1.240,72	104.563,29	0	104563,2875	974.886

Tabla 27. Resultados financieros. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se ha desarrollado el diseño completo de un sistema de control ambiental para un invernadero de pimiento, acompañado de una instalación fotovoltaica destinada a cubrir parte de la demanda energética. El invernadero se emplaza en Tenerife, donde se ha analizado con detalle tanto la idoneidad de las condiciones climáticas como la viabilidad de la integración del sistema de calefacción, humidificación, deshumidificación y enriquecimiento carbónico, todos ellos enfocados a incrementar la productividad del cultivo.

Desde el punto de vista técnico, se han diseñado los principales sistemas que conforman la instalación: la caldera de combustión para calefacción por agua caliente, los equipos de humidificación y nebulización, los deshumidificadores, el sistema de aporte de CO₂, así como la instalación fotovoltaica con sus elementos eléctricos asociados. Todo el diseño se ha llevado a cabo conforme a la normativa técnica vigente, garantizando la viabilidad constructiva y operativa del proyecto.

En el plano económico, se ha realizado un análisis financiero detallado, partiendo de un CAPEX que integra la adquisición de equipos ambientales y la instalación fotovoltaica. Los ingresos se han estimado en función del incremento de productividad agrícola esperado, mientras que los gastos operativos se han calculado considerando el consumo de gasóleo de la caldera, el mantenimiento de los equipos y los costes adicionales propios de este tipo de explotación. Bajo estas hipótesis, el modelo financiero permite obtener un VAN positivo y una TIR atractiva, lo que refleja la rentabilidad del proyecto en el horizonte de vida útil considerado.

En términos sociales y medioambientales, proyectos como este representan una contribución a la transición hacia una agricultura más sostenible. El control ambiental permite optimizar el uso de recursos, reducir pérdidas de producción y mejorar la calidad del cultivo. El aprovechamiento de energía solar disminuye la dependencia de combustibles fósiles, lo que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la implementación de instalaciones de este tipo genera actividad económica y empleo local en sectores ligados tanto a la agricultura como a las energías renovables.

El objetivo principal ha sido estudiar y demostrar la viabilidad técnica y económica de un invernadero de estas características. Esta meta se ha alcanzado

CONCLUSIONES

satisfactoriamente, desarrollando una propuesta realista y completa en todos sus componentes. La aportación de este trabajo reside en la integración de los distintos aspectos que intervienen en una explotación agrícola tecnificada: desde el diseño de los sistemas de climatización y generación fotovoltaica hasta la evaluación económica.

En el plano personal, este trabajo permitió ampliar el conocimiento en el ámbito agroenergético, adquirir una visión más ordenada sobre la integración de tecnologías en el sector agrícola y reforzar competencias de carácter técnico y analítico. El producto final se configura como una propuesta consistente que puede servir de apoyo y referencia en el desarrollo de futuros invernaderos orientados al rendimiento.

CAPÍTULO 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Montañó Sanz, B. (2019). El crecimiento de la población y la escasez hídrica. En J. Melgarejo Moreno (Ed.), *Congreso Nacional del Agua Orihuela. Innovación y Sostenibilidad* (pp. 509-519). Universitat d'Alacant. <https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/138f6177-bccb-4b8e-a55f-278580626a23/content>
- [2] EPData. (n.d.). *Cambio climático: datos y gráficos*. EPData. <https://www.epdata.es/datos/cambio-climatico-datos-graficos/447>
- [3] University of California Agriculture and Natural Resources (UCANR). (2018). *Carbon dioxide enrichment in greenhouses*. UCANR. <https://ucanr.edu/blog/nursery-and-flower-grower/article/carbon-dioxide-enrichment-greenhouses>
- [4] Naciones Unidas. (n.d.). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [5] Terrenos. (2025). *Cultivos en invernadero*. Terrenos. <https://terrenos.es/blog/cultivos-en-invernadero>
- [6] Mundoriego. (2025). *Invernaderos: qué son y para qué tipo de cultivos se utilizan*. Mundoriego. <https://mundoriego.es/invernaderos-que-son-y-para-que-tipo-de-cultivos-se-utilizan/?srsltid=AfmBOoqWNxLLvdnGUZ4AoIyUldKa1oRKXkUIN1Hr5bGtJjLdmAGZlfO3>
- [7] Novagric. (2025). *Control de la concentración de CO2 en los cultivos de invernadero*. Novagric. <https://novagric.com/control-de-la-concentracion-de-co2-en-los-cultivos-de-invernadero/>
- [8] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2024). *Análisis de la horticultura en invernadero y al aire libre: Balance campaña 2023/24 y previsiones 2024*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones->

BIBLIOGRAFÍA

[agricolas/analisishortalizasinvernaderoairelibrebalancecampana2023_24yprevisiones2024_257noviembre2024_tcm30-696379.pdf](#)

[9] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2024). *Análisis de la horticultura en invernadero y al aire libre: Balance campaña 2023/24 y previsiones 2024*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/analisishortalizasinvernaderoairelibrebalancecampana2023_24yprevisiones2024_257noviembre2024_tcm30-696379.pdf

[10] Ruiz-Celma, A., Salmerón, J.-L., Pulido-Granado, E., & Mera-Bravo, J.-M. (2022). *Análisis del control climático en un invernadero de rotación de cultivos*. *Dyna*, 97(2), 131-134. <https://doi.org/10.6036/10180>

[11] Nutricontrol. (2020, abril 15). *¿Cómo influye el dióxido de carbono (CO₂) en el cultivo en invernadero?* Nutricontrol. <https://nutricontrol.com/es/como-influye-el-dioxido-de-carbono-co2-en-el-cultivo-en-invernadero/>

[12] ULMA Agrícola. (2015). *Equipamiento para invernaderos*. ULMA Agrícola. <https://www.ulmaagricola.com/es/invernaderos/equipamientos/>

[13] DryGair. (2024). *El deshumidificador más eficiente para invernaderos*. DryGair. <https://drygair.com/es/blog-es/most-efficient-greenhouse-dehumidifier/>

[14] Galcán Green. (2025). *Generador de CO₂ para invernaderos*. Galcán Green. <https://www.galcangreen.com/generador-de-co2/>

[15] Asco Carbon Dioxide. (2025). *Generador de CO₂ para invernaderos*. DirectIndustry. <https://www.directindustry.es/prod/asco-carbon-dioxide/product-38377-1636857.html>

[16] Mipanel Solar. (2025). *Diferencia entre monocristalino y policristalino*. Mipanel Solar. <https://mipanel solar.com/blog/diferencia-entre-monocristalino-y-policristalino>

[17] EnergySage. (2025). *Monocrystalline vs. polycrystalline solar panels: What's the difference?* EnergySage. <https://www.energysage.com/solar/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar/>

[18] SotySolar. (2025). *¿Qué son los inversores fotovoltaicos?* SotySolar. <https://sotysolar.es/blog/que-son-los-inversores-fotovoltaicos>

BIBLIOGRAFÍA

- [19] Fotovoltaica Solar. (2025). *Inversor multifunción VMIII 3000W/24V MPPT 80A 500V*. Fotovoltaica Solar. <https://www.fotovoltaicasolar.es/inversores-de-onda-pura/111-inversor-multifuncion-vmiii-3000w24v-mppt-80a-500v.html>
- [20] AutoSolar. (n.d.). *¿Qué tipos de inversores fotovoltaicos existen?* AutoSolar. <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/que-tipos-de-inversores-fotovoltaicos-existen>
- [21] Axial Structural. (2015, junio). *El origen de la energía solar fotovoltaica*. Axial Structural. <https://www.axialstructural.com/el-origen-de-la-energia-solar-fotovoltaica>
- [22] Panel Power. (2025). *¿Cómo funcionan los paneles solares?* Panel Power. <https://www.panelpower.com.mx/como-funcionan-los-paneles-solares>
- [23] Figura - Solarplak. (2023). *¿Quién inventó los paneles solares?* Solarplak. <https://solarplak.es/energia/quien-invento-los-paneles-solares/>
- [24] Agencia Andaluza de la Energía. (n.d.). *Glosario de términos sobre irradiancia y radiación*. Agencia Andaluza de la Energía. [https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/glosario.php#:~:text=Irradiancia%20\(l\)%3A%20la%20radiaci%C3%B3n,%2Fm2%20\(Energ%C3%ADa\)](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/glosario.php#:~:text=Irradiancia%20(l)%3A%20la%20radiaci%C3%B3n,%2Fm2%20(Energ%C3%ADa))
- [25] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2012). *Atlas de radiación solar*. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar
- [26] Global Solar Atlas (2024). *Spain*. Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info/download/spain>
- [27] Infoagro. (n.d.). *Invernaderos tipo raspa y amagado*. Infoagro. https://www.infoagro.com/documentos/invernaderos_raspa_y_amagado.asp
- [28] WeatherSpark. (2025). *Average weather in Tenerife, Spain year-round*. WeatherSpark. <https://weatherspark.com/y/150427/Average-Weather-in-Tenerife-Spain-Year-Round>
- [29] Climate-Data.org. (2022). *Santa Cruz de Tenerife, Canarias, España – Clima y datos climáticos*. Climate-Data.org. <https://es.climate-data.org/europa/espana/canarias/santa-cruz-de-tenerife-573/>

BIBLIOGRAFÍA

- [30] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). *Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Production in the South European Countries*. – In brief. FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i6787en>
- [31] Rosmaina, & Zulfahmi. (2022). *Temperature critical threshold for yield in chili pepper (Capsicum annuum L.)*. Trabajo de investigación.
- [32] Kesumawati, E., & Rahmawati, M. (2020). *The effect of shading levels and varieties on the growth and yield of chili plants (Capsicum annuum L.)*. Trabajo de investigación.
- [33] Alonso Ramírez, F. J. (2011). *Efecto del enriquecimiento carbónico sobre la bioproductividad y la absorción hídrica y mineral del cultivo de pimiento*. Departamento de Producción Vegetal, Universidad de Almería.
- [34] Muñoz, P., Antón, A., & Montero, J. I. (2004). *Cultivo de pimiento en invernadero: Influencia de la humedad ambiental y de la salinidad*. Departament de Tecnologia Hortícola, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA).
- [35] López-Luque, R., Martínez, J., Reca, J. & Ruiz, R. (2017). *Análisis de viabilidad y gestión del riego en invernaderos mediterráneos con energía solar fotovoltaica*. Ribagua, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1332806>
- [36] Huawei. (n.d.). *SUN2000-3/4/5/6/8/10KTL-M1 solar inverter specifications*. Huawei. https://solar.huawei.com/en/products/sun2000-3-4-5-6-8-10ktl-m1/specs/?utm_source
- [37] Reche Mármol, J. (2010). *Cultivo del pimiento dulce en invernadero*.
- [38] Preciogas. (n.d.). *Precio del gasóleo*. Preciogas. https://preciogas.com/instalaciones/calefaccion/gasoleo?utm_source
- [39] VentDepot. (2025). *CycloZoom – Ciclones industriales MXCCZ 001-028*. VentDepot. <https://ventdepot.mx/products/cyclozoom-ciclones-industriales-mxccz-001-028?variant=40573254598741>
- [40] Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *Review of the secondary national ambient air quality standards for oxides of nitrogen, oxides of sulfur, and particulate matter*. Environmental Protection Agency (EPA).

BIBLIOGRAFÍA

- [41] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops*. FAO.
- [42] Temarios Formativos Profesionales. (2014, septiembre). *Los gases de la combustión* [PDF]. Temarios Formativos Profesionales. <https://temariosformativosprofesionales.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/09/los-gases-de-la-combustion3b3n.pdf>
- [43] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries*. FAO.
- [44] Qibang Netting. (n.d.). *How much does shade cloth reduce temperature?* Qibang Netting. https://qibangnetting.com/how-much-does-shade-cloth-reduce-temperature/?utm_source
- [45] Ygnis. (2025). *Calderas industriales EUROMAX S*. Ygnis. <https://www.ygnis.es/calderas-industriales/euromax-s/>
- [46] MacoGlass. (2025). *Malla de sombreado 40% blanco – rollos 3x100 m*. Mallas y Plásticos. <https://www.mallasypasticos.com/malla-sombreado/-malla-sombreado-40-blanco-rollos-3x100m.html>