



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE INVERNADEROS
DE ALTO RENDIMIENTO PRODUCTIVO CON
ATMÓSFERA ENRIQUECIDA EN CO₂.

Autor: José Herrera Téllez

Director: Katia Hueso Kortekaas

Madrid

Agosto de 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“ESTUDIO DE VIABILIDAD DE INVERNADEROS DE ALTO
RENDIMIENTO PRODUCTIVO CON ATMÓSFERA ENRIQUECIDA EN CO₂”
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/2022 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.: José Herrera Téllez

Fecha: 29/ 08/ 2022



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Katia Hueso Kortekaas

Fecha: 29/ 08/ 2022

**Katia
Hueso**

Firmado digitalmente por Katia Hueso
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=Katia Hueso, o,ou,
email=katiahueso@gmail.com, c=<n
Fecha: 2022.08.29 17:29:31 +02'00'



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE INVERNADEROS DE ALTO RENDIMIENTO PRODUCTIVO CON ATMÓSFERA ENRIQUECIDA EN CO₂

Autor: José Herrera Téllez

Director: Katia Hueso Kortekaas

Madrid

Agosto de 2022

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE INVERNADEROS DE ALTO RENDIMIENTO PRODUCTIVO CON ATMÓSFERA ENRIQUECIDA EN CO₂

Autor: Herrera Téllez, José

Director: Hueso Kortekaas, Katia

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

El proyecto consiste en el estudio de viabilidad de diseño de un invernadero para frutales y/u hortalizas en sinergia con una instalación industrial, enmarcado en el concepto de ecología industrial. Para ello se enfoca la investigación en la posibilidad de invernaderos con alta concentración de CO₂ en atmósfera, siendo una interacción novedosa en cuanto al aporte directo de emisiones industriales como recurso agrícola.

El objetivo de la alta concentración de este gas es aumentar el rendimiento de producción, aumentando el ritmo de crecimiento y reduciendo el consumo de agua con respecto a sistemas de cultivo más tradicionales. Otros beneficios de la interacción agroindustrial como el uso de calor residual o reutilización de subproductos de las explotaciones son estudiados con el fin de obtener el diseño más funcional.

Se recaba información técnica sobre los métodos de enriquecimiento más adaptables, la biología de determinados cultivos sometidos a altas concentraciones de CO₂, altas temperaturas y los últimos avances en la construcción de invernaderos que vayan en sintonía con los objetivos principales de diseño y producción.

Tras evaluar los datos recabados, se proponen varios modelos de explotación atendiendo a la viabilidad técnica y económica. Para ello se realiza un análisis de costes de instalación y un estudio de costes de operación una vez puesta en marcha la instalación modelo que resulte del estudio.

El estudio contempla las posibles sinergias de este modelo de producción con otras explotaciones agrícolas/ industriales, el impacto medioambiental, las localizaciones idóneas para llevar a cabo este tipo de explotaciones y la adhesión a los ODS de la Agenda 2030.

Metodología

Dada la carga técnica y de conocimientos sobre botánica que requiere el diseño de un invernadero, se recabó primero toda la información posible sobre las tecnologías existentes que están implicadas en este tipo de diseño, como la de sistemas de conducción y filtrado de gases residuales, tipos de invernadero y las últimas técnicas de agricultura

en interiores. Posteriormente se propusieron varios diseños de instalaciones integradas, sobre los que se realizó un análisis de ventajas e inconvenientes. Los criterios que valorar fueron principalmente mecánicos, energéticos, económicos, biológicos y medioambientales.

Una vez escogidos los modelos, se procedió a realizar una propuesta que evaluara la eficiencia energética de los modelos, dimensionando las instalaciones en torno a una producción objetivo de 5.000 toneladas de producto procesado. El principal objetivo era garantizar el aporte necesario de CO₂ y maximizar las sinergias, por lo que se incluyeron tecnologías de refrigeración y uso de residuos agrícolas. Se propusieron tres alternativas de plantas de cogeneración a instalar de diferentes potencias, con el criterio mínimo de, operando a carga completa, poder cubrir la demanda de CO₂ de los invernaderos, con su correspondiente gasto energético.

$$\dot{Q}_{CCU} = \frac{m_{biomCCU} \times PCI_{biom}}{\eta_v \times t} \times q_{\frac{CCU}{m_{CO_2}}} \times \left(\frac{X_{CO_2}}{\eta_{CCU}} \right)$$

Por último, tras comprobar la viabilidad técnica de todas las combinaciones, se realizó el estudio de viabilidad económica.

Resultados

Los modelos escogidos para el estudio económico y funcional serían el de cogeneración de biomasa con invernadero de cultivo de pepinos e industria de procesamiento de frescos y el de planta de procesamiento térmico de alimentos, sin aprovechamiento directo de CO₂. La demanda energética en función de la producción es la siguiente:

Tipo de producción	Toneladas anuales	Consumo eléctrico anual (kWh)	Consumo térmico anual (kWh)
Frescos	5.000	122.500	180.000
Tratamientos térmicos	5.000	167.000	3.055.000

Toneladas anuales	Producción anual (kg m-2)	Superficie requerida (ha)	Consumo ref anual (kWh)	Consumo cal anual (kWh)	Toneladas anuales restos	Toneladas de CO ₂ requeridas
5.000	60,00	8,33	14.435.556	18.249.833	900	21.900

Se seleccionaron 3 plantas de cogeneración con biomasa de 1, 2 y 0,6 MWe de potencia, que debían suministrar, al menos, 19,01 Gwh anuales térmicos para asegurar el suministro de CO₂, además de acoplarles sistemas de refrigeración por absorción y captura de CO₂

Instalación		1 MWe	2 MWe	0,6 MWe
Nº de horas	[h]	6.048,00	3.400,00	7.272,00
ηv_{nom}	[%]	75%	75%	71%
η_e	[%]	14,5%	14,5%	14,0%
E	[MWh]	6.048,00	6.800,00	4.363,20
V_{total}	[MWh]	12.272,46	16.162,12	2.369,39
\dot{V}	[MW]	2,03	4,75	0,33
V_C	[MWh]	2.659,03	6.229,07	426,96
V_H	[MWh]	7.840,74	5.780,33	1.657,79
$V_{total} + Q_{CCU}$	[MWh]	31.282,76	35.172,41	21.379,68
Q	[MWh]	41.710,34	46.896,55	30.285,74
AEP	[%]	-6%	1%	-48%
REE	[%]	23%	25%	16%
$Q_{biom_{ext}}$	[Mwh]	41.472,83	46.659,04	30.048,23
ηt_{real}	[%]	43,92%	48,96%	22,23%
ηv_{real}	[%]	29,42%	34,46%	7,82%

Instalación		1 MWe	2 MWe	0,6 MWe
Nº de horas	[h]	6.544,00	3.400,00	7.768,00
ηv_{nom}	[%]	75%	75%	71%
η_e	[%]	14,5%	14,5%	14,0%
E	[MWh]	6.544,00	6.800,00	4.660,80
V_{total}	[MWh]	14.837,98	16.162,12	3.827,63
\dot{V}	[MW]	2,27	4,75	0,49
V_C	[MWh]	2.971,22	6.229,07	645,69
V_H	[MWh]	9.885,94	5.780,33	2.751,48
$V_{total} + Q_{CCU}$	[MWh]	33.848,28	35.172,41	22.837,92
Q	[MWh]	45.131,03	46.896,55	32.351,44
AEP	[%]	-1%	1%	-38%
REE	[%]	25%	25%	17%
$Q_{biom_{ext}}$	[Mwh]	44.893,52	46.659,04	32.113,93
ηt_{real}	[%]	47,38%	48,96%	26,24%
ηv_{real}	[%]	32,88%	34,46%	11,83%

El TIR calculado para todas las propuestas se presenta en la siguiente tabla:

	Planta de Frescos + Invernadero			Planta de Encurtidos + Invernadero		
	1 MWe	2 MWe	0,6 MWe	1 MWe	2 MWe	0,6 MWe
INVP	7.609.155 €	11.533.322 €	3.570.000 €	7.609.155 €	11.533.322 €	3.570.000 €
INV_{CCU}	649.400 €	1.298.800 €	389.640 €	649.400 €	1.298.800 €	389.640 €
INV_C	1.087.233 €	2.546.960 €	174.576 €	1.214.882 €	2.546.960 €	264.012 €
C_M	250.000 €	250.000 €	43.632 €	250.000 €	250.000 €	46.608 €
C_A	60.000 €	60.000 €	60.000 €	60.000 €	60.000 €	60.000 €
C_{biom_{ext}}	674.225 €	758.428 €	488.735 €	729.763 €	758.428 €	522.274 €
C_{biom_{int}}	30.835 €	30.835 €	30.835 €	30.835 €	30.835 €	30.835 €
A_e	1.657.152 €	1.863.200 €	1.195.517 €	1.793.056 €	1.863.200 €	1.277.059 €
A_H	627.259 €	462.427 €	132.623 €	790.875 €	462.427 €	220.118 €
A_C	91.072 €	213.346 €	14.623 €	101.764 €	213.346 €	22.115 €
TIR	14,62%	8,84%	17,51%	17,16%	8,84%	20,37%

Conclusiones

Pese a que en ambos casos el grupo de cogeneración más eficiente es el de 2 MWe, el diseño que mantiene una mayor sinergia con mayor rentabilidad es el de invernadero con planta de procesamiento térmico de encurtidos con un sistema de cuatrigeneración de 0,6 MWe, ya que requiere menor inversión y opera una mayor cantidad de horas. El diseño se ve limitado, al no estudiar la operación a carga parcial y otros cultivos y tecnologías que permitan un mayor aprovechamiento energético.

FEASIBILITY STUDY OF HIGH PRODUCTIVE YIELD GREENHOUSES WITH CO₂-ENRICHED ATMOSPHERE

Author: Herrera Téllez, José

Director: Hueso Kortekaas, Katia

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Introduction

The project consists of the feasibility study of the design of a greenhouse for fruit trees and/or vegetables in synergy with an industrial installation, framed in the concept of industrial ecology. The research focuses on the possibility of greenhouses with high concentration of CO₂ in the atmosphere, being a novel interaction in terms of the direct contribution of industrial emissions as an agricultural resource.

The objective of the high concentration of this gas is to increase the production yield, increasing the growth rate and reducing water consumption with respect to more traditional farming systems. Other benefits of agro-industrial interaction such as the use of waste heat or reuse of farm by-products are studied to obtain the most functional design.

Technical information is gathered on the most adaptable enrichment methods, the biology of certain crops subjected to high CO₂ concentrations, high temperatures and the latest advances in greenhouse construction in line with the main design and production objectives.

After evaluating the data collected, several operating models are proposed, considering the technical and economic feasibility. For this purpose, an analysis of installation costs and a study of operating costs once the model installation resulting from the study has been commissioned will be carried out.

The study will consider the possible synergies of this production model with other agricultural/industrial farms, the environmental impact, the ideal locations to carry out this type of farms and the adherence to the SDGs of the 2030 Agenda.

Methodology

Given the technical load and knowledge of botany required by the design of a greenhouse, all possible information was first collected on the existing technologies that are involved in this type of design, such as waste gas conduction and filtration systems, types of greenhouses and the latest indoor farming techniques. Subsequently, several designs of integrated facilities were proposed, on which an analysis of advantages and disadvantages was carried out. The criteria to be assessed were mainly mechanical, energy, economic, biological and environmental.

Once the models were chosen, a proposal was made to evaluate the energy efficiency of the models, sizing the facilities around a target production of 5,000 tons of processed product. The main objective was to ensure the necessary contribution of CO₂ and maximize synergies, so refrigeration technologies and use of agricultural waste were included. Three alternatives of cogeneration plants to be installed of different powers were proposed, with the minimum criterion of, operating at full load, being able to cover the CO₂ demand of the greenhouses, with its corresponding energy expenditure.

$$\dot{Q}_{CCU} = \frac{m_{biomCCU} \times PCI_{biom}}{\eta_v \times t} \times q_{CCU} \times \left(\frac{X_{CO_2}}{\eta_{CCU}} \right)$$

Finally, after checking the technical feasibility of all the combinations, the economic feasibility study was carried out.

Results

The models chosen for the economic and functional study would be the cogeneration of biomass with greenhouse of cucumber cultivation and fresh processing industry and that of thermal food processing plant, without direct use of CO₂. The energy demand as a function of production is as follows:

Type of production	Annual tons	Annual electricity consumption (kWh)	Annual thermal consumption (kWh)
Fresh	5.000	122.500	180.000
Heat treatments	5.000	167.000	3.055.000

Annual tons	Annual production (kg m ⁻²)	Required area (ha)	Annual ref consumption (kWh)	Annual lime consumption (kWh)	Annual tons of remains	Tons of CO ₂ required
5.000	60,00	8,33	14.435.556	18.249.833	900	21.900

3 cogeneration plants with biomass of 1, 2 and 0.6 MWe of power were selected, which had to supply at least 19.01 Gwh per year thermal to ensure the supply of CO₂, in addition to coupling cooling systems by absorption and capture of CO₂

Instalación		1 MWe	2 MWe	0,6 Mwe
Nº de horas	[h]	6.048,00	3.400,00	7.272,00
ηv_{nom}	[%]	75%	75%	71%
η_e	[%]	14,5%	14,5%	14,0%
E	[MWh]	6.048,00	6.800,00	4.363,20
V_{total}	[MWh]	12.272,46	16.162,12	2.369,39
\dot{V}	[MW]	2,03	4,75	0,33
V_C	[MWh]	2.659,03	6.229,07	426,96
V_H	[MWh]	7.840,74	5.780,33	1.657,79
$V_{total} + Q_{CCU}$	[MWh]	31.282,76	35.172,41	21.379,68
Q	[MWh]	41.710,34	46.896,55	30.285,74
AEP	[%]	-6%	1%	-48%
REE	[%]	23%	25%	16%
$Q_{biom_{ext}}$	[Mwh]	41.472,83	46.659,04	30.048,23
ηt_{real}	[%]	43,92%	48,96%	22,23%
ηv_{real}	[%]	29,42%	34,46%	7,82%

Instalación		1 MWe	2 MWe	0,6 Mwe
Nº de horas	[h]	6.544,00	3.400,00	7.768,00
ηv_{nom}	[%]	75%	75%	71%
η_e	[%]	14,5%	14,5%	14,0%
E	[MWh]	6.544,00	6.800,00	4.660,80
V_{total}	[MWh]	14.837,98	16.162,12	3.827,63
\dot{V}	[MW]	2,27	4,75	0,49
V_C	[MWh]	2.971,22	6.229,07	645,69
V_H	[MWh]	9.885,94	5.780,33	2.751,48
$V_{total} + Q_{CCU}$	[MWh]	33.848,28	35.172,41	22.837,92
Q	[MWh]	45.131,03	46.896,55	32.351,44
AEP	[%]	-1%	1%	-38%
REE	[%]	25%	25%	17%
$Q_{biom_{ext}}$	[Mwh]	44.893,52	46.659,04	32.113,93
ηt_{real}	[%]	47,38%	48,96%	26,24%
ηv_{real}	[%]	32,88%	34,46%	11,83%

The calculated IRR for all proposals is presented in the following table:

	Fresh Plant + Greenhouse			Pickle Plant + Greenhouse		
	1 MWe	2 MWe	0.6 MWe	1 MWe	2 MWe	0.6 MWe
INV_p	7.609.155 €	11.533.322 €	3.570.000 €	7.609.155 €	11.533.322 €	3.570.000 €
INV_{CCU}	649.400 €	1.298.800 €	389.640 €	649.400 €	1.298.800 €	389.640 €
INV_C	€1,087,233	2.546.960 €	€174,576	€1,214,882	2.546.960 €	€264,012
C_M	€250,000	€250,000	€43,632	€250,000	€250,000	€46,608
C_A	€60,000	€60,000	€60,000	€60,000	€60,000	€60,000
C_{bio_{ext}}	674.225 €	€758,428	€488,735	€729,763	€758,428	€522,274
C_{bio_{int}}	€30,835	€30,835	€30,835	€30,835	€30,835	€30,835
A_e	1.657.152 €	1.863.200 €	1.195.517 €	€1,793,056	1.863.200 €	1.277.059 €
A_H	€627,259	€462,427	€132,623	790.875 €	€462,427	€220,118
A_C	€91,072	€213,346	€14,623	€101,764	€213,346	€22,115
IRR	14,62%	8,84%	17,51%	17,16%	8,84%	20,37%

Conclusions

Although in both cases the most efficient cogeneration group is that of 2 MWe, the design that maintains a greater synergy with greater profitability is that of greenhouse with thermal processing plant of pickles with a four-generation system of 0.6 MWe, since it requires less investment and operates a greater number of hours. The design is limited, as it does not study the operation at partial load and crops and technologies that allow a greater energy use.

DOCUMENTO N°1, MEMORIA

ESTE PROYECTO CONTIENE LOS SIGUIENTES DOCUMENTOS

Documento n°1, Memoria

1.1 Memoria	pág. 7 a 34	27 páginas
1.2 Estudio de viabilidad	pág. 35 a 62	27 páginas
1.3 Impacto ambiental	pág. 63 a 72	9 páginas
1.4 Anejos	pág. 73 a 84	11 páginas

Documento n°2, Estudio Económico

1.5 Resultados	pág. 87 a 97	10 páginas
----------------	--------------	------------

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. CLIMA DE LA PENÍNSULA IBÉRICA SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE TREWARTHA. AUTOR: ROBERTO FERNÁNDEZ SUBERVIOLA. RECURSO: METEORED	12
ILUSTRACIÓN 2. SERIE ILUSTRATIVA DE LOS PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES Y SOCIALES CAUSADOS POR DETERMINADOS CULTIVOS. FUENTE: NETFLIX.....	14
ILUSTRACIÓN 3. FOTOSÍNTESIS TIPO C3. FUENTE: KHANACADEMY	15
ILUSTRACIÓN 4. FOTOSÍNTESIS TIPO C4. FUENTE: KHANACADEMY	16
ILUSTRACIÓN 5. FOTOSÍNTESIS TIPO CAM. FUENTE: KHANACADEMY.....	17
ILUSTRACIÓN 6. CULTIVO DE PIMIENTOS VERDES EN UN INVERNADERO COMERCIAL DE LOS PAÍSES BAJOS. AUTOR: HANSENN. FUENTE:123RF.....	18
ILUSTRACIÓN 7. EJEMPLO DE CULTIVO INTERIOR CON TECNOLOGÍA IoT (INTERNET DE LAS COSAS). FUENTE: LA HUERTA DIGITAL.....	19
ILUSTRACIÓN 8. LA ECOLOGÍA INDUSTRIAL DE KALUNDBORG EN DINAMARCA (EN 2002). FUENTE: THE CENTER FOR INDUSTRIAL SYMBIOSIS, KALUNDBORG (HANSEN, 2003).....	20
ILUSTRACIÓN 9. ESQUEMA DE CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE CARBÓN CON GICC. FUENTE: GLOBAL ELECTRICITY (2013)	24
ILUSTRACIÓN 10. CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGAS. NÓTESE LA OPTIMIZACIÓN DEL TERRENO. FUENTE: NOVACIENCIA	26
ILUSTRACIÓN 11. PLANTA DE COGENERACIÓN CON CICLO DE RANKINE ORGÁNICO CON BIOMASA Y APLICACIÓN DE SECADO DE SUBPRODUCTOS FORESTALES. FUENTE: PRODESA	27
ILUSTRACIÓN 12. CULTIVO DE MANGO EN INVERNADERO DE MÁLAGA. SE PUEDE APRECIAR LA ACUMULACIÓN DE MATERIA VEGETAL CON POTENCIAL COMO BIOMASA. FUENTE: AGROAUTÉNTICO. AUTOR: JOSÉ ANTONIO ARCOS.....	29
ILUSTRACIÓN 13. DEPÓSITOS DE CO ₂ PURIFICADO PERTENECIENTES A CARBONECO, OBTENIDO DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN. FUENTE: RESIDUOS PROFESIONAL.....	30
ILUSTRACIÓN 14. FÁBRICA DE ZUMOS DE DON SIMÓN EN HUELVA RODEADA DE NARANJALES, CONCEPTO APLICABLE A CULTIVOS DE INVERNADERO. FUENTE: DON SIMÓN	32
ILUSTRACIÓN 15. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN PLANTAS INDUSTRIALES HORTOFRUTÍCOLAS. FUENTE: COOPERATIVAS AGRO-ALIMENTARIAS	43
ILUSTRACIÓN 16. DEMANDA TÉRMICA DE LOS INVERNADEROS PARA UNA PRODUCCIÓN DE 5.000 T	49
ILUSTRACIÓN 17. DEMANDA ELÉCTRICA DE LOS INVERNADEROS PARA UNA PRODUCCIÓN DE 5.000 T	49
ILUSTRACIÓN 18. CURVA DE DEMANDA ELÉCTRICA POR LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO TÉRMICO ASUMIENDO ENVASADO ESTIVAL.	51
ILUSTRACIÓN 19. CURVA DE DEMANDA TÉRMICA POR LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO TÉRMICO ASUMIENDO ENVASADO ESTIVAL.	51
ILUSTRACIÓN 20. CURVA DE DEMANDA TÉRMICA DEL CONJUNTO INVERNADEROS + PLANTA DE PROCESAMIENTO DE FRESCOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	52
ILUSTRACIÓN 21. CURVA DE DEMANDA ELÉCTRICA DEL CONJUNTO INVERNADEROS + PLANTA DE PROCESAMIENTO DE FRESCOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	52
ILUSTRACIÓN 22. CURVA DE DEMANDA TÉRMICA DEL CONJUNTO INVERNADEROS + PLANTA DE ENCURTIDOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	53
ILUSTRACIÓN 23. CURVA DE DEMANDA TÉRMICA DEL CONJUNTO INVERNADEROS + PLANTA DE ENCURTIDOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	53

ILUSTRACIÓN 24. BIOMASA TEÓRICA DISPONIBLE PARA ABASTECER AL CONJUNTO. NÓTESE EL VALOR DE HUMEDAD ESTIMADO DE 75% EN BIOMASA DE REGADÍO. FUENTE: BIORAISE	55
ILUSTRACIÓN 25. MODELO DE COGENERACIÓN CON BIOMASA Y ORC. FUENTE: ICAI, “¿ES RENTABLE LA BIOMASA PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD Y CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADA PARA VIVIENDAS EN ESPAÑA?” AUTORES: M. URIS, E. ARENAS, J.I. LINARES (2017).....	55
ILUSTRACIÓN 26. EJEMPLO DE ORC CON COGENERACIÓN DE BIOMASA Y SISTEMA DE CAPTURA DE CO ₂ POST-COMBUSTION CON MEA. FUENTE: THERMODYNAMIC ANALYSIS AND ECONOMIC ASSESSMENT OF BIOMASS-FIRED ORGANIC RANKINE CYCLE COMBINED HEAT AND POWER SYSTEM INTEGRATED WITH CO ₂ CAPTURE. AUTORES: ZHU, L. ET AL	56
ILUSTRACIÓN 27. GRÁFICO DE EVALUACIÓN DE LOS CEE DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS EN BASE A LA TEMPERATURA DEL AGUA DEL CONDENSADOR. FUENTE: ICAI. AUTOR: CORONAS (2005)	57
ILUSTRACIÓN 28. CONTROL DE RIEGO EN UN INVERNADERO. FUENTE: EL ÁGORA. AUTOR: CURRO VALLEJO	67
ILUSTRACIÓN 29. Balsa de recogida de agua de lluvia. FUENTE: EL ÁGORA. AUTOR: CURRO VALLEJO	68
ILUSTRACIÓN 30. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030. FUENTE: ONU	77
ILUSTRACIÓN 31. ODS 7. FUENTE: IS GLOBAL	77
ILUSTRACIÓN 32. ODS 9. FUENTE: EL FARO LUZ Y CIENCIA	78
ILUSTRACIÓN 33. ODS 11. FUENTE: ONU	79
ILUSTRACIÓN 34. ODS 12. FUENTE: IS GLOBAL	80
ILUSTRACIÓN 35. ODS 13. FUENTE: IS GLOBAL	81
ILUSTRACIÓN 36. ODS 15. FUENTE: IS GLOBAL	82
ILUSTRACIÓN 37. DIAGRAMA SANKEY DE FLUJO ENERGÉTICO PORCENTUAL. NÓTESE EL RETORNO DE SUBPRODUCTOS AGRÍCOLAS DEL INVERNADERO COMO COMBUSTIBLE Y EL 40% DE LA ENERGÍA INVERTIDA EN PROCESAR LAS EMISIONES. FUENTE: PROPIA. RECURSO: SANKEYMATIC	92
ILUSTRACIÓN 38. EXTRACCIÓN DE CO ₂ CON FINES COMERCIALES EN SUIZA. FUENTE: BBC, CLIMEWORKS	96

Índice de tablas

TABLA 1. SUPERFICIE DE INVERNADERO POR TIPO DE CULTIVO EN ESPAÑA. FUENTE: STATISTA.....	13
TABLA 2. RELACIÓN ENTRE SUPERFICIE DE INVERNADEROS Y PRODUCCIÓN ECONÓMICA. FUENTE: CSIC	13
TABLA 3. CRONOGRAMA INICIAL DE DISTRIBUCIÓN DE TAREAS	34
TABLA 4. GUÍA DE CRITERIOS DE PUNTUACIÓN DE LOS ATRIBUTOS.....	40
TABLA 5. COMPARATIVA DE LOS DIFERENTES MODELOS DE SINERGIAS AGROINDUSTRIAL	40
TABLA 6. CONSUMO ENERGÉTICO MEDIO POR TONELADA PROCESADA EN INDUSTRIA HORTOFRUTÍCOLA DE FRESCOS (P.E. ENCURTIDOS Y CONSERVAS). FUENTES: COOPERATIVAS AGRO-ALIMENTARIAS, ENEA.....	43
TABLA 7. CONSUMO Y POTENCIA ENERGÉTICA INSTALADA EN UNA PLANTA DE 10.000 TONELADAS PROCESADAS ANUALES EN INDUSTRIA FRUTÍCOLA. FUENTE: ENEA, OBTENIDO DE UN ESTUDIO DE LA UNIVERSIDAD DE ÉVORA.....	44
TABLA 8. CONSUMO ENERGÉTICO MEDIO POR TONELADA PROCESADA EN INDUSTRIA HORTOFRUTÍCOLA CON TRATAMIENTOS TÉRMICOS (P.E. ENCURTIDOS Y CONSERVAS). FUENTE: ENEA	45
TABLA 9. CÁLCULO DE DEMANDA ENERGÉTICA ANUAL DE CADA CASO. FUENTE: PROPIA, ELABORADA CON DATOS ENEA.....	45
TABLA 10. GASTO ENERGÉTICO EN kWh DURANTE EL AÑO EN UN INVERNADERO DE 150 m ² EN CLIMA MEDITERRÁNEO. FUENTE: YILDIRIM ET AL, " EVALUATION OF A HYBRID SYSTEM FOR A NEARLY ZERO ENERGY GREENHOUSE"	47
TABLA 11. DEMANDA ENERGÉTICA DE LOS CULTIVOS. FUENTE: PROPIA, DATOS INICIALES DE YILDIRIM ET AL.....	47
TABLA 12. BIOMASA RESIDUAL, EN TONELADAS HÚMEDAS (70-75% HUMEDAD). FUENTE: PROPIA.....	47
TABLA 13. POTENCIA TÉRMICA REQUERIDA (CALEFACCIÓN:ROJO/REFRIGERACIÓN:AZUL) CADA HORA EN SISTEMA DE INVERNADERO,. FUENTE: PROPIA CON DATOS DE YILDIRIM ET AL	48
TABLA 14. POTENCIA DEMANDADA POR LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO EN FRESCO, ASUMIENDO OPERACIÓN CONSTANTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE ENEA	50

TABLA 15. POTENCIA DEMANDADA POR LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO TÉRMICO ASUMIENDO ENVASADO ESTIVAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE ENEA.....	50
TABLA 16. PODER CALORÍFICO ASUMIDO PARA LA PRODUCCIÓN OBJETIVO. FUENTE: PROPIA, CON DATOS DE THE POSSIBILITY OF MEETING GREENHOUSE ENERGY AND CO2 DEMANDS THROUGH UTILISATION OF CUCUMBER AND TOMATO RESIDUES.....	54
TABLA 17. CLIMATOLOGÍA ANUAL EN UN CLIMA MEDITERRÁNEO CONTINENTAL, MADRID. FUENTE: CLIMATE-DATA.ORG .	54
TABLA 18. DATOS TÉCNICOS DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE COGENERACIÓN. FUENTE: TECHNO-ECONOMIC FEASIBILITY ASSESSMENT OF A BIOMASS COGENERATION PLANT BASED ON AN ORGANIC RANKINE CYCLE. AUTORES: URIS, LINARES, ARENAS.....	57
TABLA 19. BIOMASA MÍNIMA REQUERIDA PARA SATISFACER LA DEMANDA DE CO2.....	57
TABLA 20. DATOS TÉCNICOS PARA LAS DIFERENTES PROPUESTAS DE DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA. FUENTES: “TECHNO-ECONOMIC FEASIBILITY ASSESSMENT OF A BIOMASS COGENERATION PLANT BASED ON AN ORGANIC RANKINE CYCLE” & “A TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF SMALL-SCALE, BIOMASS-FUELLED COMBINED HEAT AND POWER FOR COMMUNITY HOUSING”. AUTORES: (URIS, LINARES ET ARENAS, 2017) & (WOOD ET ROWLEY, 2011)	59
TABLA 21. DATOS ECONÓMICOS GENERALES DE LA PLANTA DE COGENERACIÓN. FUENTE: TECHNO-ECONOMIC FEASIBILITY ASSESSMENT OF A BIOMASS COGENERATION PLANT BASED ON AN ORGANIC RANKINE CYCLE. AUTORES: URIS, LINARES, ARENAS.....	60
TABLA 22. COSTES ASOCIADOS AL COMBUSTIBLE. FUENTE: BIORAISE	61
TABLA 23. TABLA DE PRECIOS ENERGÉTICOS Y FACTORES DE CONVERSIÓN. FUENTES: ROAMS ENERGÍA GRANDES EMPRESAS, ICAI, CALOR Y FRIO, PRECIO GAS.	61
TABLA 24. COSTES RELACIONADOS CON EL SISTEMA DE CAPTURA DE CO ₂ . FUENTE: THERMODYNAMIC ANALYSIS AND ECONOMIC ASSESSMENT OF BIOMASS-FIRED ORGANIC RANKINE CYCLE COMBINED HEAT AND POWER SYSTEM INTEGRATED WITH CO ₂ CAPTURE. AUTORES: ZHU, L. ET AL.....	62
TABLA 25. HUELLA DE CARBONO DE ALGUNOS TIPOS DE FRUTAS EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN. FUENTE: HUELLA DE CARBONO GENERADA POR EL CONSUMO DE FRUTAS Y VERDURAS EN ESPAÑA. AUTORES: LAURA CHARDÍ, ET AL.	69
TABLA 26. HUELLA DE CARBONO DE ALGUNOS TIPOS DE VERDURAS EN LA ETAPA DE PRODUCCIÓN. FUENTE: HUELLA DE CARBONO GENERADA POR EL CONSUMO DE FRUTAS Y VERDURAS EN ESPAÑA. (2016) AUTORES: LAURA CHARDÍ, ET AL.....	70
TABLA 27. PARÁMETROS TÉCNICOS Y RENDIMIENTO DEL CONJUNTO ENERGÉTICO-AGROINDUSTRIAL CON PROCESAMIENTO DE FRESCOS Y CAPTURA DE CO ₂	91
TABLA 28. CONSUMOS ELÉCTRICOS VS GENERACIÓN CONJUNTO PLANTA DE FRESCOS + INVERNADEROS	92
TABLA 29. PARÁMETROS TÉCNICOS Y RENDIMIENTO DEL CONJUNTO ENERGÉTICO-AGROINDUSTRIAL CON FABRICACIÓN DE ENCURTIDOS Y CAPTURA DE CO ₂	93
TABLA 30. PRODUCCIÓN ELÉCTRICA A 2 MW, 1 MW Y 0,6 MW, EVIDENCIANDO EL SOBREDIMENSIONAMIENTO ELÉCTRICO EN LOS DISEÑOS DE 1 MW Y 2 MW Y LA PREDOMINANCIA DE LAS CARGAS TÉRMICAS EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO, EN ESTE CASO EN EL CONJUNTO ENCURTIDORA/ INVERNADERO DE PEPINOS.	94
TABLA 31. CONSUMOS ELÉCTRICOS VS GENERACIÓN CONJUNTO PLANTA DE ENCURTIDO + INVERNADEROS	94
TABLA 32. COMPARATIVA ECONÓMICA DE TODOS LOS CASOS PLANTEADOS, CON INVERSIONES (AZUL), COSTES ANUALES (ROJO) E INGRESOS/AHORROS (VERDE).	95

CAPÍTULO I: MEMORIA DESCRIPTIVA

Índice

INTRODUCCIÓN	11
1.1 Planteamiento inicial	11
1.2 Condiciones ambientales y económicas base para la propuesta de diseño	12
1.3 Selección de las especies de cultivo objetivo.....	13
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN	15
2.1 Aporte de CO ₂ en invernaderos	15
2.2 Cultivos interiores	18
2.3 Ecología industrial.....	20
3. MOTIVACIÓN	21
4. OBJETIVOS.....	22
5. ESTADO DEL ARTE: DISEÑOS OBJETO DE ESTUDIO ..	23
5.1 Invernadero hidropónico conectado a una central térmica.....	23
5.1.1 Ventajas.....	25
5.1.2 Inconvenientes.....	25
5.1.3 Viabilidad del diseño y especies	25
5.2 Invernadero tradicional conectado en serie con planta energética de biomasa en cogeneración	26
5.2.1 Ventajas.....	28
5.2.2 Inconvenientes.....	28
5.2.3 Viabilidad del diseño y especies	28
5.3 Invernadero de frutales u hortalizas en asociación con central térmica y planta de procesamiento de alimentos (confitados/ gaseados).....	29
5.3.1 Ventajas.....	30
5.3.2 Inconvenientes.....	31
5.3.3 Viabilidad del diseño y especies	31
5.4 Invernadero tradicional con planta industrial genérica/ edificio comercial, centrado en el uso de calor residual	32
5.4.1 Ventajas.....	32
5.4.2 Inconvenientes.....	33
5.4.3 Viabilidad del diseño y especies	33
6. RECURSOS A EMPLEAR	33
7. METODOLOGÍA DE TRABAJO	34

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento inicial

El proyecto consiste en el estudio de viabilidad de diseño de un invernadero para frutales y/u hortalizas en sinergia con una instalación industrial, enmarcado en el concepto de ecología industrial. Para ello se enfoca la investigación en la posibilidad de invernaderos con alta concentración de CO₂ en atmósfera, siendo una interacción novedosa en cuanto al aporte directo de emisiones industriales como recurso agrícola.

El objetivo de la alta concentración de este gas es aumentar el rendimiento de producción, aumentando el ritmo de crecimiento y reduciendo el consumo de agua con respecto a sistemas de cultivo más tradicionales. Otros beneficios de la interacción agroindustrial como el uso de calor residual o reutilización de subproductos de las explotaciones son estudiados con el fin de obtener el diseño más funcional.

Se recaba información técnica sobre los métodos de enriquecimiento más adaptables, la biología de determinados cultivos sometidos a altas concentraciones de CO₂, altas temperaturas y los últimos avances en la construcción de invernaderos que vayan en sintonía con los objetivos principales de diseño y producción.

Tras evaluar los datos recabados, se proponen varios modelos de explotación atendándose a la viabilidad técnica y económica. Para ello se realiza un análisis de costes de instalación y un estudio de costes de operación una vez puesta en marcha la instalación energética modelo que resulte del estudio.

El estudio contempla las posibles sinergias de este modelo de producción con otras explotaciones agrícolas/ industriales, el impacto medioambiental, las localizaciones idóneas para llevar a cabo este tipo de explotaciones y la adhesión a los ODS de la Agenda 2030.

1.2 Condiciones ambientales y económicas base para la propuesta de diseño

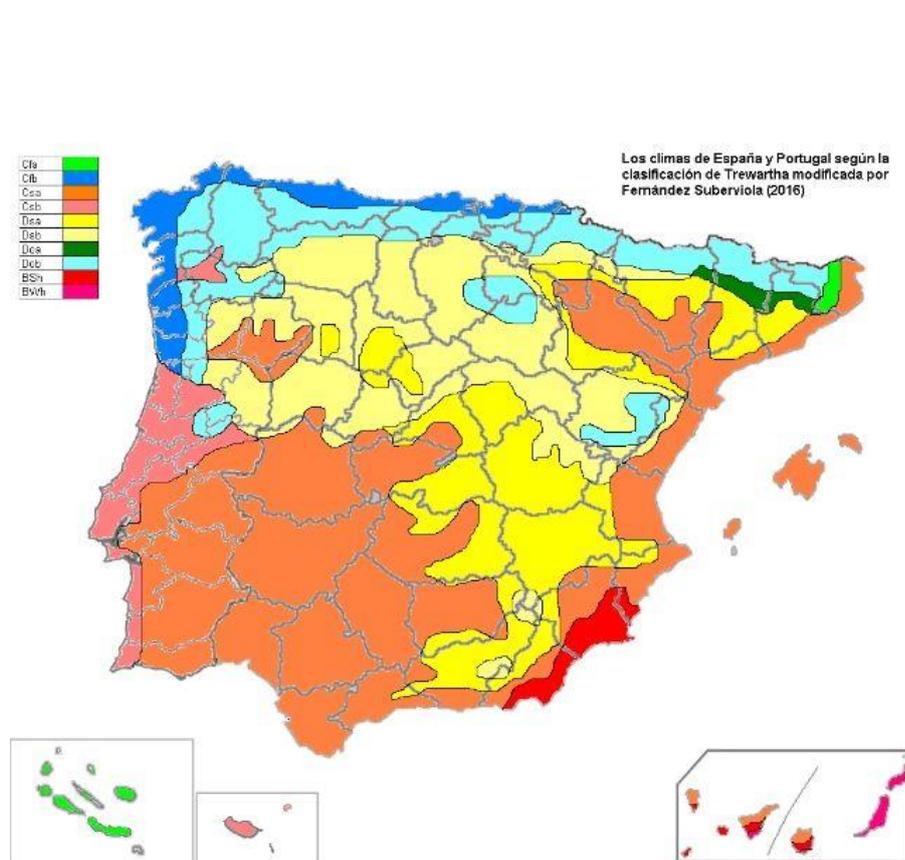


Ilustración 1. Clima de la península ibérica según la clasificación de Trewartha. Autor: Roberto Fernández Suberviola. Recurso: MeteoRed

El estudio de modelo de invernadero se centra en la península ibérica. La variabilidad en la pluviometría, así como los rangos de temperatura anuales dentro de los climas continental y mediterráneo y las horas de sol, convierten la península en una localización idónea al uso de los cultivos en invernadero. La variedad de cultivos (hortícolas y frutales en especial) permiten el suministro de especies de climas tropicales desde el siglo XX que dependían en exclusiva de las exportaciones de larga distancia. España en concreto es el segundo país en superficie de invernaderos por detrás de China, con aproximadamente 71.783 hectáreas (Gobierno de España, 2020); más de la mitad de ellas actualmente en desuso (Abigail Orús, 2021).

El potencial productivo sin explotar, no sólo en superficie desaprovechada sino también en materia de optimización de medios (terreno, recursos hidrológicos, densidad de producción, fertilizantes y avances tecnológicos), garantiza la viabilidad de un sector vital en el panorama agroeconómico nacional. Otros países europeos como los Países Bajos, con menor disponibilidad de terreno, concentran sus esfuerzos

en I+D+I para competir con potencias agrícolas como Marruecos en el mercado europeo (Langreo, 2020).

Tabla 1. Superficie de invernadero por tipo de cultivo en España. Fuente: Statista

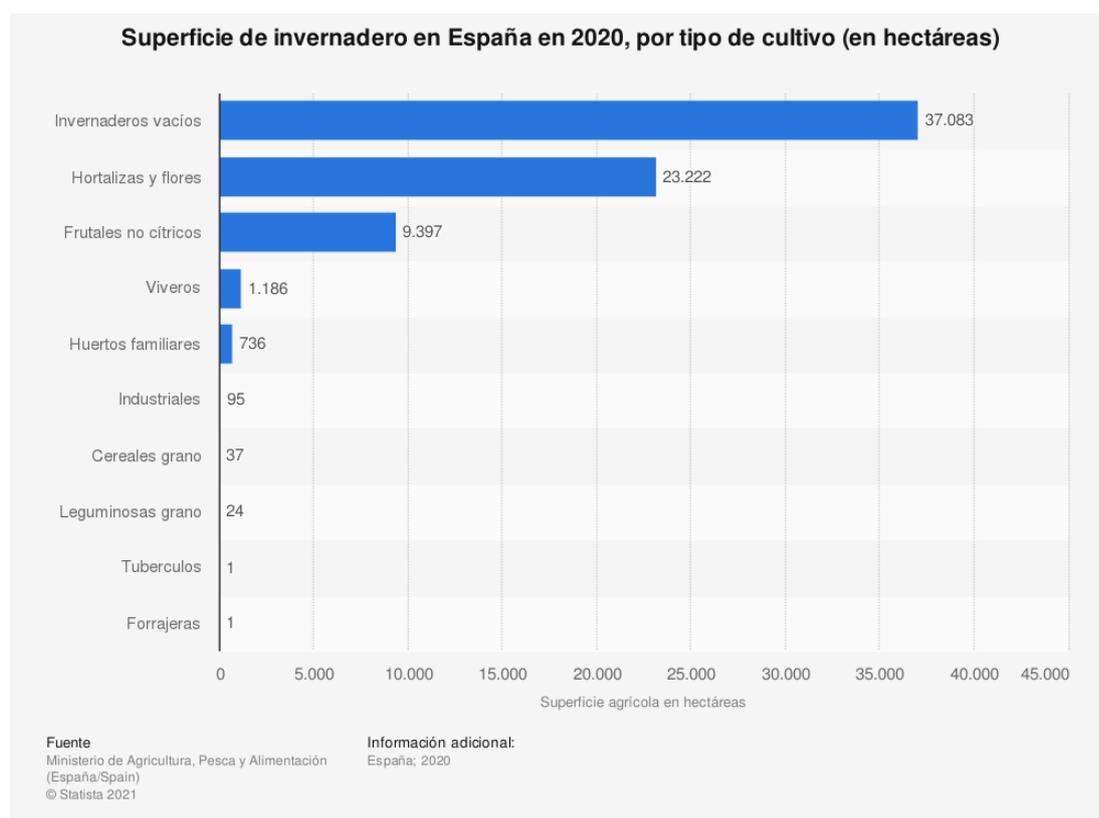


Tabla 2. Relación entre superficie de invernaderos y producción económica. Fuente: CSIC

Las explotaciones agrarias según orientación técnico-económica

	Número de Explotaciones	Unidades de Trabajo Anual	Superficie Agraria Útil (hectáreas)	Producto Estándar (miles euros)
Todas	933.738	800.213	23.129.149	38.364.750
Horticultura (huerta y flores) en invernadero	18.251	60.177	57.155	2.417.022
Horticultura (huerta y flores) al aire libre	11.359	18.328	103.151	869.643
Horticultura y cultivos diversos	2.229	9.002	32.879	652.096
Frutales y bayas y cítricos	152.110	115.055	919.460	3.121.649
Total FyH	183.949	202.562	1.112.645	7.060.410

Fuente: INE 2016

1.3 Selección de las especies de cultivo objetivo

Las condiciones de la instalación agroindustrial marcan el espectro de especies utilizables a escala comercial. Algunos de los parámetros a tener en cuenta son:

- **Tolerancia a altas temperaturas medias:** Se descartan especies que requieran de temperaturas por debajo de 22º en su etapa de crecimiento y floración/ producción de fruto, dado que las estimaciones iniciales de uso de gases residuales industriales

implican una subida de la temperatura del invernadero más allá de la garantizada por la radiación solar.

- **Producción de subproductos aprovechables por la actividad industrial:** El posible uso de restos agrícolas para beneficio de la sinergia entre el invernadero y la planta industrial, más allá del usufructo principal del cultivo, constituye una condición favorable a la selección de determinadas especies. Plantas que produzcan una gran cantidad de biomasa más allá del producto comercial primario y de crecimiento rápido pueden ser interesantes en el contexto de sinergia con una planta energética de biomasa vegetal, por ejemplo.
- **Tolerancia a calidad del aire:** Dependiendo del estudio de los medios de filtrado y calidad del aire, se analiza la tolerancia a cantidad de partículas suspendidas sin alterar la calidad del producto de cada especie (especialmente si va destinado al consumo humano).
- **Valor económico:** Para el estudio económico, priman aquellas especies que garanticen mayor rentabilidad en las condiciones de invernadero, ya sea por su ausencia generalizada en la producción nacional, su rendimiento agrícola por superficie, la posibilidad de obtener varias cosechas a lo largo del año o por su alto consumo.
- **Ventaja ecológica/social con respecto a sistemas de cultivo tradicionales:** Especies tropicales que suelen ser exportadas desde países en desarrollo, como el aguacate, serían mucho más sostenibles si consumieran menos agua y no tuvieran que ser importados de zonas tropicales donde causan conflictos medioambientales, de uso de tierras de alto valor ecológico o incluso sociales, con situaciones como la guerra de cárteles en México resultado de la disputa en el control de la producción de esta fruta (Linthicum, 2019). Estos factores se analizan en el apartado de memoria medioambiental, donde contribuyen a señalar los Objetivos de Desarrollo Sostenible para la Agenda 2030 que cumple este proyecto de estudio.



*Ilustración 2. Serie ilustrativa de los problemas medioambientales y sociales causados por determinados cultivos.
Fuente: Netflix*

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 Aporte de CO₂ en invernaderos

El uso de CO₂ como aporte en cultivos de interior o invernaderos, denominado abonado ambiental (Namesny, 2021) se realiza para favorecer la fotosíntesis de las plantas objeto del cultivo, enriqueciendo hasta un nivel óptimo de ppm. (partes por millón) en masa de aire según cada especie. Al estimular la fotosíntesis en las plantas mientras se mantienen satisfechos otros parámetros necesarios como el espectro de iluminación e irrigación, se consigue un aumento en el ritmo de crecimiento de la planta, pues el CO₂ fijado aporta el carbono necesario para la mayoría de las estructuras y moléculas orgánicas que la conforman.

Hay un fenómeno que condiciona el aprovechamiento de este recurso en función del agua disponible y limita las aplicaciones agrícolas del aporte artificial de CO₂: la fotorrespiración (Peterhansel et al., 2010). Esta se produce cuando la planta debe de cerrar estomas para no perder más agua y usa metabólicamente O₂ en vez de CO₂, necesitando de una fuente de C fijo (por ejemplo, de materia orgánica en el sustrato) y de un derroche energético para la producción de moléculas orgánicas mediante el ciclo de Calvin. El ciclo de Calvin es la parte principal del metabolismo de organismos fotosintéticos, por el cual se fija carbono en el estroma de los cloroplastos. (Bassham, Benson, Calvin, 1950)

Según el tipo de fotosíntesis, se reconocen 3 tipos de plantas:

- C3: Comprende al 85 % de las especies de plantas, incluyendo todos los árboles y algunos cultivos comunes como trigo, arroz y soja. No disponen de mecanismos para evitar la fotorrespiración y por tanto se distribuyen principalmente por climas frescos y húmedos.

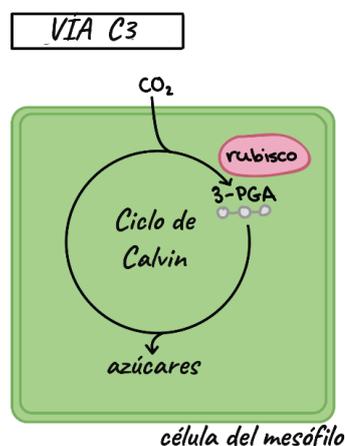


Ilustración 3. Fotosíntesis tipo C3. Fuente: KhanAcademy

- C4: Presente en el 3% de las especies, como algunos cultivos típicos de zonas tropicales como el maíz o la caña de azúcar. Gracias a adaptaciones como la presencia de células del haz vascular, que realizan el ciclo de Calvin fuera de las hojas con CO_2 captado previamente y almacenado en moléculas de 4 carbonos, se logra un menor derroche energético al aumentar la concentración disponible dentro de la planta.

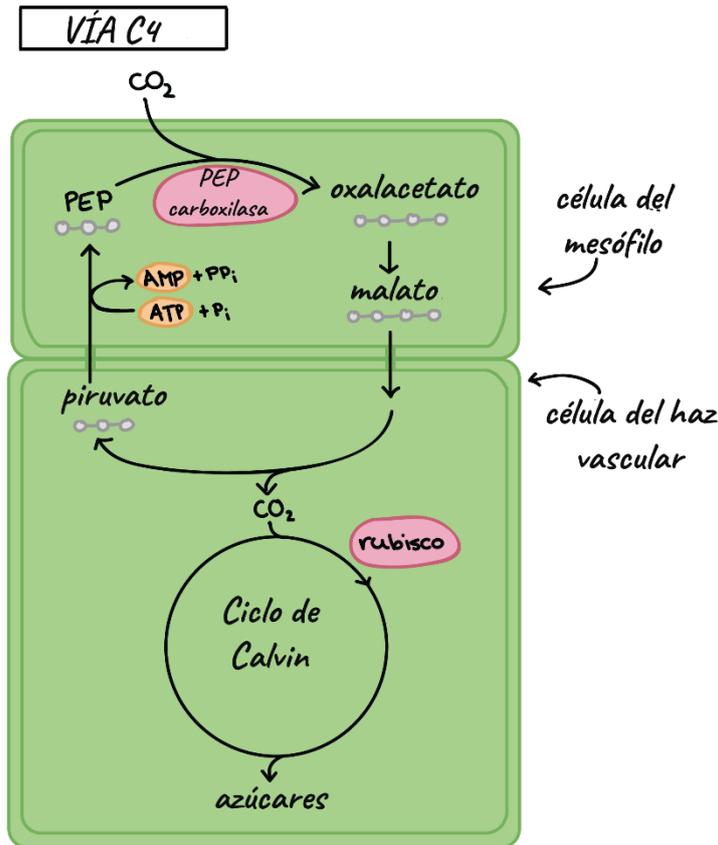


Ilustración 4. Fotosíntesis tipo C4. Fuente: KhanAcademy

- CAM: Presente en géneros propios de ambientes desérticos como las crasuláceas y algunos cultivos comerciales como la piña. Sólo abren sus estomas por la noche, cuando almacenan el CO_2 en moléculas de ácido orgánico presente en sus vacuolas y la humedad del aire es mayor, perdiendo menos agua en el proceso. Durante el día descomponen esos ácidos para liberar el CO_2 captado la noche anterior dentro de la planta y poder realizar la fotosíntesis sin abrir los estomas que causan la evapotranspiración.

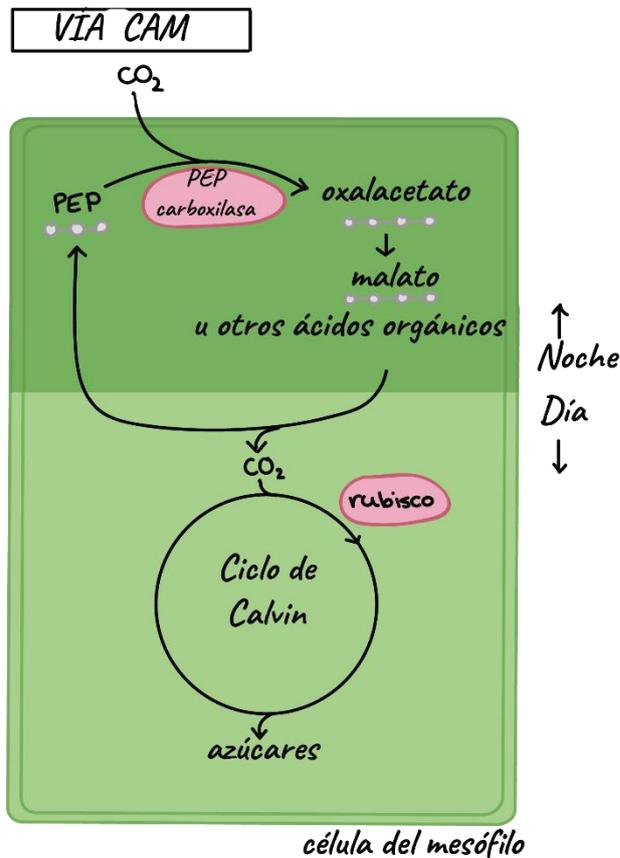


Ilustración 5. Fotosíntesis tipo CAM. Fuente: KhanAcademy.

En plantas de tipo C3, se ha constatado que mientras se produzcan unas condiciones óptimas de irrigación base se mejora notablemente la producción, incluso produciéndose un ahorro de agua al aumentar la superficie de cobertura vegetal (mayor número de hojas) y por tanto la zona de sombra que impide el calentamiento del sustrato. En cambio, en condiciones de sequía o aporte menor al básico no se produce ese aumento en la productividad (Faralli et al., 2017). La magnitud del aumento de productividad del cultivo depende de la capacidad de generar estructuras de almacenamiento de carbono de la planta. (Pastor et al., 2007)

En cultivos de tipo C4 o CAM, se consigue un mismo rendimiento productivo generalmente, con la ventaja de hacerlo a costa de un menor uso de agua (Leakey et al., 2006).

2.2 Cultivos interiores



Ilustración 6. Cultivo de pimientos verdes en un invernadero comercial de los Países Bajos. Autor: Hansenn. Fuente:123RF

Más allá del panorama español, la agricultura en invernaderos o instalaciones interiores ha crecido de manera exponencial en las últimas décadas globalmente, motivada por la necesidad de una mayor variedad de productos agrícolas sin depender de las condiciones estacionales, climáticas o las exportaciones; permitiendo mejoras en las condiciones de cultivo como una menor incidencia de plagas y enfermedades, uso optimizado de superficie, agua y fertilizantes.

El modelo tradicional de invernadero consta de una estructura de soporte, generalmente un enmallado metálico en los modelos más rudimentarios, hasta estructuras metálicas y cimentadas, con mecanismos correderos que permitan modificaciones en la configuración de la instalación en los más complejos. Esta estructura soporta una cubierta de un material translúcido que permita el paso de la radiación solar y a la vez aisle climáticamente del medio exterior, permitiendo la estabilización de una temperatura generalmente superior a la externa, así como una retención de humedad.

Desde esa base conceptual se incorporan el resto de los componentes que garantizan un mejor funcionamiento de la explotación agrícola, cómo sistemas de riego, calefacción, ventilación, iluminación extra (equipos LED, de espectro completo o parcial) o aporte de CO₂.

3. MOTIVACIÓN

Mediante este proyecto de fin de máster se busca encontrar posibles modelos de invernadero que permitan sinergias entre instalaciones industriales de alta emisión de dióxido de carbono con explotaciones agrícolas. Mediante el aprovechamiento de las emisiones de gases y el calor residual que emiten, previo filtrado, se pretende reutilizar recursos que serían tratados como residuos para generar bienes. Además, la posibilidad de ahorrar agua es uno de los criterios de diseño principales, dado que es un recurso estratégico y su disponibilidad puede reducirse a consecuencia del cambio climático.

La integración de los sistemas de cultivo en las proximidades de las instalaciones industriales pretende seguir los postulados de la ecología industrial y reducir cualquier uso extra de energía en transporte de las materias primas necesarias o la calefacción para el invernadero. La posibilidad de utilizar la energía residual para general valor económico, además de calentando el invernadero, como en el procesamiento de alimentos o la elaboración de conservas (confitados) con los productos de la explotación agrícola abre un abanico de posibilidades de innovación en el aprovechamiento de recursos finitos.

La posibilidad de encontrar la forma de cultivar especies propias de otros climas con mejores rendimientos en su producción es otro aliciente que se encuentra en las supuestas ventajas descritas anteriormente. Cultivos como el aguacate, que son tropicales, serían mucho más sostenibles si consumieran menos agua y no tuvieran que ser importados de zonas tropicales donde causan conflictos medioambientales, de uso de tierras o incluso sociales. Es por ello por lo que tecnologías que fomenten la simbiosis con el entramado industrial dotarían a España y otros países de la Unión Europea, como entorno del desarrollo del estudio, de autosuficiencia alimentaria, mayor poder negociador comercial y servirían de aliciente para una reindustrialización sostenible que actúe como motor de desarrollo económico.

Las dificultades de este proyecto radican en la falta de precedentes técnicos y la ordenación del territorio, es decir, la regulación de los usos de suelo que previenen el aprovechamiento mixto agrícola-industrial.

Aumentar el rendimiento del terreno de cultivo, incluyendo sistemas que aprovechen espacios “inertes” como las cubiertas de complejos industriales mediante tecnologías como la hidroponía, liberaría suelo agrícola que podría ser destinado a su restauración ecológica, en efecto sumando en la lucha contra el cambio climático al reducir erosión, pérdida de agua dulce y secuestrando carbono ambiental mediante la recuperación de ecosistemas funcionales que acumulen materia orgánica.

4. OBJETIVOS

1. Realizar un estudio de viabilidad técnica de invernaderos conectados en circuito a instalaciones industriales. Observar requisitos de filtración y operabilidad para garantizar la seguridad en su operación y el consumo de sus productos. Identificar los subproductos industriales y agrícolas que se pueden reusar, así como los aprovechamientos de energía residual.
2. Establecer especies candidatas, en términos genéricos, que se adapten mejor y se beneficien de las características particulares de cada posible diseño. Tomar en cuenta criterios económicos.
3. Encontrar el diseño más extrapolable al panorama industrial del mercado español, tomando como referencia una explotación en la Comunidad de Madrid.
4. Identificar los ODS que se pueden suscribir a el uso de este tipo de tecnología y analizar el impacto medioambiental para compararlo con los sistemas de cultivos existentes.
5. Marcar posibles tecnologías industriales o de otro tipo de explotación que se puedan integrar junto a un invernadero de atmósfera enriquecida para funcionar en sinergia.
6. Realizar un estudio de viabilidad económica y atisbar los posibles requisitos legales.
7. En los diseños de explotación propuestos y no elegidos, indicar viabilidad de desarrollo y condiciones o tecnologías necesarias para lograrla.

5. ESTADO DEL ARTE: DISEÑOS OBJETO DE ESTUDIO

En este apartado se valoran distintos diseños que satisfagan los objetivos y necesidades del proyecto. Para asegurar el suministro de CO₂ residual directo, sólo se plantean estos diseños junto a tipos diferentes de centrales térmicas. Se proponen los siguientes diseños de la instalación binomio industria-invernadero:

Con aprovechamiento directo de CO₂ emitido:

- Invernadero hidropónico conectado a una central térmica.
- Invernadero tradicional conectado en serie con planta energética de biomasa en cogeneración.

Con aprovechamiento indirecto de CO₂ emitido/ focalización en otro subproducto:

- Invernadero de frutales u hortalizas en asociación con central térmica y planta de procesamiento de alimentos (confitados/ gaseados).
- Invernadero tradicional con planta industrial genérica/ edificio comercial, centrado en el uso de calor residual.

5.1 Invernadero hidropónico conectado a una central térmica

El primer diseño consta de un invernadero conectado a una central térmica, un ejemplo más genérico de sinergia en un sistema de ecología industrial. Dependiendo del combustible usado en la generación eléctrica (carbón, fueloil, gas natural, biogás, biomasa), varían los requisitos del sistema de filtración de las emisiones. Este modelo se centra en el uso de combustibles fósiles. El sistema debe tener el mayor rendimiento energético para resultar en un menor impacto medioambiental.

Dado que la combustión de estos combustibles resulta en contaminantes tales como metales pesados, compuestos con azufre o micropartículas (cenizas), es lógico optar por sistemas que permitan su filtrado ya en el proceso de generación eléctrica sin tener que recurrir a filtros complejos en chimenea. El modelo de central termoeléctrica más adecuado por tanto es un ciclo combinado con cogeneración, concretando para combustibles con el carbón o el coque de petróleo un sistema de gasificación integrada en ciclo combinado.

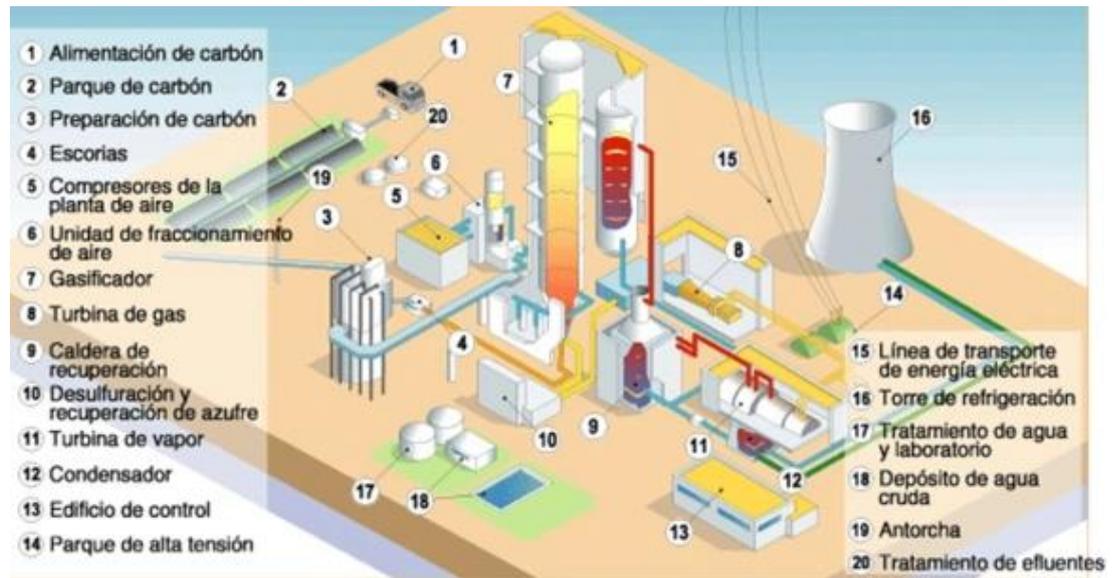


Ilustración 9. Esquema de central termoeléctrica de carbón con GICC. Fuente: Global Electricity (2013)

La elección de un sistema de invernadero con tecnología hidropónica viene motivada por no requerir de suelo propicio para el cultivo, y ser por lo tanto más integrable en un complejo industrial. Además, las especies típicas usadas en estos sistemas son verduras y hortalizas de rápido desarrollo y por tanto con alta capacidad de absorción de carbono. La integración del invernadero con cultivo hidropónico en serie conlleva las siguientes conexiones (ver ilustración 9):

- La caldera de recuperación (9) está conectada a la alimentación del sistema de ventilación del invernadero acuapónico. Dado que los gases de escape salen a temperaturas entre 100 a 200 °C, se necesita una estructura de disipación de calor para que la mezcla resultante con el aire de ventilación no sobrepasara los 28 grados (Novagric, 2015). Se dimensiona un intercambiador de calor en caso de que el requerimiento de p.p.m. de CO₂ suponga una temperatura mayor. El sistema de alimentación está regulado por una válvula de tres vías diversora (Válvulas Arco, 2020), que permite controlar el aporte de gases de emisión. Las emisiones no usadas para el abonado ambiental se pueden utilizar para el secado superficial de las verduras y hortalizas recién lavadas gracias a sistemas de disipación de calor por ventilación forzada.
- El flujo de agua del condensador (12) a la torre de refrigeración (16) se utiliza para climatizar el invernadero mediante un sistema de tuberías perimetrales en el interior, especialmente en periodos donde no interese el aporte excesivo de dióxido de carbono y se necesite un aporte extra de calor residual, como el periodo nocturno en épocas como otoño e invierno.

5.1.1 Ventajas

- La abundancia de centrales de ciclo combinado facilita la implantación de este modelo simbiótico agroindustrial.
- El agua del circuito de refrigeración del condensador provee de un elemento adicional de climatización por calor residual que puede suplementar
- El requerimiento de superficie y substrato adecuado para la explotación agrícola se minimiza en los cultivos hidropónicos.

5.1.2 Inconvenientes

- Se requiere de filtrado de gases en la salida de la caldera de recuperación, disminuyendo la incidencia de micropartículas contaminantes en el cultivo. Los desechos resultantes del filtrado deben ser eliminados según su naturaleza en vertederos, o añadidos como insumos en la elaboración de abonos tras su incineración.
- La regulación de los parámetros de humedad, concentración de CO₂ y temperatura requiere de sistemas automatizados y sensores que elevan notablemente los costes de la explotación.
- Las concentraciones de CO₂ superiores a 800 p.p.m. provocan quejas por olores y se desaconseja superar las 1000 p.p.m. (Instituto para la Salud Geoambiental, 2021).

5.1.3 Viabilidad del diseño y especies

El binomio central termoeléctrica- cultivo hidropónico se presenta como la solución más adaptable en cuanto a la adaptación de centrales modernas y la necesidad de renovar el parque de generación energético con motivo de la agenda 2030 y los objetivos europeos. La implantación de cultivos hidropónicos en estas centrales se facilita por las dimensiones de sus instalaciones y el requerimiento de mantenimiento de un perímetro con respecto a viviendas u otro tipo de construcciones, y ser una de las formas de cultivo de invernadero más compacta.

Se debe de analizar la normativa en cuanto a compaginación de actividades industriales y agrícolas en terrenos de cada categoría, siendo crítica la legislación sobre condiciones sanitarias de las explotaciones agrícolas con relación al nivel de tratamiento requerido de las emisiones para su uso en conexión directa.

Las especies vegetales que mejor se adaptan a este modelo de producción son las hortalizas de crecimiento rápido y acumulación principal de carbono estructural en las estructuras foliáceas, como la lechuga, o en flores y frutos consumibles como la alcachofa, los pimientos o los tomates; todas ellas sin una estructura radicular excesiva y con tolerancia a mantenerla sumergida, que permita instalarlas en cultivos hidropónicos. En este modelo simbiótico no interesan especies que generen muchos restos o subproductos combustibles, al no poder aprovecharse para la generación eléctrica.



Ilustración 10. Cultivo hidropónico de lechugas. Nótese la optimización del terreno. Fuente: Novaciencia

5.2 Invernadero tradicional conectado en serie con planta energética de biomasa en cogeneración

El diseño de la instalación en sinergia es parecido al propuesto anteriormente, con la salvedad de que se focaliza en el aprovechamiento de una fuente de energía orgánica y por tanto capaz de aprovechar residuos agrícolas como combustible; el modelo de invernadero difiere del anterior en que se emplea el cultivo en sustrato, más enfocado a especies vegetales con sistemas radiculares amplios como frutales u otro

tipo de árboles. En la siguiente ilustración se contempla el esquema de un modelo de planta de cogeneración con aprovechamiento de calor residual para el secado de residuos forestales de alta calidad y su posterior transformación en pellets de la marca Prodesa (Prodesa, 2021).

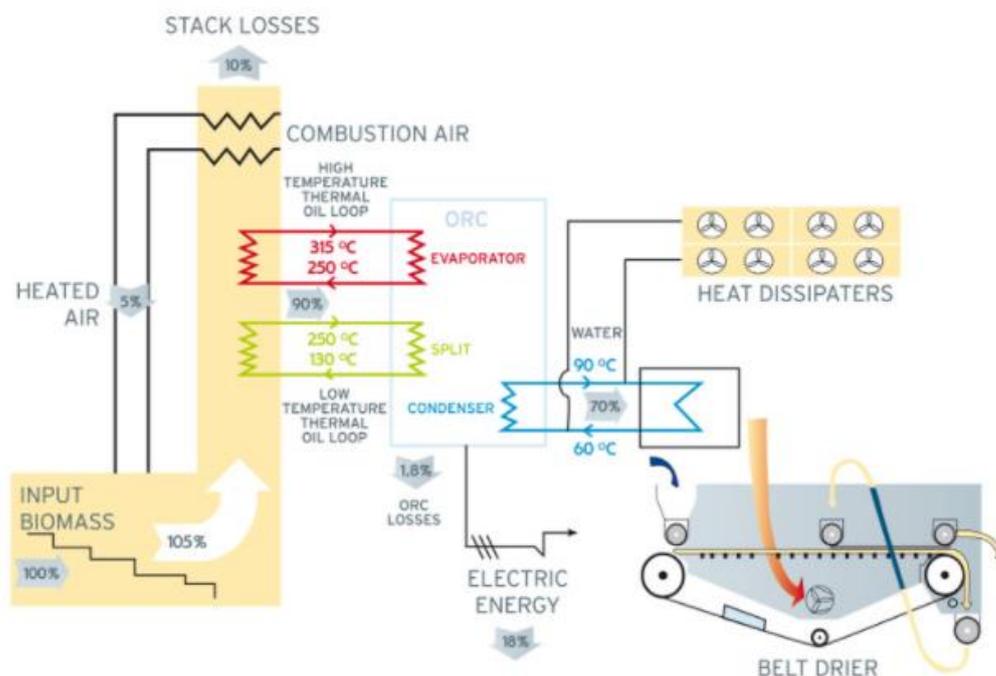


Ilustración 11. Planta de cogeneración con ciclo de Rankine Orgánico con biomasa y aplicación de secado de subproductos forestales. Fuente: Prodesa

La conexión de la chimenea de la caldera de recuperación con el sistema de ventilación del invernadero consta en este caso de un sistema de filtrado de partículas y humos, asumiendo que la calidad del combustible orgánico de la central es buena no debe producirse contaminación del cultivo por la presencia de metales pesados. El sistema de alimentación está regulado por una válvula de tres vías diversora de nuevo, que permite controlar el aporte de gases de emisión. Las emisiones no usadas para el abonado ambiental se pueden utilizar para un sistema de secado de restos vegetales parecido al contemplado en el modelo comercial, combinando el uso de calor residual del circuito de condensación con la exposición una corriente de gas cálido. Se contempla el margen de uso del calor residual restante para climatizar el invernadero.

Los cultivos empleados en el invernadero pueden aportar sus residuos vegetales al sistema, ya sea al generador con residuos de baja calidad (hojarasca, tallos, ramas pequeñas) como al generador de pellets en el caso de restos de alta calidad (astillas de madera, serrín).

5.2.1 *Ventajas*

- Sinergia de ciclo semicerrado, pues los residuos de cada instalación sirven como recurso a su contraparte.
- Dependencia exclusiva de recursos renovables.
- Las cenizas resultantes de la combustión pueden emplearse para la creación de abono del propio cultivo.
- El sistema de cultivo tradicional abre un abanico mayor de especies de cultivo que los sistemas hidropónicos.

5.2.2 *Inconvenientes*

- Se requiere de filtrado de gases en la salida de la caldera de recuperación, disminuyendo la incidencia de micropartículas contaminantes en el cultivo. Los desechos resultantes del filtrado deben ser eliminados según su naturaleza en vertederos, o añadidos como insumos en la elaboración de abonos tras su incineración.
- La regulación de los parámetros de humedad, concentración de CO₂ y temperatura requiere de sistemas automatizados y sensores que elevan notablemente los costes de la explotación.
- Las concentraciones de CO₂ superiores a 800 p.p.m. provocan quejas por olores y se desaconseja superar las 1000 p.p.m. (Instituto para la Salud Geoambiental, 2021).
- El gasto de agua se incrementa debido a la utilización del sustrato.

5.2.3 *Viabilidad del diseño y especies*

La instalación de un cultivo en invernadero conectado a una central de cogeneración de biomasa resulta un ejemplo atípico de sistema de ecología industrial de doble sentido: casi todos los subproductos o residuos de cada sistema pueden ser utilizados por el otro. La viabilidad depende, pues, del grado de aprovechamiento de cada subproducto. La instalación se beneficia del principio de economía de escala, siendo la capacidad de generación de la planta de biomasa la variable crítica: Si se dispone de suficiente terreno, la superficie de invernaderos se dimensionará conforme a las

emisiones de la central para mantener la concentración óptima de CO₂ que otorgue los mayores beneficios en aumento de productividad del cultivo.

Las especies idóneas para este modelo son aquellas que produzcan subproductos de alta capacidad calorífica y aumenten más su productividad con el abonado ambiental. Otro factor interesante es que, al ser cultivo en sustrato, no existen limitaciones en la dimensión del sistema radicular. Los cultivos de frutales y/o especies tropicales de alta capacidad calorífica, como el aguacate, el mango y la caña de azúcar son candidatos atractivos si además sumamos su valor económico.



Ilustración 12. Cultivo de mango en invernadero de Málaga. Se puede apreciar la acumulación de materia vegetal con potencial como biomasa. Fuente: AgroAuténtico. Autor: José Antonio Arcos

5.3 Invernadero de frutales u hortalizas en asociación con central térmica y planta de procesamiento de alimentos (confitados/ gaseados)

En este caso, no se produce un aprovechamiento directo de las emisiones de la central térmica, sino que se captan las emisiones para procesarlas en una planta de tratamiento y purificación de gases. El producto resultante es dióxido de carbono puro, apto para su uso en los invernaderos mediante dosificadores o para el uso en la industria alimentaria para la elaboración de bebidas carbonatadas o la conservación de alimentos (Residuos Profesional, 2021). El aprovechamiento del

calor residual del circuito de condensación se mantiene como en el primer modelo, para climatizar los invernaderos.



*Ilustración 13. Depósitos de CO₂ purificado pertenecientes a Carboneco, obtenido de una planta de cogeneración.
Fuente: Residuos Profesional*

En función del calor residual aprovechable, se pueden establecer sistemas de procesamiento de los productos agrícolas, como equipos de secado de hortalizas o de tratamientos térmicos a baja temperatura, como el confitado de frutas y verduras (tª de aceite o soluciones azucaradas como el almíbar inferior a 80 °C), haciendo factible la existencia de una planta de procesamiento de alimentos en el complejo industrial.

5.3.1 Ventajas

- Garantía de pureza del CO₂ empleado en el abonado ambiental.
- Usos alternativos de las emisiones, como en la elaboración de alimentos procesados.
- Uso del calor residual para procesamiento de los productos agrarios.

5.3.2 *Inconvenientes*

- Mayor coste de tratamiento de emisiones.
- La climatización de los invernaderos recae por completo en el sistema de aprovechamiento de calor residual.
- Necesidad de más equipos de control de parámetros para operar la planta de procesamiento alimentaria y el invernadero.
- Las concentraciones de CO₂ superiores a 800 p.p.m. provocan quejas por olores y se desaconseja superar las 1000 p.p.m.

5.3.3 *Viabilidad del diseño y especies*

La externalización del tratamiento de los gases de emisión facilita la modulación de su uso y su comercialización en formato bombona. Sin embargo, al añadir un elemento más al sistema de ecología industrial (la planta de procesamiento alimentaria) se aumenta la complejidad del sistema, contrarrestando el anterior punto.

Los cultivos más interesantes son aquellos que puedan aprovecharse para la fabricación de alimentos procesados en la planta contigua, o que hagan uso del dióxido de carbono de grado alimentario. Frutales y hortalizas pueden ser asociados a la fabricación de bebidas carbonatadas, almíbares o demás productos agrícolas confitados. Ejemplo: cultivo de arándanos para zumos y confitados.



Ilustración 14. Fábrica de zumos de don Simón en Huelva rodeada de naranjales, concepto aplicable a cultivos de invernadero. Fuente: Don Simón

5.4 Invernadero tradicional con planta industrial genérica/ edificio comercial, centrado en el uso de calor residual

El último modelo propuesto de sinergia agroindustrial abandona la combinación de centrales térmicas de cogeneración con invernaderos para asociar éstos últimos a cualquier planta industrial con circuitos de refrigeración potentes, como en la industria siderúrgica. La simbiosis en este caso se basa en el aprovechamiento del calor residual resultante de los flujos refrigerantes para la climatización de los invernaderos.

5.4.1 Ventajas

- Simplicidad de la instalación, focalización en el aprovechamiento de calor residual.
- Menor coste económico.
- Elección de cultivo dependiente únicamente de criterios económicos y

parámetros ambientales.

5.4.2 *Inconvenientes*

- Menor aprovechamiento de sinergias.
- Algunos tipos de industria se caracterizan por la emisión de contaminantes líquidos y gaseosos altamente nocivos que, en caso de fallo de los sistemas de filtrado, comprometan la salubridad de los productos agrícolas.

5.4.3 *Viabilidad del diseño y especies*

La interacción teórica entre la explotación agrícola y la industrial es sencilla en comparación a las otras alternativas. Sin embargo, no tiene una asociación beneficiosa tan fuerte. La dificultad de implementación dependerá del tipo y uso de terrenos donde se quieran integrar las dos explotaciones o ya esté instalada una de ellas.

No hay un cultivo idóneo ejemplo para este tipo de asociación. En caso de estar comprometida la seguridad alimentaria de los productos cultivados por los contaminantes industriales, se optaría por especies no consumibles o usadas con otro propósito, como el cáñamo.

6. RECURSOS A EMPLEAR

Los recursos a utilizar son:

- Calculadora programable para los cálculos pertinentes.
- Excel para realizar y desglosar el estudio técnico y económico.
- Software de generación de diagramas Sankey.
- ResearchGate y Google Académico para la consulta de artículos técnicos, en especial en lo referido a la biología y operación de los cultivos y parámetros de funcionamiento.
- Tablas de valores y curvas monótonas de demanda, extraídas de la documentación de la asignatura “Ingeniería Industrial” de ICAI.
- La Herramienta Bioraise para tomar costes de referencia en la evaluación económica.

7. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Dada la carga técnica y de conocimientos sobre botánica que requiere el diseño de un invernadero, se recabó primero toda la información posible sobre las tecnologías existentes que están implicadas en este tipo de diseño, como la de sistemas de conducción y filtrado de gases residuales, tipos de invernadero y las últimas técnicas de agricultura en interiores. Posteriormente se propusieron varios diseños de instalaciones integradas, sobre los que se realizó un análisis de ventajas e inconvenientes. Los criterios que valorar fueron principalmente mecánicos, energéticos, económicos, biológicos y medioambientales.

Una vez se decidió un modelo para estudiar su implementación, se procedió a simular algunos requisitos técnicos de un prototipo genérico, planteándose el uso de simuladores multifísicos como Fluent. Pese a la realización de la simulación con una geometría de invernadero sencilla, el modelo no arrojaba datos significativos sobre la variación de la concentración de CO₂, además de atascarse con las simulaciones de flujos térmicos e intercambiadores. Se optó por tanto por evaluar las necesidades de concentración básicas de diferentes tipos de cultivo.

Las comprobaciones técnicas por tanto se basaron en el dimensionamiento de las instalaciones de generación, planteando el uso de diferentes alternativas (p.e. cogeneración, captación de CO₂), evaluando las necesidades eléctricas, térmicas y productivas.

Por último, tras comprobar la viabilidad técnica, se realizó el estudio de viabilidad económica.

Tabla 3. Cronograma inicial de distribución de tareas

	March 01-07	March 08-14	March 15-21	March 22-28	March 29- April 04	April 05-11	April 12- May 01	May 02-31
Recabar estado del arte								
Requisitos técnicos conducción gas								
Requisitos técnicos invernadero								
Propuesta diseños								
Simulación diseños								
Estudio Económico								
Conclusiones								

Capítulo II: Estudio de viabilidad

Índice

8. ELECCIÓN DE MODELO DE INSTALACIÓN PILOTO PARA SU ESTUDIO Y CÁLCULO DE PARÁMETROS CLAVE DE LAS INSTALACIONES.....	39
8.1 Preevaluación cualitativa y elección de modelo piloto de estudio	39
8.2 Elección de las instalaciones del prototipo: cultivo de invernadero y planta industrial.....	41
Tamaño y demanda eléctrica de la planta industrial:	42
Elección de especie de cultivo y dimensión de las instalaciones de invernadero: ..	46
8.3 Elección del ciclo generador y flujo energético en instalación modelo	48
Obtención de perfiles de demanda:	48
Elección de ciclo de cogeneración:	53
9. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO ECONÓMICO	60

8. ELECCIÓN DE MODELO DE INSTALACIÓN PILOTO PARA SU ESTUDIO Y CÁLCULO DE PARÁMETROS CLAVE DE LAS INSTALACIONES

8.1 Preevaluación cualitativa y elección de modelo piloto de estudio

Dadas las dificultades para simular las variaciones de concentración de p.p.m. de dióxido de carbono, se plantean 2 magnitudes principales a la hora de evaluar la efectividad de la instalación conjunta:

- El flujo de energía en el conjunto del sistema, los intercambios entre elementos y el análisis de aprovechamiento del calor residual. En el análisis cuantitativo de las alternativas se comparan los costes energéticos habituales de los sistemas, frente a los costes y ahorros derivados de implantar la sinergia.
- La capacidad productiva de recursos primarios y subproductos aprovechables, así cómo su valor económico bruto, y neto al contar con los costes de producción y operación.

Para poder comparar los diferentes diseños, se comparan mediante una serie de atributos cualitativos con un peso relativo (importancia/mayor grado de influencia como factor) asignado, para posteriormente ordenarlos de mejor a peor modelo en ese aspecto:

- **Facilidad técnica de implementación (F):** Evalúa la viabilidad técnica actual para construir/ adaptar la instalación, siendo mejor el valor cuanto más simple sea la instalaciones y menos incógnitas de diseño (menos soluciones innovativas para llevarlo a cabo) tenga. Tiene un peso relativo de 2x con respecto al resto de criterios, por ser el factor más crítico.
- **Coste de la inversión (CI):** Mide los costes iniciales estimados de construcción del modelo. A menor coste, mejor puntuación.
- **Eficiencia energética (EE):** Calcula el rendimiento energético del conjunto de forma cualitativa (contando aplicaciones de aprovechamiento energético, evaluando mayores necesidades de consumo, p.ej. requerimiento de circuitos de agua en recirculación continua vs sistema de riego localizado sin necesidad de caudal constante). Cuanto mayor el rendimiento, mejor puntuación.
- **Aprovechamiento de emisiones (AE):** Evalúa la capacidad de absorción de emisiones de dióxido de carbono.
- **Uso de agua (UA):** Evalúa el consumo total de agua de la instalación cualitativamente. Cuanto menor, mejor puntuación.

- **Aprovechamiento de calor residual (UCR):** Evalúa la capacidad de aprovechar la energía en forma de calor residual en el sistema de cada diseño. Cuantas más aplicaciones haciendo uso de éste, mejor puntuación.
- **Aprovechamiento de subproductos/capacidad de sinergia (CS):** Mide la capacidad de reciclar residuos o subproductos de cada una de las 2 partes de diseño. Cuanto mayor, mejor puntuación.
- **Potencial económico (PE):** Mide cualitativamente el potencial de ingresos de los diferentes cultivos a utilizar en cada diseño (cuanto más valor de mercado, mejor) y las posibilidades de valor añadido en la instalación (p.ej. aplicaciones de procesamiento de los productos agrícolas como secado o confitado). Cuanto mayor, mejor puntuación.
- **Potencial medioambiental (PM):** Este criterio tiene en cuenta el origen primario de la energía, el uso de suelo y otros recursos o materias primas necesarias en el modelo, además de los posibles contaminantes generados en el proceso. Cuanto menor impacto medioambiental, mejor puntuación.

La valoración de los atributos se hará del 1 al 4:

Tabla 4. Guía de criterios de puntuación de los atributos.

Puntuación del atributo	1	2	3	4
Explicación de criterio	El modelo que mejor cumple el criterio evaluado.	El modelo destaca mucho en el atributo evaluado.	El modelo destaca algo en el atributo evaluado.	El modelo es el que peor satisface el criterio evaluado.

El modelo ideal tendrá el menor valor numérico de la suma resultante de sus puntuaciones/posiciones.

Los modelos se denominan:

- **CG+H** (cogeneración con hidroponía)
- **CGB+I** (cogeneración de biomasa con invernadero tradicional)
- **CG+I+P** (cogeneración con invernadero y planta de procesamiento de alimentos, pero sin conexión directa con las emisiones)
- **IICR** (industria con invernadero, sólo calor residual)

Tabla 5. Comparativa de los diferentes modelos de sinergia agroindustrial

	F	CI	EE	AE	UA	UCR	CS	PE	PM
CG+H	4	3	2	3	1	4	3	3	1

CGB+I	3	4	1	2	2	2	1	1	2
CG+I+P	2	2	3	1	3	1	2	2	3
IICR	1	1	4	4	4	3	4	4	4

$$Puntuación_i = 2 \times F_i + CI_i + EE_i + AE_i + UA_i + UCR_i + CS_i + PE_i + PM_i$$

$$Puntuación_{CG+H} = 28$$

$$Puntuación_{CGB+I} = 21$$

$$Puntuación_{CG+I+P} = 21$$

$$Puntuación_{IICR} = 30$$

Siguiendo estos criterios, el mejor diseño es el de menor puntuación total (suma de puestos más pequeña). Los modelos escogidos para el estudio económico y funcional serían el de cogeneración de biomasa con invernadero tradicional y el de cogeneración con invernadero y planta de procesamiento de alimentos. Dado que el objetivo principal de este estudio es potenciar las sinergias, se opta por centrar el diseño del prototipo en el caso con mayores potencial de sinergia.

Los modelos a analizar se evaluarán según el uso de un ciclo de cogeneración de biomasa en conjunción con un invernadero y una instalación industrial que procese ese cultivo y haga uso del calor de la cogeneración.

8.2 Elección de las instalaciones del prototipo: cultivo de invernadero y planta industrial

La elección de un modelo en sinergia teórico factible y su dimensionamiento son dependientes de la literatura y fuentes disponibles. Para ello, se ha realizado una valoración cruzada de los siguientes requisitos:

- Estabilidad de la demanda de energía eléctrica/térmica de la industria seleccionada.
- Cultivo de alta producción durante todo el año.
- Cultivo que se beneficie de altas concentraciones de CO₂.
- Industria que aproveche o trate el producto cultivado.
- Sistema de generación de biomasa que cubra la demanda pico eléctrica de la planta o la demanda valle térmica del conjunto de instalaciones.

Dada la codependencia entre todas estas variables, se fue determinando la instalación modelo según las diferentes fuentes bibliográficas consultadas. La metodología empleada en la comparativa se basa en valores promedio de cada industria o cultivo en referencia a la producción:

- Consumos energéticos según unidades de producción.
- Productividad de cultivo por unidad de superficie.
- Partes por millón (p.p.m.) para la concentración de gases.

Tamaño y demanda eléctrica de la planta industrial:

Tomando como referencia datos del “*Manual de ahorro y eficiencia energética del sector- Centrales Hortofrutícolas*” (Cooperativas Agro-alimentarias, 2010), se estima un consumo medio de 205.187 kWh_e anuales para instalaciones que gestionan menos de 5.000 toneladas de productos final, definidas como “centrales hortofrutícolas pequeñas” y de 331.410 kWh para las que gestionan entre 5.000 y 15.000 toneladas, las denominadas “medianas”. Si tomamos como magnitud de referencia de diseño la producción de producto procesado, una instalación menor requerirá de una superficie menor de cultivo en invernadero para abastecerla. Por lo tanto, se plantearán los siguientes escenarios productivos base:

- **5.000 toneladas** de producto procesado anuales, por procesamiento de frescos o tratamiento térmico.

A continuación, para evaluar la distribución del consumo energético habitual en el sector industrial y las horas operativas se debe conocer la potencia habitual instalada y el consumo relativo de cada elemento industrial. Posteriormente, cuando se dimensionan los invernaderos para las producciones propuestas, se añaden los gastos eléctricos y térmicos de estos para escoger la instalación de cogeneración. El desglose porcentual del gasto eléctrico de este mismo estudio es el siguiente:

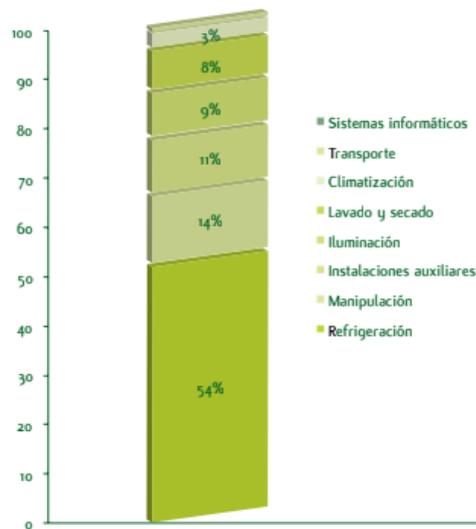


Ilustración 15. Distribución porcentual del consumo eléctrico en plantas industriales hortofrutícolas. Fuente: Cooperativas Agro-alimentarias

Se puede inferir hasta un 57% de gasto eléctrico sustituible por gasto térmico en sistemas CCHP (Trigeneración con generación eléctrica, de calor y frío; ampliada en este proyecto a cuatrigeneración por aprovechamiento de CO₂). El desglose energético por tonelada procesada de vegetal fresco es el siguiente:

Tabla 6. Consumo energético medio por tonelada procesada en industria hortofrutícola de frescos (p.e. encurtidos y conservas). Fuentes: Cooperativas Agro-alimentarias, ENEA

Processing step	Electrical energy (kWh per ton of processed product)	Thermal energy (kWh per ton of processed product)
Raw material reception, washing, sorting and sizing	4,0	7,8
Processing: cutting, grinding, calibration, peeling, etc. After-treatment operations, checking and packaging	7,4	
Cooling / cold storage	28,1	
Transport	0,6	0,6
Air conditioning	1,5	
Lighting	4,7	
Auxiliary processes	5,7	0,1
TOTAL ENERGY	52,0	8,5

Tabla 7. Consumo y potencia energética instalada en una planta de 10.000 toneladas procesadas anuales en industria frutícola. Fuente: ENEA, obtenido de un estudio de la Universidad de Évora.

PROCESS (sequential order)	TYPICAL TECHNOLOGY	CAPACITY (t/hour)	Electrical power installed (kW)	Electrical energy consumption (kWh/year)	Thermal power installed (kW)	Thermal energy consumption (kWh/year)
Reception	Electronic scale Washing machine (Drencher)	57	184	33.500		
Conservation	Cold storage		270	536.000		
Packaging	Calibrator Packaging machine	6	39	67.000		
Expedition	Chambers expedition	6	19	33.500		
Lighting and other electrical auxiliary equipment	Fluorescents		12	56.300		
Thermal auxiliary equipment						
Auxiliary equipment	Forklifts	14			10	14.560
TOTAL			523	726.300	10	14.560

En el desglose eléctrico/térmico se debe tener en cuenta que el gasto térmico en transporte puede atribuirse al uso de gasoil en el empleo de carretillas, por lo que no puede contarse como gasto térmico sustituible por la cogeneración, aunque mediante la sustitución de estos equipos por carretillas eléctricas se abastecerían de la instalación de cogeneración.

Para realizar las comparaciones entre diferentes industrias en base a las mismas magnitudes, se ha recurrido a datos de estudio *TESLA – Transferring Energy Saved Laid on Agroindustry* – (ENEA) donde se recoge con más detalle, para Italia, los gastos porcentuales y potencias eléctricas/térmicas instaladas requeridas, en referencia a cada tonelada de producto procesado. Este estudio también se basa parcialmente en el previamente mentado “*Manual de ahorro y eficiencia energética del sector-Centrales Hortofrutícolas*”.

Tabla 8. Consumo energético medio por tonelada procesada en industria hortofrutícola con tratamientos térmicos (p.e. encurtidos y conservas). Fuente: ENEA

Processing step	Electrical energy (kWh per ton of processed product)	Thermal energy (kWh per ton of processed product)	Electricity for water pumping (kWh per ton of processed product)
Raw material reception	3,4		
Washing, sorting and sizing	2,1	51	
Cutting, grinding, calibration, peeling, etc.	3,4	72	3
Blanching and drying	1,5	209	
Cooling and rinsing	3,9		3
After-treatment operations, checking and packaging	3	50	
Heat treatment for stabilization		229	8
Cooling	1,1		
Storage	1		
TOTAL ENERGY	19,4	611	14

Teniendo en cuenta estos datos, los consumos energéticos anuales proyectados para cada caso son:

Tabla 9. Cálculo de demanda energética anual de cada caso. Fuente: Propia, elaborada con datos ENEA

Tipo de producción	Toneladas anuales	Consumo eléctrico anual (kWh)	Consumo térmico anual (kWh)
Frescos ¹	5.000	122.500	180.000
Tratamientos térmicos ²	5.000	167.000	3.055.000

Para el dimensionamiento del equipo de generación, se debe decidir la potencia a instalar y el número de horas operativas de cada componente de la planta para definir el perfil de la demanda. Las hipótesis de diseño son:

- Perfil de demanda con menos de 2000 h anuales de uso total, característico de industrias muy estacionales, que dependen de la temporada de cosecha de un solo producto y su tratamiento en fresco. Por ejemplo, en la planta de frescos analizada por Enea, sólo la iluminación supera las 2000 h de funcionamiento, con apenas 12 kW de potencia valle durante 4700 h. La potencia máxima empleada se registra durante 182 h con 523 kW, seguido de 1700 h a 340 kW. La sinergia con los invernaderos podría compensar la estacionalidad: dado que algunos cultivos normalmente tienen su pico de

¹ En el caso de la industria de frescos, se ha reasignado la carga energética de refrigeración a la energía térmica, realizada por una máquina de absorción que usa el calor de mayor temperatura.

² El consumo eléctrico incluye los gastos de bombeo.

actividad durante los meses de cosecha, el resto de los meses la cogeneración se usaría para mantener la climatización del invernadero. Los meses de cosecha pueden ser los meses más cálidos, en los que en climas mediterráneos/continentales no se necesita climatizar.

- Perfil de demanda uniforme a lo largo del año, con más de 4000h de uso total. Son industrias de consumo y producción uniforme a lo largo del año, como los fabricantes de bebidas y cervezas, que dependen de un suministro constante de materia prima para mantener su actividad. También Se pueden considerar plantas de frescos que varíen el producto procesado a lo largo del año o mantengan un suministro constante de invernaderos climatizados. La implantación de cultivos en invernadero con alto control climático permite la homogeneización de la producción a lo largo del año, reduciendo la potencia a instalar, al no tener que responder a una abundancia estacional de producto fresco en cosecha.

En el apartado de flujos energéticos se ilustrarán los perfiles de demanda del conjunto de instalación.

Elección de especie de cultivo y dimensión de las instalaciones de invernadero:

Para el dimensionado de los invernaderos por su producción se debe de seleccionar una única especie de cultivo que pueda adaptarse a cualquiera de las casuísticas previamente planteadas: Procesable en fresco o realizando elaboraciones con tratamiento térmico y con una alta productividad respecto a cada unidad de superficie de invernadero y energética, además de beneficiarse claramente de la fertilización ambiental por CO₂. Las condiciones climatológicas de clima mediterráneo semiárido servirán como base para calcular los requisito energéticos de climatización

La especie elegida bajo estas premisas es el pepino (*Cucumis sativus*), debido a su productividad en sistemas de alto control climático, aumentando hasta en un 23% la masa de fruto si se mantiene una concentración de 1.000 p.p.m. (+19% de producción y mejora del 40% en eficiencia en uso de agua con 700 p.p.m.) de CO₂ (Nikolaou et al, 2021) y la posibilidad de su venta en fresco o como encurtido (previa fermentación y pasteurización).

El consumo energético a lo largo del año asumido en el estudio se indica en la tabla 10, donde se asume que los consumos de calefacción/refrigeración serán térmicos en la futura instalación, dado que se usa un sistema de tuberías de agua para la climatización. Se asume un gasto nulo en los meses de julio y agosto, por la elevada temperatura media observada en el estudio referencia, ya que en este estudio el invernadero no opera esos meses. El gasto energético para refrigerar se asume ya corregido con el CEE de la máquina de absorción empleada en el estudio.

Tabla 10. Gasto energético en kWh durante el año en un invernadero de 150 m² en clima mediterráneo. Fuente: Yildirim et al, " Evaluation of a hybrid system for a nearly zero energy greenhouse"

		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Demanda energética (kWh)	Calentamiento	6295	5631	4503	2863	0	0	0	0	0	2204	4622	6732	32849,7
	Refrigeración	0	0	0	0	6946	9197	0	0	9841	0	0	0	25984

La producción del cultivo por m² que se asume es de 60 kg*m⁻² (Nikolaou et al, 2021) para invernaderos con control microclimático avanzado, con precedentes de rendimientos en invernaderos de cristal de alta tecnología entre 105-120 kg*m⁻² (Kempkes, 2018), más extendidos en Europa Central por necesidades climatológicas.

El consumo térmico anual para satisfacer la demanda de producto se calcula de la siguiente manera:

$$Q_r = \frac{P_{anual} \times q_{r_{modelo}}}{p_{us} \times S_m}$$

$$Q_c = \frac{P_{anual} \times q_{c_{modelo}}}{p_{us} \times S_m}$$

Donde Q_r y Q_c son las demandas anuales energéticas de cada aplicación, P es la producción objetivo anual, q_{modelo} el consumo del invernadero usado como modelo y S_m la superficie de éste.

Tabla 11. Demanda energética de los cultivos. Fuente: Propia, datos iniciales de Yildirim et al

Toneladas anuales	Producción anual (kg m-2)	Superficie requerida (ha)	Consumo ref anual (kWh)	Consumo cal anual (kWh)
5.000	60,00	8,33	14.435.556	18.249.833

La cantidad de biomasa procedente de restos agrícolas se calcula asumiendo una proporción de 1 kg de biomasa húmeda por cada 5,56 kg de fruto (Zhi et al., 2015). La demanda anual asumida de CO₂ para mantener concentraciones entre 700-1.500 p.p.m. es de 2628 t/ ha (Oleszek et al, 2015):

Tabla 12. Biomasa residual, en toneladas húmedas (70-75% humedad). Fuente: Propia

Toneladas anuales fruto	Toneladas anuales restos	Toneladas de CO ₂ requeridas
5.000	900	21.900

Siguiendo los cálculos descritos en "The Possibility of Meeting Greenhouse Energy and CO₂ Demands Through Utilisation of Cucumber and Tomato Residues" (Oleszek et al, 2015) el potencial calorífico de estos residuos para un sistema de combustión a 75% de humedad es de 0,95 MJ/kg, equivalente a 263,9 kWh/ton de producto fresco. En el diseño de la instalación de cogeneración se debe valorar someter los restos a un

proceso de secado, dado que a 25% de humedad el combustible genera 2.147 kWh/ton de residuo secado. El CO₂ emitido durante la combustión, asumiendo su ensilado, se estima en 463 g/kg³ de desecho agrícola fresco de pepino (Oleszek et al, 2015).

8.3 Elección del ciclo generador y flujo energético en instalación modelo

Obtención de perfiles de demanda:

Para poder escoger el ciclo de cogeneración de biomasa adecuado para abastecer las instalaciones, se toman como referencia los siguientes datos:

- Para la superficie en invernadero, la demanda energética de la Tabla 10, asumiendo 24h de operación diarias para los sistemas de calefacción y refrigeración (Yildirim et al, 2017). La demanda eléctrica necesaria para operar el resto de la instalación se asume como un 11% de la demanda de climatización (Yildirim et al, 2017).

Tabla 13. Potencia térmica requerida (calefacción:rojo/refrigeración:azul) cada hora en sistema de invernadero,. Fuente: Propia con datos de Yildirim et al

mes	Demanda potencia térmica con producción de 5000t (kW)	Demanda potencia eléctrica con producción de 5000t (kW)
E	4.700,27	517,03
F	4.655,26	512,08
M	3.362,68	369,89
A	2.209,34	243,03
M	5.186,45	570,51
J	7.096,45	780,61
J	0,00	0,00
A	0,00	0,00
S	7.593,60	835,30
O	1.645,39	180,99
N	3.566,59	392,32
D	5.026,66	552,93

³ El dato se obtiene multiplicando los kg de CO₂ por kg de Sólidos Totales (1,97) por el % que estos representan sobre el total de masa fresca ensilada (23,5%)

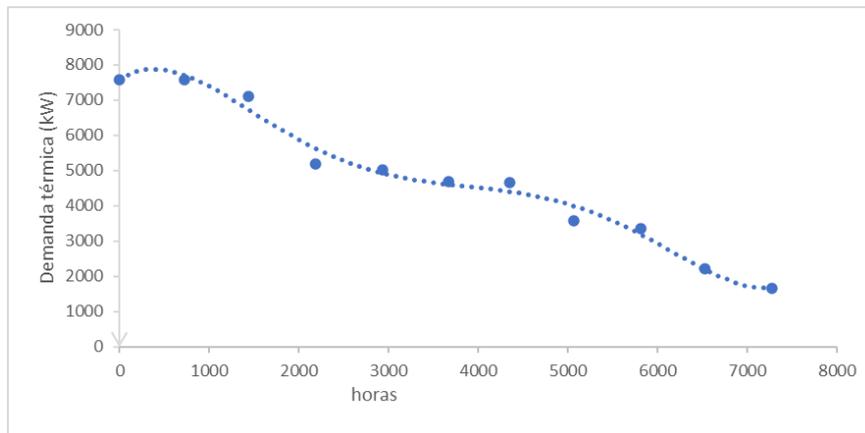


Ilustración 16. Demanda térmica de los invernaderos para una producción de 5.000 t

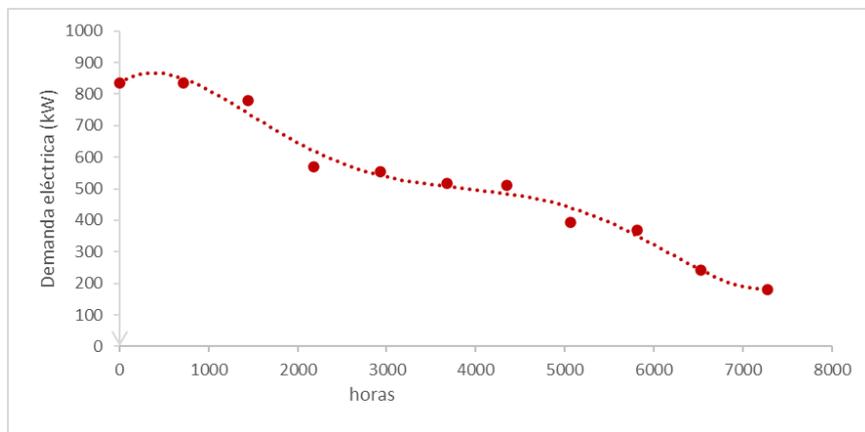


Ilustración 17. Demanda eléctrica de los invernaderos para una producción de 5.000 t

- La demanda energética de las industrias se estima en base a la necesidad de procesar el pepino inmediatamente tras su cosecha. Para ello existen diversas opciones de negocio:
 1. Asumiendo 42 semanas de producción por ser invernadero de alto control climático (Kempkes, 2018), se estiman 292 días con 8 h de procesamiento industrial. Dado que no se disponen datos de las potencias típicas de la maquinaria empleada en el procesamiento del pepino, se asume una potencia uniforme durante esas horas, más acorde a la producción en fresco. Se establece el total de la demanda como refrigeración ($T_{ref} = 4\sim 6^{\circ}C$), debiendo ser dividida por su respectivo CEE en cuanto se determine la instalación de refrigeración por absorción.

Tabla 14. Potencia demandada por la industria de procesamiento en fresco, asumiendo operación constante.
Fuente: Elaboración propia con datos de ENEA

Tipo de producción	Toneladas anuales	Potencia eléctrica demandada (kW)	Potencia térmica demandada (kW)	Horas de funcionamiento
Frescos	5.000	52,44	77,05	2336,00

2. Asumiendo para el caso de una industria con tratamiento térmico que se trata de encurtido de pepinillos, en los que, por la naturaleza del proceso, las fases de selección, calibración y lavado también se llevan a cabo durante todo el periodo de recolección. La diferencia radica en el proceso de fermentación al que se somete el producto a temperatura ambiente y que permite almacenarlo por largos periodos de tiempo, a temperatura ambiente, en una salmuera de 16-20 % de concentración de sal (Martínez, 1998) (InfoAgro). Las fases de desalado, envasado con líquido de gobierno, cerrado, pasteurización y almacenaje se pueden concentrar en la época de nulo consumo energético en los invernaderos para ampliar las horas de uso. Se suponen jornadas productivas de 8h todos los días.

Tabla 15. Potencia demandada por la industria de procesamiento térmico asumiendo envasado estival. Fuente: Elaboración propia con datos de ENEA

Actividades periodo agrícola	Consumo eléctrico (kWh)	Consumo térmico (kWh)	Potencia eléctrica (kW)	Potencia térmica (kW)
Recepción	17.000,00	0,00	6,99	0,00
Lavado y selección	10.500,00	255.000,00	4,32	104,85
Calibración	32.000,00	360.000,00	13,16	148,03
Total	59.500,00	615.000,00	24,47	252,88
Actividades periodo post-producción				
Desalado	34.500,00		70,70	0,00
Envasado	15.000,00	250.000,00	30,74	512,30
Pasteurización	40.000,00	1.145.000,00	81,97	2.346,31
Refrigeración	5.500,00		11,27	0,00
Almacenamiento	5.000,00		10,25	0,00
Total	100.000,00	1.395.000,00	204,92	2.858,61

El cálculo de los consumos y potencias se ha realizado conforme a los valores de la *Tabla 8* procedente de la ENEA, usando los valores de consumo por tonelada procesada de los procesos presentes en el encurtido de pepinillos.

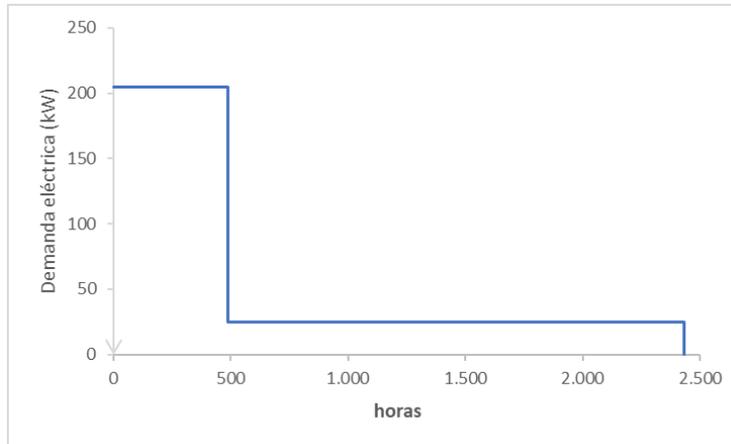


Ilustración 18. Curva de demanda eléctrica por la industria de procesamiento térmico asumiendo envasado estival.

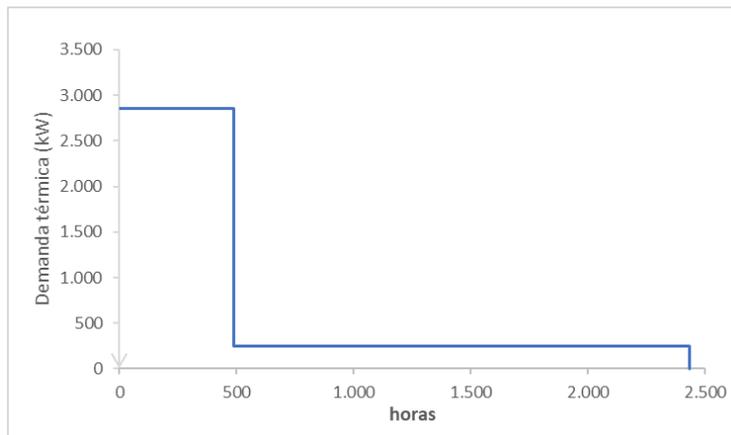


Ilustración 19. Curva de demanda térmica por la industria de procesamiento térmico asumiendo envasado estival.

Para dimensionar el ciclo, las curvas de demanda eléctrica y térmica del conjunto tienen en cuenta el siguiente supuesto: La demanda térmica de la planta de frescos se divide por un CEE (respecto a la energía del circuito de calefacción) aproximado de 0,6 para obtener la verdadera demanda térmica para la central de biomasa sin el circuito de refrigeración. La refrigeración en los invernaderos (producida en mayo, junio y septiembre) ya tiene aplicado ese factor.

$$CEE = \frac{Q_{ref}}{Q_{cal}}$$

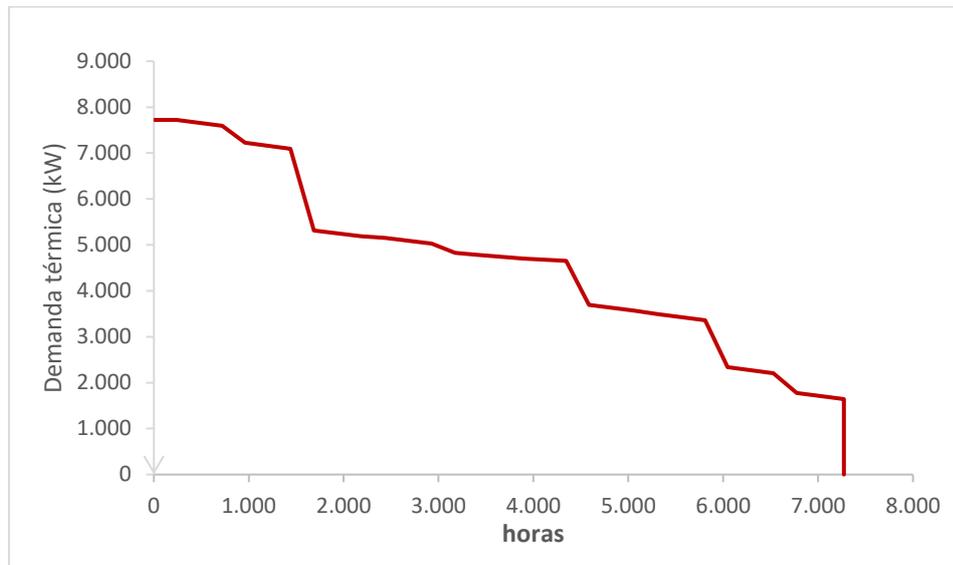


Ilustración 20. Curva de demanda térmica del conjunto invernaderos + planta de procesamiento de frescos.
Fuente: Elaboración propia.

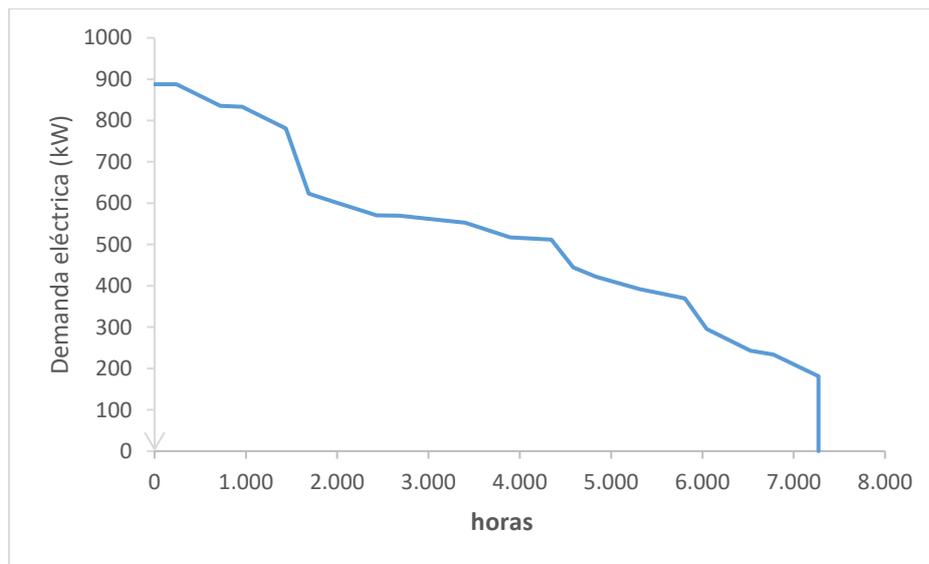


Ilustración 21. Curva de demanda eléctrica del conjunto invernaderos + planta de procesamiento de frescos.
Fuente: Elaboración propia.

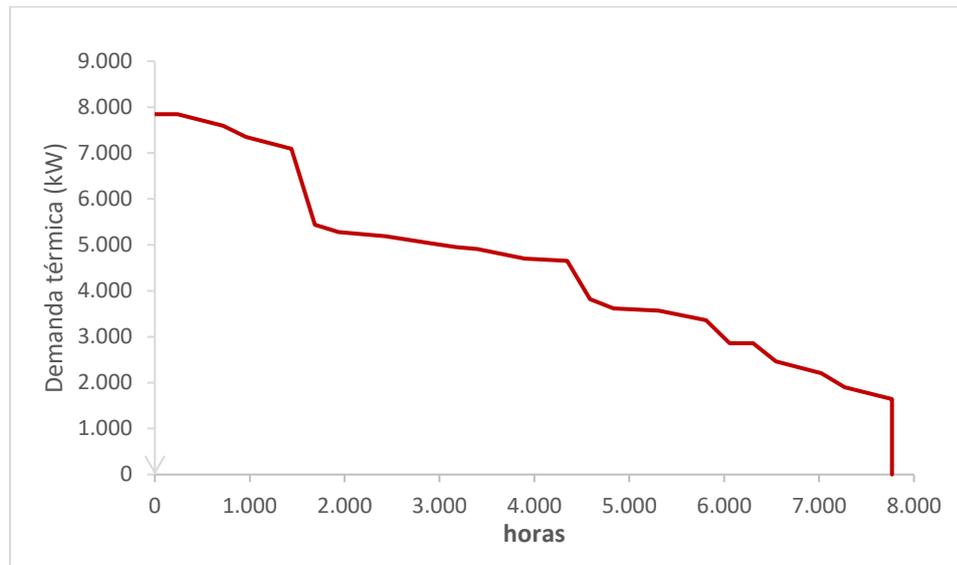


Ilustración 22. Curva de demanda térmica del conjunto invernaderos + planta de encurtidos. Fuente: Elaboración propia.

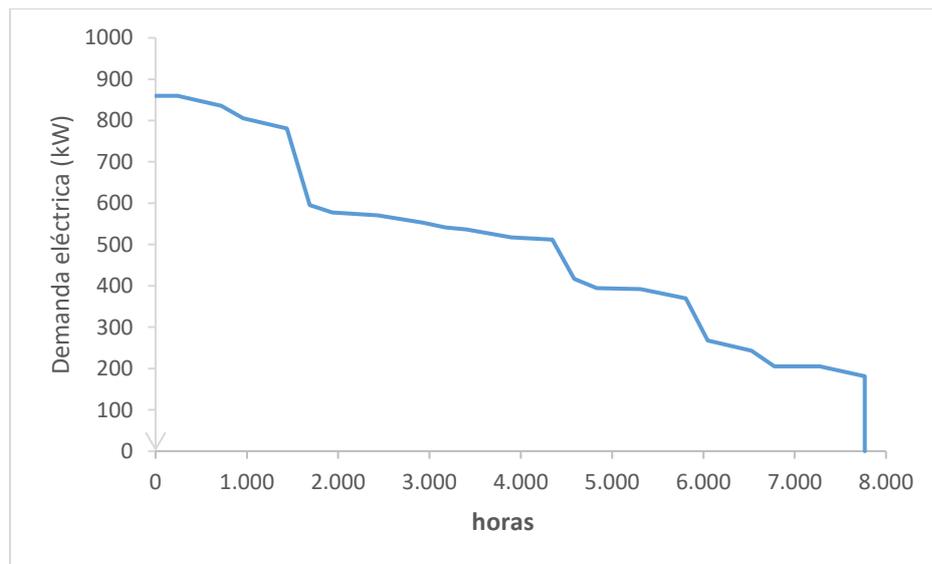


Ilustración 23. Curva de demanda eléctrica del conjunto invernaderos + planta de encurtidos. Fuente: Elaboración propia.

Elección de ciclo de cogeneración:

El factor de diseño restante por calcular es el poder calorífico disponible por los residuos del cultivo de pepinos. Partiendo del poder calorífico a diferentes % de humedad ya mencionados, e incluyendo la opción de fermentarlos para crear biogás (Oleszek et al, 2015), la energía disponible es la siguiente:

Tabla 16. Poder calorífico asumido para la producción objetivo. Fuente: Propia, con datos de *The Possibility of Meeting Greenhouse Energy and CO2 Demands Through Utilisation of Cucumber and Tomato Residues*

Toneladas anuales fruto	Toneladas anuales restos	PCI 75% humedad (kWh/ton)	PCI 25% humedad (kWh/ton)	q ferm 75% humedad (kWh/ton)	Qcomb 75% (kWh)	Qcomb 25% (kWh)	Qferm 75% (kWh)
5.000,0	900,0	263,9	2.147,2	427,8	237.510,0	1.932.480,0	385.020,0

Dado el alto contenido de humedad presente en los residuos agrícolas y la humedad anual en los climas mediterráneos como Madrid (>25% siempre), no se puede conseguir un secado natural de la biomasa de pepino, además del riesgo de fermentación y pérdida de propiedades.

Tabla 17. Climatología anual en un clima mediterráneo continental, Madrid. Fuente: *Climate-data.org*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	4.8	6	9.2	12.2	16.7	22.8	26	25.6	20.9	15.1	8.6	5.5
Temperatura min. (°C)	0.9	1.4	3.8	6.4	10.3	15.7	18.8	18.5	14.8	10.2	4.7	1.8
Temperatura máx. (°C)	9.5	11.4	15	17.9	22.6	29	32.4	31.9	26.8	20.3	13.2	10.1
Precipitación (mm)	41	34	40	47	39	16	6	8	22	61	55	46
Humedad(%)	77%	69%	60%	57%	48%	35%	28%	30%	41%	60%	72%	77%
Días lluviosos (días)	5	4	4	6	5	3	1	2	3	5	5	5
Horas de sol (horas)	5.7	6.8	8.1	9.4	11.5	13.0	13.1	12.1	10.4	7.8	6.1	5.7

Por tanto, en este estudio se opta por asumir el uso de la biomasa sin secado, que alcanza a cubrir (asumiendo $\eta_t=80\%$) sólo el 0,6% de la demanda energética térmica anual de la parte agrícola del sistema. El coste energético y económico de invertir en un sistema de secado de biomasa, como un trómel en base a gases de escape como el sistema FLU-ACE® (THERMAL ENERGY INTERNATIONAL INC.,2022) no se toma en consideración en este proyecto por falta de datos, pero supondría cubrir hasta un 4,7% de la demanda energética de los invernaderos. El CO₂ generado en la combustión de los residuos es de 416,7 toneladas, que sólo cubre el 1,9% de la demanda de los invernaderos anual, bajo el caso teórico de un aprovechamiento del 100% de las emisiones. Dado que en los modelos el combustible más apropiado para una central de cogeneración es la biomasa, se utilizará la herramienta BIORAISE para estimar el aprovisionamiento restante de combustible. Para ello, se toma como referencia el aprovisionamiento para un punto del oeste de la Comunidad de Madrid donde se instalaría el conjunto, ampliando el radio de suministro a 100km a la redonda.

Cálculo - Resultados							
Contenido Energético							
Biomasa Agrícola	Recursos disponibles (tms/año)	Humedad (% b.h.)	Recursos disponibles (tmh/año)	Ceniza valor medio referencia (% b.s.)	Contenido energético (GJ/año)	Coste medio recolección (€/GJ)	Coste medio de transporte (€/GJ)
Secano	485,988.87	35	747,675.18	6.1	7,660,904.21	2.65	1.43
Regadío	83,212.93	75	308,196.03	7.8	853,585.88	2.04	2.47

Ilustración 24. Biomasa teórica disponible para abastecer al conjunto. Nótese el valor de humedad estimado de 75% en biomasa de regadío. Fuente: BIORAISE

El diseño de la instalación es el de una planta de cuatri-generación con ciclo Rankine con fluidos orgánicos. El diseño se inspira en las instalaciones de cogeneración de biomasa con ORC⁴ presentes en la localidad de Lienz, Austria y su adaptación en el caso de estudio de la cátedra R. Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas (Uris et al, 2017).

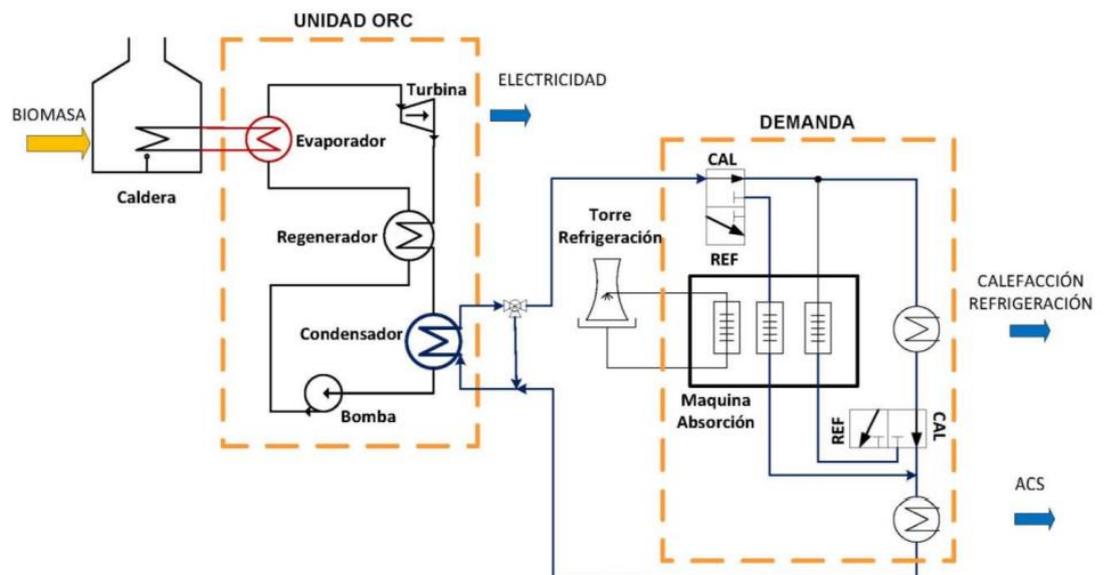


Ilustración 25. Modelo de cogeneración con biomasa y ORC. Fuente: ICAI, "¿Es rentable la biomasa para producir electricidad y climatización centralizada para viviendas en España?" Autores: M. Uris, E. Arenas, J.I. Linares (2017)

Los criterios cualitativos de diseño elegidos para este estudio son el uso de los sistemas generadores a carga completa y la nula disipación de calor. Las potencias

⁴ Como el ejemplo provisto en el apartado de diseño para el modelo de central de biomasa más invernadero tradicional (Ilustración 11).

elegidas de cogeneración con biomasa se evalúan por los siguientes criterios cuantitativos:

- CO₂ emitido y capturado necesario para alimentar la demanda de los invernaderos como criterio principal objeto de este estudio. Para ello se usa la misma estimación de 436g de CO₂/kg de biomasa húmeda y la demanda de CO₂, calculada en 21.900 toneladas (Oleszek et al, 2015). Se asume un 90% de captura mediante el empleo de sistemas de captura por MEA (monoetanolamina) (Dion et al, 2011) (Zhu et al, 2019).

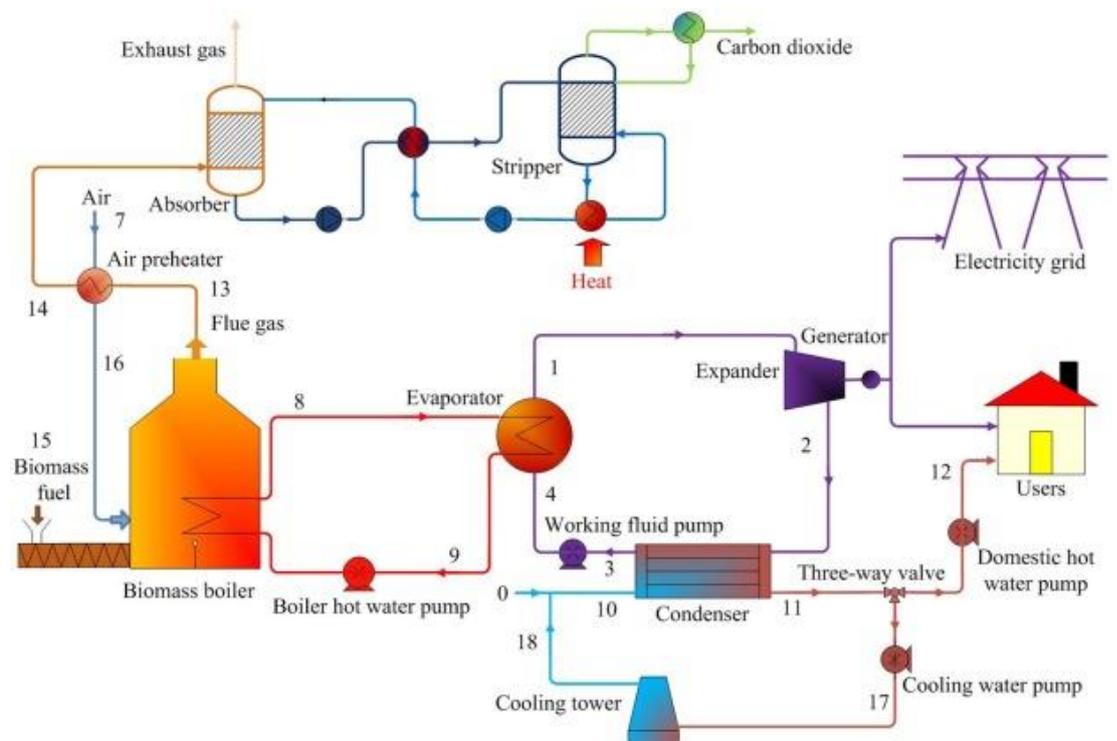


Ilustración 26. Ejemplo de ORC con cogeneración de biomasa y sistema de captura de CO₂ post-combustión con MEA. Fuente: Thermodynamic analysis and economic assessment of biomass-fired organic Rankine cycle combined heat and power system integrated with CO₂ capture. Autores: Zhu, L. et al

- Sistema de refrigeración por absorción de simple efecto con agua/bromuro de litio, con un CEE de 0,6 aproximado, trabajando el sistema con el agua de entrada al condensador entre 65/95° C. Este es el coeficiente que se ha usado para simplificar las curvas de demanda.

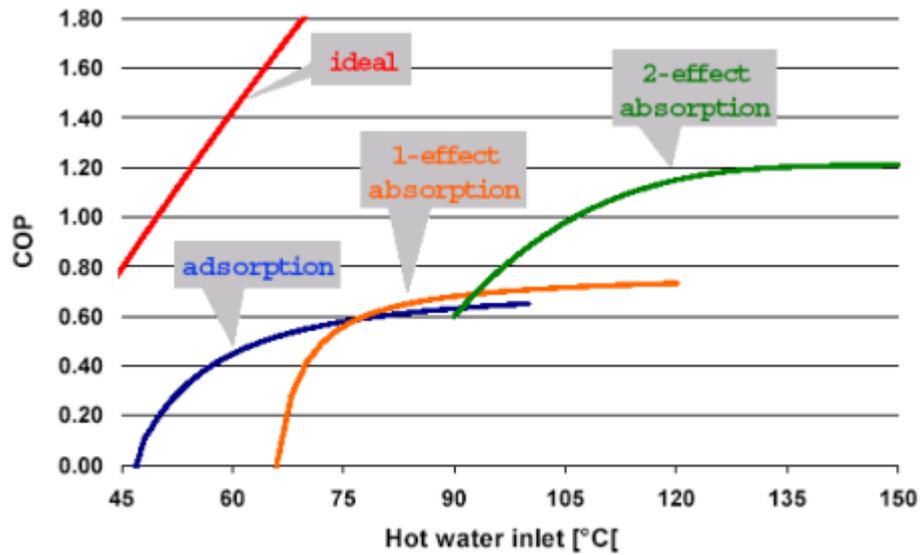


Ilustración 27. Gráfico de evaluación de los CEE de las diferentes tecnologías en base a la temperatura del agua del condensador. Fuente: ICAI. Autor: Coronas (2005)

- Mayor número de horas de funcionamiento.
- Mayor porcentaje de la demanda térmica satisfecha.
- Menores costes de inversión iniciales.

Los parámetros técnicos de operación de la cogeneración se contemplan en la siguientes tablas:

Tabla 18. Datos técnicos de funcionamiento de la planta de cogeneración. Fuente: Techno-economic feasibility assessment of a biomass cogeneration plant based on an Organic Rankine Cycle. Autores: Uris, Linares, Arenas

Tipo de planta	Subcrítica
Tipo de aceite	HMDSO
Temperatura del aceite [oC]	65/95
Eficiencia de la caldera [%]	85
Eficiencia de la turbina [%]	85
Eficiencia de la bomba [%]	75

$$Q_{biom_{min}} = \frac{M_{emisiones}}{factor_{captura}} \times PCI_{biom} \left(263,9 \frac{kWh_{bio}}{tn_{bio}} \right)$$

Tabla 19. Biomasa mínima requerida para satisfacer la demanda de CO₂.

Requisitos demanda CO ₂	Necesidades biomasa totales	Necesidades biomasa externa	Emisiones CO ₂ reales	Emisiones CO ₂ capturadas
tn húmedas	55.810	54.910	24.333	21.900
kWh	14.728.364	14.490.854	0	0

La demanda energética deberá cubrir, al menos, las necesidades másicas de CO₂, que además conllevan un coste en energía térmica. Pese a que la absorción con MEA es la tecnología más madura en esta etapa (Song et al, 2017), el coste energético de capturar CO₂ postcombustión es muy elevado, variando desde 1.027,78 kWh/tn capturada (Zhu et al, 2019) hasta los 868,05 kWh/tn capturada (Song et al, 2017). Otras tecnologías para capturas postcombustión en fase experimental con TiO(OH)₂ como catalizador de la reacción reducen la temperatura de desorción del MEA muy por debajo de los 100 ° C y aumentan su ritmo un 4.500%, prometiendo una mayor eficiencia energética a corto plazo (Lai et al, 2018); o usan amoníaco con un coste energético teórico de 318,61 kWh/tn capturada (P. Luis, 2016). Como criterio de diseño, la demanda de energía térmica para capturar el CO₂ provendrá del propio ciclo térmico. Se estima que las condiciones de trabajo son suficientes para llevar a cabo el proceso de absorción.

A las curvas de demanda se debe agregar, por tanto, la demanda térmica adicional para realizar la captura de CO₂, Q_{CCU} , repercutiendo en un aumento de las emisiones a su vez. Tomando 868,05 kWh/tn capturada, el gasto térmico a distribuir sobre las curvas de demanda es de 19,01GWh (19.010.295 kWhth); como $Q_{CCU} > Q_{biom_{mín}}$, este valor pasa a ser el límite inferior.

$$\dot{Q}_{CCU} = \frac{m_{biomCCU} \times PCI_{biom}}{\eta_v \times t} \times q_{\frac{CCU}{m_{CO_2}}} \times \left(\frac{X_{\frac{CO_2}{biom}}}{\eta_{CCU}} \right)$$

La fórmula de distribución para trabajar a plena carga es:

$$\dot{Q}_{nomTh} = \dot{Q}_{CCU} + \dot{V}_{bio} = \frac{(m_{biomCCU} + m_{biomV}) \times PCI_{biom}}{\eta_v \times t} \times q_{\frac{CCU}{m_{CO_2}}} \times \left(\frac{X_{\frac{CO_2}{biom}}}{t \times \eta_{CCU}} \right)$$

Siendo $\dot{V}_{bio} + \dot{Q}_{CCU}$ la potencia térmica a plena carga de la caldera, η_v el rendimiento térmico nominal de la planta (que luego tendrá un $\eta_{v,real}$ menor), PCI_{biom} la energía específica o poder calorífico inferior de combustión del combustible, $q_{\frac{CCU}{m_{CO_2}}}$ la energía térmica para capturar una tn de CO₂, $X_{\frac{CO_2}{biom}}$ la masa de CO₂ emitida por unidad de masa de combustible y η_{CCO_2} el rendimiento del sistema de captura.

Dado que no se estima en la bibliografía consultada una potencia mínima para extraer el CO₂, los límites son los siguientes:

- La energía térmica para capturar el carbono requerido es de 19,01 GWh térmicos, por lo que la potencia térmica a carga completa mínima del grupo

generador elegido es $\dot{Q}_{CUU} = \frac{Q_{CCU}}{t_{m\acute{a}x}}$

- **2.614,18 kW** para el conjunto de industria de frescos e invernaderos.
 - **2.447,26 kW** para el conjunto de industria de encurtidos e invernaderos.
- Siendo \dot{V} la demanda térmica ajena al sistema de captura de CO₂, para que no se disipe energía térmica durante las horas en las que opere:

$$\dot{Q}_{vnominal} - \dot{Q}_{extra\ CO_2} \leq \dot{V}$$

Se eligen 3 modelos de planta de cogeneración con ciclo ORC con los datos técnicos para plena carga:

Tabla 20. Datos técnicos para las diferentes propuestas de dimensionamiento de la planta. Fuentes: "Techno-economic feasibility assessment of a biomass cogeneration plant based on an Organic Rankine Cycle" & "A techno-economic analysis of small-scale, biomass-fuelled combined heat and power for community housing". Autores: (Uris, Linares et Arenas, 2017) & (Wood et Rowley, 2011)

Potencia ele (MWe)	1	2	0,6
Potencia ter (MWth)	5,17	10,34	2,94
Potencia cal (MWHeat)	5,17	10,34	2,94
Potencia ref (MWCool)	3,10	6,21	1,764
η_e [%]	14,5	14,5	14
η_v [%]	75	75	85

Las fórmulas que permiten valorar la eficiencia energética de la planta, tomando $\eta_{ref_e} = 0,25$ y $\eta_{ref_H} = 0,8$ (UE, Norma 877/2011) (ICAI) y $CEE_C = 0,6$ son:

- Ahorro de energía primaria, AEP:

$$AEP = \left(1 - \frac{Q}{\frac{E}{\eta_{ref_e}} + \frac{V_H}{\eta_{ref_H}} + \frac{V_C}{\eta_{ref_H} \times CEE_C}} \right) \times 100\%$$

- Rendimiento eléctrico equivalente, REE:

$$REE = \left(\frac{E}{Q - \frac{V_H}{\eta_{ref_H}} - \frac{V_C}{\eta_{ref_H} \times CEE_C}} \right) \times 100\%$$

9. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO ECONÓMICO

Para realizar la valoración económica de la inversión en el sistema de autoabastecimiento de CO₂ y energía para el entorno de ecología agroindustrial propuesto, se han establecido las siguientes condiciones:

- Sólo se analizan las inversiones, los costes operativos y los balances de suministro energético respecto a la instalación de cuatrigeneración.
- Se asume la existencia de conexiones de red eléctrica y de tuberías de climatización.
- La sustitución de consumos energéticos por la instalación propuesta permite los siguientes ahorros:
 - Los consumos y ventas eléctricos sustituidos en todas las instalaciones contabilizan el ahorro de la tarifa media del mercado eléctrico.
 - Los consumos de calefacción de invernaderos y consumos térmicos de la planta de encurtidos se contabilizan como ahorro de energía de caldera de GN.
 - Los consumos de refrigeración de la planta de procesados y la climatización de los invernaderos se contabilizan como ahorro de climatización de gasto eléctrico.
- Se aplican factores correctivos para hallar los gastos equivalentes por diferentes fuentes de energía.
- No se realizan valoraciones cuantitativas del aumento de la producción por el enriquecimiento de CO₂, al no tener costes operativos detallados de los sistemas productivos descritos.

Dada la intensidad energética requerida para la captura del CO₂ postcombustión para que tenga la pureza suficiente para usarse en el sistema agrícola y alimentario, no se valora realizar un estudio de producción marginal para establecer la viabilidad comercial.

A continuación, se muestra una tabla con todos los factores económicos necesarios para proyectar el desempeño económico de la inversión:

Tabla 21. Datos económicos generales de la planta de cogeneración. Fuente: Techno-economic feasibility assessment of a biomass cogeneration plant based on an Organic Rankine Cycle. Autores: Uris, Linares, Arenas

Tipo de coste	BCCHP-ORC de 1 MWe	BCCHP-ORC de 2 MWe	BCCHP-ORC de 0,6 MWe	Tasa nominal (%)
Costes de inversión Inv _p (€)	7.609.155,00	11.533.322,29	3.570.000,00	0

Costes de mantenimiento CM (€)	250.000	250.000	6*t	3,5
Costes de administración CA (€)	60.000	60.000	60.000	3,5
Costes sistema de refrigeración por absorción Inv _c (€×kWrefr)	893	893	893	0
Impuestos Tx	0	0	0	36

Para el aprovisionamiento de biomasa, se estima que la producida dentro del sistema solo acarrea un 50% de los costes de procesamiento, llevando a cabo un troceado y ensilado.

Tabla 22. Costes asociados al combustible. Fuente: Bioraise

Tipo de coste	Coste de transporte (€/GJ)	Coste de recolección (€/GJ)	Tasa nominal (%)
Costes de biomasa externa Cbio_ext	2,47	2,04	3,5
Costes de biomasa propia Cbio_in	0	1,02	3,5

Para los precios de electricidad, incluyendo el equivalente de refrigeración, y los factores de corrección que los multiplican, se ha optado por coger precio medio actual del kWh para grandes empresas de una comercializadora como base. Para el GN se ha optado por precio medio en 2020 dado el nivel de distorsionamiento actual del mercado. El factor de corrección para la refrigeración es una media entre el EER¹ típico de aplicaciones de climatización y refrigeración por encima del punto de congelación (ERR ≈ 8).

Tabla 23. Tabla de precios energéticos y factores de conversión. Fuentes: Roams energía grandes empresas, ICAI, Calor y Frio, Precio Gas.

Tipo de ingreso	Precio (€/Kwh)	Factor de conversión f _{refr}	Tasa nominal (%)
Ahorro/venta energía eléctrica Ae	0,274	1	3,5
Ahorro energía calefacción GN Ah	0,08	1	3,5
Ahorro energía refrigeración Ac	0,274	0,125	3,5

Para el sistema de captura de CO₂ por absorción con MEA, se han seleccionado los siguientes parámetros económicos, estimando un cambio 1:1 \$/€:

Tabla 24. Costes relacionados con el sistema de captura de CO₂. Fuente: *Thermodynamic analysis and economic assessment of biomass-fired organic Rankine cycle combined heat and power system integrated with CO₂ capture*. Autores: Zhu, L. et al

Tipo de coste	Precio instalación (€/Mwe)	Coste por tn de CO ₂ procesada (€/ton)	Tasa nominal (%)
Costes de inversión Inv _{CCU}	649.400	0	0
Costes de mantenimiento C _{ccu}	0	1,408	3,5

La tasa de rentabilidad (TIR) objetivo del proyecto es de un mínimo de 7,09% (MITECO, 2022) para optar a una retribución regulada, tras la convocatoria de subasta de 1.200 MW en cogeneración de gas natural y biomasa. Los requisitos para ser receptor de la adjudicación que aplican al estudio son:

- Vida útil regulatoria (N) de 20 años.
- AEP > 10%
- Autoconsumo de más del 30% de la demanda eléctrica, E_{consumo} > 30% de E_{total}

La fórmula empleada para calcular el TIR del proyecto es la siguiente:

$$C_I + C_{refr} + C_{CCU} = INV$$

$$\begin{aligned}
 INV = & (1 - Tx) \times \sum_{j=1}^N \frac{(1 + r)^j \times (Ae + Acal + Arefr \times f_{refr})}{(1 + TIR)^j} \\
 & - (1 - Tx) \times \sum_{j=1}^N \frac{(1 + r)^j \times (C_M + C_A + C_{bio\ ext} + C_{bio\ in} + C_{Mccu})}{(1 + TIR)^j} \\
 & + \left(\frac{INV \times Tx}{N} \right) \times \sum_{j=1}^N \frac{1}{(1 + TIR)^j}
 \end{aligned}$$

Capítulo III: Impacto Medioambiental

Índice

10. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL DISEÑO	67
10.1 Impacto sobre la cuenca hidrológica.....	67
10.2 Huella de carbono	69
10.3 Impacto de la generación de residuos.....	71
10.4 Impacto socioeconómico	71

10. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL DISEÑO

10.1 Impacto sobre la cuenca hidrológica

La necesidad del empleo de agua para satisfacer numerosas necesidades en las diferentes partes que conforman la sinergia agroindustrial requiere de disposición continua de recursos hídricos para el correcto funcionamiento. Los sistemas de refrigeración y climatización de ambas instalaciones requieren el secuestro de un determinado caudal de agua que, por el contrario, no requiere de una reposición tan exhaustiva como la del agua destinada al crecimiento del cultivo.

Las tecnologías de regadío empleadas en los invernaderos como el riego por goteo o los cultivos hidropónicos reducen las pérdidas de agua por evapotranspiración (Novagric, 2015). En concreto la hidroponía, al constar de instalaciones parecidas a los circuitos de refrigeración (circuitos de tuberías con mínima superficie libre y recirculación del mismo caudal con aportes mínimos) de la instalación industrial, reducen al mínimo las pérdidas de entre todos los sistemas de riego.

El empleo de tecnologías de control paramétrico y automatización de riego y humedad facilitan la optimización del uso de agua en invernaderos, que al ser sistemas casi cerrados se prestan mejor al funcionamiento y precisión de estos sistemas.



Ilustración 28. Control de riego en un invernadero. Fuente: El Ágora. Autor: Curro Vallejo

El empleo de especies de cultivo de tipo de fotosíntesis C4 y CAM con suplemento de CO₂ ambiental reduce el consumo de agua sin reducir la productividad estándar, mientras que las especies de tipo C3 cultivadas en sustrato con aporte de CO₂ ambiental reducen el consumo de agua mediante el aumento de follaje y, por tanto, aumento de la sombra proyectada y disminución de la temperatura del sustrato.⁵ En el caso del cultivo de pepino en hidroponía con concentraciones de 700 p.p.m., la eficiencia en el consumo de agua aumenta un 40% (Nikolaou et al, 2021).

El impacto de la agricultura de regadío en España es una problemática muy estudiada, con controversiales trasvases entre cuencas hidrográficas (p.ej. Tajo-Segura) con impacto negativo sobre la biodiversidad y la proliferación de la desertificación. Aun así, el consumo de agua de las explotaciones agrícolas de invernaderos solares del sur de España es en torno a 20 veces inferior a las explotaciones de regadío tradicionales para la misma producción (El Ágora, 2021). Se puede asumir que el efecto del abonado ambiental sólo acrecienta esos ahorros.

Medidas de alivio de la presión hidrológica a adoptar incluyen compatibilización de caudales industrial y agrícola e instalación de balsas de captación de agua de lluvia.



Ilustración 29. Balsa de recogida de agua de lluvia. Fuente: El Ágora. Autor: Curro Vallejo

⁵ Ver Memoria descriptiva, apartado de aporte de CO₂ en invernaderos.

10.2 Huella de carbono

La huella de carbono de un producto es la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por causa directa o indirecta en su ciclo de vida. Los diseños resultantes del estudio son causa directa de emisiones en la producción de energía eléctrica o calorífica, así como indirecta en la producción de los productos agrícolas y su procesamiento en las instalaciones.

Tabla 25. Huella de carbono de algunos tipos de frutas en la etapa de producción. Fuente: HUELLA DE CARBONO GENERADA POR EL CONSUMO DE FRUTAS Y VERDURAS EN ESPAÑA. Autores: Laura Chardi, et al.

Producto	Huella de carbono (kg CO ₂ -eq/kg alimento)	País de origen	Referencia
Naranja	0,276	España	Sanjuan et al., 2005
Mandarina	0,4	España	Brovia et al., 2015
Plátanos	1,183	España	Dole Bananas, 2012
	1,4265	Costa Rica	Dole Bananas, 2012
Manzanas	0,4	España	The International Environmental Product Declaration System, 2014
	0,12	Francia	González et al., 2011
	0,645	Italia	The International Environmental Product Declaration System, 2014
Melocotones	1,113	España	Peris Martínez, 2015
Albaricoques	1,16	España	Peris Martínez, 2015
Fresa	0,684	España	Grupo REWE, 2009
	1,3142	Países externos	Lillywhite, 2008 Mordini et al., 2009
Kiwi	1,2855	España	Bowlig, 2009
	1,993	Nueva Zelanda	Bowlig, 2009
Piña	0,513	Costa Rica	Blonk, et al., 2010.

Tabla 26. Huella de carbono de algunos tipos de verduras en la etapa de producción. Fuente: HUELLA DE CARBONO GENERADA POR EL CONSUMO DE FRUTAS Y VERDURAS EN ESPAÑA. (2016) Autores: Laura Chardí, et al.

Producto	Huella de carbono (kg CO ₂ equivalentes/kg de alimento)	País de origen	Referencia
Patatas	0,337	España	Carlson et al., 2008
Tomate	1,0135	España	Torrellas, et al., 2012 Antón, 2009 Nemecek, et al., 2011
Cebollas	0,253	España	Wilson, et al., 2011
	0,28	Japón	Yoshikawa, et al., 2008
	0,185	Nueva Zelanda	Saunders, et al., 2006
Coles	1,96	España	Milà i Canals et al., 2008
	0,308	Países Bajos	Blonk, et al., 2010
Pepinos	0,375	España	Hofer, 2009
	0,2815	Países Bajos	Hofer, 2009
Espárragos	0,8935	España	Hofer, 2009
	1,593	Marruecos	Hofer, 2009
Guisantes	0,754	España	Nemecek, et al., 2011
	0,4235	Francia	Meul, et al., 2012 Nguyen, et al., 2012
Maíz dulce	2,205	España	Frate, et al., 2008
	0,398	Francia	Meul, et al., 2012
	0,655	USA	Frate, et al., 2008

Las principales reducciones de la huella de carbono total se distinguen por instalación:

- Huella de carbono industrial: Reducida a través de la captación de las emisiones de CO₂ por los cultivos del invernadero y un mayor aprovechamiento de la energía, que se obtiene parcialmente de biomasa agrícola, considerada como un combustible de huella neutra si no hay transporte dependiente de combustibles fósiles involucrado.
- Huella de carbono agrícola: Reducida a través del uso más eficiente de la superficie de cultivo, el empleo de calor de cogeneración y energía solar para la climatización de los invernaderos y las menores distancias de transporte en el caso de producción cercana a la planta de procesamiento. La reducción global de la huella también se da al cultivar en invernaderos de alta eficiencia productos de origen tropical.

10.3 Impacto de la generación de residuos

La generación de residuos asociada a la generación eléctrica y a la actividad agrícola se puede categorizar según la naturaleza de los residuos:

- Residuos compostables: Desechos orgánicos o minerales, como la ceniza procedente del quemado de biomasa o restos del cultivo no aprovechados previamente, que pueden asimilados (a corto-medio plazo) biológicamente durante el compostaje, siendo fuente de nutrientes para otros seres vivos. Especialmente valiosos en agricultura son los compuestos volátiles con nitrógeno captados postcombustión (Luis et al, 2015). Para su correcto tratamiento se debe evaluar el volumen y concentración de nutrientes en destino; evitando la anaerobia si no se pueden aprovechar las emisiones, así como la eutrofización de los cuerpos de agua cercanos.
- Residuos reciclables: Desechos no compostables pero aprovechables mediante su reprocesamiento, como parte del envasado de los productos agrícolas (plásticos, vidrios) o los elementos metálicos como el cableado de los sistemas eléctricos de la industria. El impacto derivado de las instalaciones en sinergia es directo, por la obsolescencia y degradación de las instalaciones, o indirecto, por los envases de comercialización no biodegradables, cuya gestión recae en el consumidor final. Los invernaderos de alto control micro climático están hechos de materiales más duraderos y reciclables, como el vidrio.
- Residuos inorgánicos no reciclables: Desechos de carácter inerte o peligroso para el medioambiente generados como subproducto de la explotación o la degradación de los componentes, perteneciendo a la categoría inerte los escombros y a los peligrosos agentes corrosivos o metales pesados. Dada la naturaleza de los modelos de instalación planteados, se deben emplear sistemas de filtrado de los gases de combustión y los sistemas de agua para evitar la llegada al medioambiente de este tipo de residuos y retirarlos para su posterior gestión. La adopción de sistemas de refrigeración por absorción con bromuro de litio responde a el criterio de menor toxicidad.

10.4 Impacto socioeconómico

El planteamiento de este proyecto es evaluar la viabilidad de concentrar, en un mismo entorno industrial, la producción de alimentos y proveer de otros servicios básicos como electricidad, calefacción o refrigeración, que abastezcan a la industria, el sector productivo y la población colindante. El uso de combustibles alternativos

que valoricen residuos y permitan diversificar la generación ayuda a crear sistemas energéticos más resilientes. La capacidad de sustitución de demanda de gas natural o gasoil no sólo favorece la transición ecológica, también regula el precio de esto en el mercado, quedando esos recursos disponibles para las industrias más dependientes de ellos, optimizando su uso. El amplio potencial de biomasa agrícola y forestal explotable puede redundar en la salud de los ecosistemas circundantes. Si se hace con respeto a los procesos ecológicos, puede ayudar a reducir la frecuencia e intensidad de los incendios en el clima mediterráneo, así como reducir la superficie de fotovoltaica a implementar, de bajo valor ecológico y paisajístico.

El aumento de la producción en invernaderos de alto control micro climático y fertilización por CO₂, tanto en tiempo como en cantidad, estimula la generación de más empleos, con menor temporalidad y menos físicos. Aumentando la calidad del empleo en el sector primario.

Capítulo IV: Anexos

Índice

ANEXO A: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE A LOS QUE SE ADSCRIBE EL PROYECTO	77
Objetivo 7, Energía Asequible y No Contaminante.....	77
Objetivo 9, Industria, Innovación e Infraestructura	78
Objetivo 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles	79
Objetivo 12, Producción y Consumo Responsables	80
Objetivo 13, Acción por el Clima	81
Objetivo 15, Vida de Ecosistemas Terrestres	82
Otros Objetivos de Desarrollo Sostenibles deseables en la implantación de los diseños teóricos	82

ANEXO A: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE A LOS QUE SE ADSCRIBE EL PROYECTO



Ilustración 30. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Fuente: ONU

Dentro de los 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible, el proyecto busca ayudar a la consecución de las siguientes 6 metas principalmente:

Objetivo 7, Energía Asequible y No Contaminante



Ilustración 31. ODS 7. Fuente: IS Global

La contribución del proyecto en este aspecto se fundamenta en el esfuerzo en el diseño por aprovechar las emisiones de cualquier tipo de central termoeléctrica

como recurso para la agricultura, además de aprovechar el calor residual de forma productiva. Ello conlleva una reducción neta de las emisiones y un mayor rendimiento sobre el aprovechamiento de los recursos energéticos finitos.

En el caso concreto del binomio invernadero/ central térmica de biomasa con cogeneración, no sólo se cumplen las premisas anteriores, sino que además se usa una fuente de energía sostenible y renovable, promocionando el uso de subproductos agrícolas como recurso energético con huella de carbono reducida dada la reducción de emisiones en transporte y la “reversión” de las emisiones en crecimiento del combustible. Las centrales de biomasa en sinergia con plantaciones de productos alimentarios pueden convertirse en un complemento casi perfecto a la generación por otras tecnologías renovables más dependientes de la estacionalidad y momento del día (por tanto, menos contribuyentes a la regulación del sistema eléctrico) como las energías solar y eólica, sólo superada en idoneidad por el hidrógeno. Además, el origen de la biomasa supone una menor repercusión en las fuentes naturales, reduciendo así también el impacto en los ecosistemas que ayudan a absorber las emisiones de CO₂.

Objetivo 9, Industria, Innovación e Infraestructura



Ilustración 32. ODS 9. Fuente: El Faro Luz y Ciencia

El ODS 9 es quizás el objetivo al que más contribuye en teoría el desarrollo de este proyecto. Estando ya encuadrado dentro de una escuela de la economía circular, la ecología industrial, focalizada en compatibilizar la actividad industrial con el resto sectores en un entorno integrado y en sinergia, la idea detrás de este proyecto surgió principalmente para alcanzar las metas de este ODS. Cumple todos los postulados definidos en el Objetivo:

1. Infraestructuras resilientes, con instalaciones de cultivo interior menos sensible al cambio climático por la regulación de las condiciones de cultivo y el consumo optimizado de nutrientes, suelo y agua. Instalaciones industriales con mejor rendimiento energético y aprovechamiento de recursos renovables que hacen menor la dependencia de los combustibles fósiles.
2. Promociona la industrialización inclusiva y sostenible al facilitar el acceso a recursos agrícolas en áreas periurbanas y con peores condiciones tradicionales de cultivo, además de promover la sostenibilidad en el uso de recursos como ha sido descrito en el punto anterior.
3. Fomenta la innovación, siendo un ejemplo de la concentración de prestaciones y servicio de suministro a la sociedad en áreas cada vez menores y con menor dependencia geográfica. La línea de actuación de este tipo de proyectos es seguir desarrollando comunidades productivas con la mayor eficacia posible en el uso de recursos y su reciclaje, imitando los ecosistemas naturales.

Objetivo 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles



Ilustración 33. ODS 11. Fuente: ONU

Una de las principales ventajas de este proyecto de estudio es que contempla la integración de sistemas agrícolas e industriales en la cercanía de los núcleos poblacionales, ya sea por el uso eficiente de la superficie, como por la reducción de costes y transportes de productos agrícolas hasta los consumidores. Los cultivos en invernadero dan acceso a productos perecederos de origen tropical en climas más septentrionales a menor coste ecológico. La reducción de emisiones efectivas y desechos de las explotaciones en los diseños redundan en mejores condiciones

sanitarias en las poblaciones circundantes. El uso eficiente del terreno también crea mayor diversificación y concentración de empleos en la misma superficie al requerir de diferentes perfiles profesionales para su operación, generando mayores oportunidades de desarrollo económico de los asentamientos. El autoabastecimiento de las poblaciones con este modelo de instalaciones reduce la vulnerabilidad ante escasez de suministro exterior.

Objetivo 12, Producción y Consumo Responsables



Ilustración 34. ODS 12. Fuente: IS Global

Este objetivo es otro de los motivos detrás del desarrollo de este proyecto de estudio. El enfoque principal de la sinergia entre la instalación industrial y la agrícola es permitir el acceso a bienes de consumo con el menor impacto ambiental posible. Recursos como las frutas tropicales de importación y los productos fuera de temporada, cuya huella de carbono en relación con otros vegetales es muy superior, suelen ser eliminados en la búsqueda de un consumo responsable.

La creación de los binomios agroindustriales modelados en el estudio puede ser la siguiente alternativa más responsable medioambientalmente, con el aliciente de seguir proporcionando un suministro de productos demandados y por tanto facilitando la acogida por parte de los consumidores y favorecer el crecimiento económico local.

Objetivo 13, Acción por el Clima



Ilustración 35. ODS 13. Fuente: IS Global

El criterio de diseño principal en el estudio y que relaciona ambos tipos de explotación es el uso de las emisiones de dióxido de carbono como recurso productivo en aras de reducir la emisión neta en estas instalaciones y fijar carbono en productos de valor económico claro para la sociedad. La eficiencia en el uso energético y de los recursos naturales mitiga tanto los efectos causantes como los derivados del cambio climático. El uso de biomasa energéticamente es considerado a efecto de huella de carbono neutro si descontamos las emisiones de transporte.

El alto valor económico de algunos productos de invernadero, las posibles subvenciones a las que aplicaría una instalación de estas características y la importancia del sector agrícola de interior en la economía española aumentan su atraktividad ante posibles inversores, agilizando en teoría la celeridad de implantación y la adaptación de instalaciones actuales hacia este modelo.

Objetivo 15, Vida de Ecosistemas Terrestres

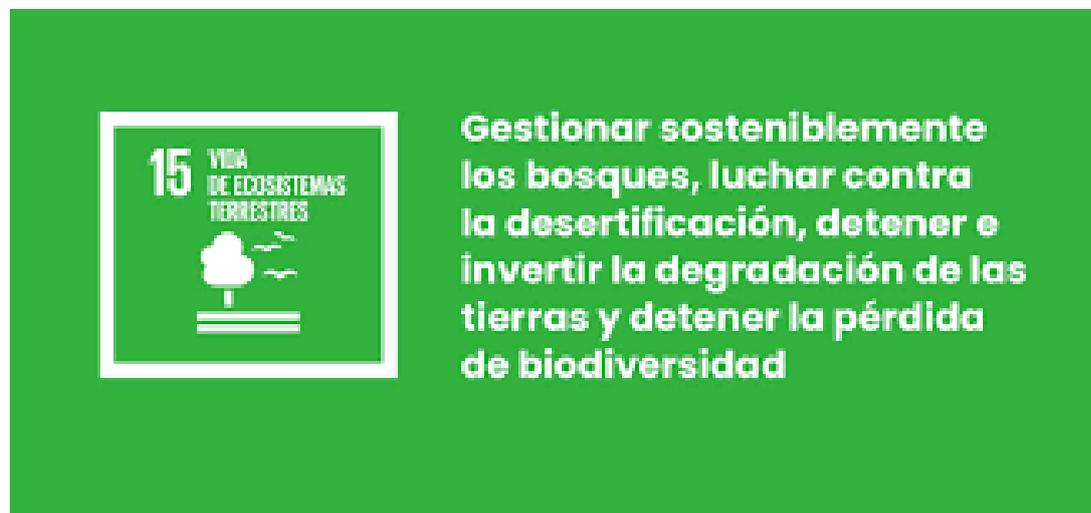


Ilustración 36. ODS 15. Fuente: IS Global

Otra de las repercusiones resultantes de usar terrenos industriales optimizando simultáneamente la producción agrícola es la liberación de suelos fértiles para su conservación o restauración como ecosistemas terrestres. En el caso de cultivos de origen tropical, el efecto beneficioso se multiplica al permitir la conservación de áreas de alta biodiversidad que, por estar situadas mayoritariamente en países en desarrollo, son las que más sufren la deforestación y degradación para fomentar el crecimiento económico. Los recursos hídricos son utilizados de forma más eficiente y por tanto se ejerce menos estrés sobre las cuencas hidrográficas y acuíferos, sumado a la disminución de la erosión en comparativa con los sistemas de cultivo tradicionales, resulta en una disminución en las principales causas de la desertificación. Las centrales de biomasa planteadas en algunos de los diseños son compatibles con la explotación sostenible de recursos forestales, al poder suplementar con los subproductos agrícolas la formación de combustible.

Otros Objetivos de Desarrollo Sostenibles deseables en la implantación de los diseños teóricos

Dada la naturaleza puramente teórica de este estudio, conviene aclarar que, pese a no ser influyentes a la hora de definir los criterios técnicos, hay ODS deseables a la hora de implementar el proyecto.

El **objetivo 2, Hambre Cero**, incluye metas a las que puede contribuir este tipo de diseños, como facilitar una mayor producción de alimentos con menos recursos físicos, a costa de un mayor coste económico de implementación, por lo que es difícilmente aplicable a poblaciones vulnerables con falta de recursos económicos e

inversión responsable. La adecuación estos diseños para soluciones más extrapolables a los entornos de comunidades vulnerables es el mayor desafío no respondido en este estudio.

En esa misma línea el **objetivo 10, Reducción de las Desigualdades**, se ve afectado por los mismo motivos descritos en el anterior párrafo y constituye otro área de mejora no abarcada en este proyecto.

Dentro de los objetivos dependientes del modo de implantación y gestión de los modelos de explotación del estudio, se encuentran los **objetivos 5, Igualdad de Género**; y **8, Trabajo Decente y Crecimiento Económico**. Ambos son objetivos imperativos a la hora de llevar a cabo la contratación de personal para la operación de las explotaciones, pero que se escapan al área de conocimiento desarrollada en este trabajo. El crecimiento económico puede inferirse de adoptar modelos de producción más intensivos y diversificados, contribuyendo a la generación de empleo y de negocio.

DOCUMENTO N°2, ESTUDIO ECONÓMICO

Capítulo V: RESULTADOS

Índice

1.1 RESULTADOS OPERATIVOS	91
1.1.1. Binomio planta de procesamiento en fresco más invernaderos.....	91
1.1.2. Binomio planta de procesamiento de encurtidos más invernaderos	93
1.2 RESULTADOS ECONÓMICOS	95
1.3 CONCLUSIONES	96

1.1 RESULTADOS OPERATIVOS

La restricción principal previamente planteada en el capítulo II, apartado 8.3 es resultante del criterio de nula disipación de calor útil:

$$\dot{Q}_{vnominal} - \dot{Q}_{CCU} \leq \dot{V}$$

Como criterio cualitativo, es preferible operar el máximo de horas posible, pues ayuda a disponer de una producción de CO₂ regularmente, acorde con las necesidades reales de los invernaderos. La evaluación de los 2 diseños de binomio se ha llevado a cabo buscando el BCCHP-ORC más acorde a su operativa.

1.1.1. Binomio planta de procesamiento en fresco más invernaderos

Para cada una de las alternativas se han maximizado las horas de funcionamiento, siendo Q_{CCU} la carga energética flexible a lo largo de la curva de demanda.

Tabla 27. Parámetros técnicos y rendimiento del conjunto energético-agroindustrial con procesamiento de frescos y captura de CO₂.

Instalación		1 MWe	2 MWe	0,6 Mwe
Nº de horas	[h]	6.048,00	3.400,00	7.272,00
ηv_{nom}	[%]	75%	75%	71%
ηe	[%]	14,5%	14,5%	14,0%
E	[MWh]	6.048,00	6.800,00	4.363,20
V_{total}	[MWh]	12.272,46	16.162,12	2.369,39
\dot{V}	[MW]	2,03	4,75	0,33
V_C	[MWh]	2.659,03	6.229,07	426,96
V_H	[MWh]	7.840,74	5.780,33	1.657,79
$V_{total} + Q_{CCU}$	[MWh]	31.282,76	35.172,41	21.379,68
Q	[MWh]	41.710,34	46.896,55	30.285,74
AEP	[%]	-6%	1%	-48%
REE	[%]	23%	25%	16%
$Q_{biom_{ext}}$	[Mwh]	41.472,83	46.659,04	30.048,23
ηt_{real}	[%]	43,92%	48,96%	22,23%
ηv_{real}	[%]	29,42%	34,46%	7,82%

El impacto del sistema de absorción de CO₂ se refleja en el Ahorro de Energía Primaria y en el Rendimiento Eléctrico Equivalente, donde sólo se consigue ahorro en la instalación de 2MW. Se han recalculado los rendimientos térmico y total para visualizar de forma clara el impacto del sistema, con una reducción del más del 50%

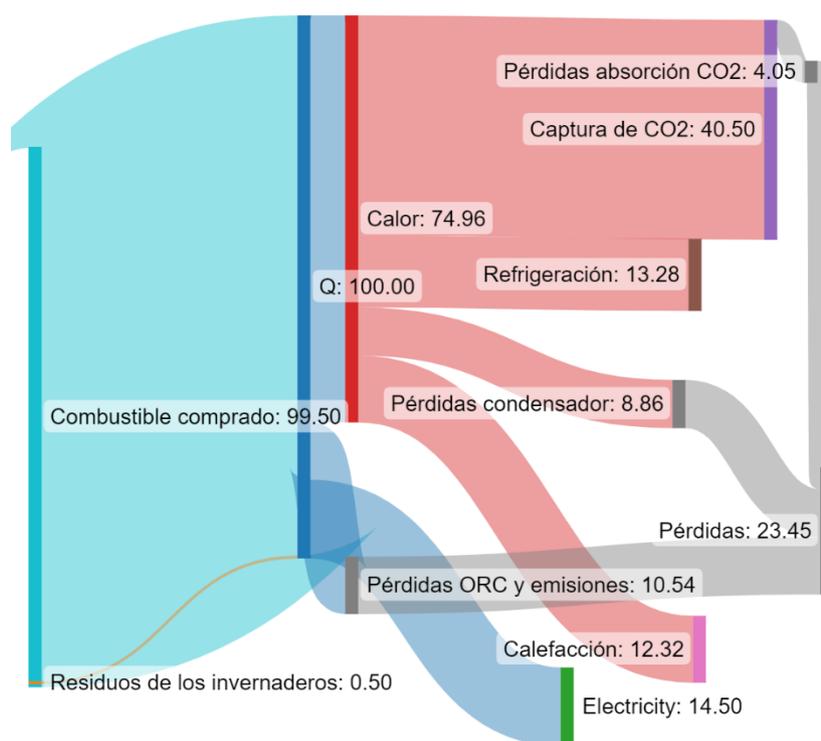
en todos los rendimientos térmicos. El BCCHP-ORC de menor potencia se ve más perjudicado, pues dispone de menos margen de aprovechamiento energético.

Tabla 28. Consumos eléctricos vs generación conjunto planta de frescos + invernaderos

		1 Mwe	2 Mwe	0,6 Mwe
<i>E_{total}</i>	[MWh]	6.048,00	6.800,00	4.363,20
<i>E_{autoconsumo}</i>	[MWh]	4.553,44	2.984,59	4.920,97
% autoconsumo		75%	44%	113%

Se produce compra y venta de energía eléctrica para los tres modelos estudiados, pero sólo la planta de 0,6 MWe tiene un saldo negativo en el cómputo generado vs consumido, necesitando adquirir un 13% de energía eléctrica para suplir la demanda no atendida durante su periodo de funcionamiento.

Para escenificar el flujo de energía porcentual, se adjunta un diagrama Sankey ilustrativo del funcionamiento de BCHP-ORC de 2 MWe.



Made with SankeyMATIC

Ilustración 37. Diagrama Sankey de flujo energético porcentual. Nótese el retorno de subproductos agrícolas del invernadero como combustible y el 40% de la energía invertida en procesar las emisiones. Fuente: propia. Recurso: Sankeymatic

1.1.2. Binomio planta de procesamiento de encurtidos más invernaderos

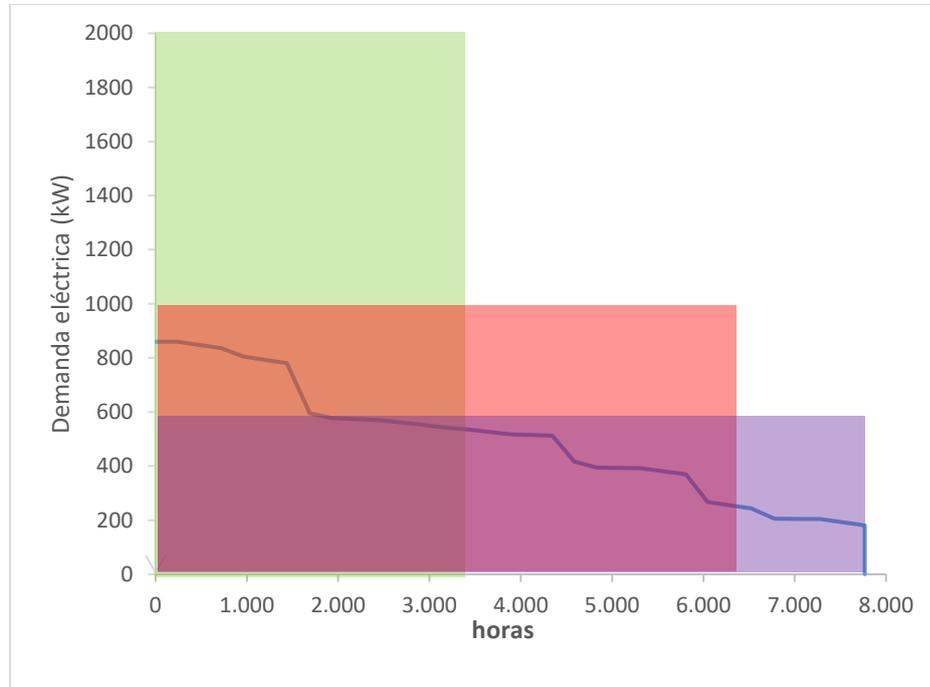
Tabla 29. Parámetros técnicos y rendimiento del conjunto energético-agroindustrial con fabricación de encurtidos y captura de CO₂.

Instalación		1 MWe	2 MWe	0,6 Mwe
Nº de horas	[h]	6.544,00	3.400,00	7.768,00
ηv_{nom}	[%]	75%	75%	71%
ηe	[%]	14,5%	14,5%	14,0%
E	[MWh]	6.544,00	6.800,00	4.660,80
V_{total}	[MWh]	14.837,98	16.162,12	3.827,63
\dot{V}	[MW]	2,27	4,75	0,49
V_C	[MWh]	2.971,22	6.229,07	645,69
V_H	[MWh]	9.885,94	5.780,33	2.751,48
$V_{total} + Q_{CCU}$	[MWh]	33.848,28	35.172,41	22.837,92
Q	[MWh]	45.131,03	46.896,55	32.351,44
AEP	[%]	-1%	1%	-38%
REE	[%]	25%	25%	17%
$Q_{biom_{ext}}$	[Mwh]	44.893,52	46.659,04	32.113,93
ηt_{real}	[%]	47,38%	48,96%	26,24%
ηv_{real}	[%]	32,88%	34,46%	11,83%

La ampliación del periodo productivo y, por tanto, de la demanda, mejora los flujos energéticos. El aumento de las cargas térmicas a potencia media ayuda a las instalaciones menores de 2 MW, dados los 250 kW térmicos de procesos de lavado y calibrado de los encurtidos a lo largo de la temporada de producción de los pepinos. La curva de demanda para un periodo de calefacción, en diciembre, supera la demanda de un periodo estival. En climas mediterráneos, donde los inviernos son notablemente más moderados que los veranos e incide mucha radiación solar durante hasta 16 h en junio, especialmente en zonas más continentales donde no existe la presencia moderadora del mar, es predecible una alta demanda de refrigeración.

En los 6 casos, la capacidad calorífica de los residuos de las explotaciones propias es apenas perceptible en comparación con $Q_{biom_{ext}}$, dejando la puerta abierta a el uso de sistemas de secado con gases de escape o el empleo del calor de media temperatura si se dan periodos de menor aprovechamiento térmico.

Tabla 30. Producción eléctrica a 2 MW, 1 MW y 0,6 MW, evidenciando el sobredimensionamiento eléctrico en los diseños de 1 MW y 2 MW y la predominancia de las cargas térmicas en el sector agroalimentario, en este caso en el conjunto encurtidora/invernadero de pepinos.



El sobredimensionamiento de todos los modelos escogidos para la parte eléctrica invita a estudiar un diseño en el que la instalación de captura de CO₂ sea suministrada, al menos parcialmente, por la potencia eléctrica en excedente. Dadas las altas temperaturas de desorción del MEA, el EER no sería muy alto.

Tabla 31. Consumos eléctricos vs generación conjunto planta de encurtido + invernaderos

		1 Mwe	2 Mwe	0,6 Mwe
<i>E_{total}</i>	[MWh]	6544	6.800,00	4660,8
<i>E_{autoconsumo}</i>	[MWh]	4.670,84	2.944,08	4.954,80
% autoconsumo		71%	43%	106%

La relación entre el total eléctrico generado y el consumido se mantiene con respecto al binomio agroindustrial anterior, con menor necesidad de compra para el modelo de 0,6 MWe.

1.2 RESULTADOS ECONÓMICOS

Para la realización del estudio económico, se procede a evaluar cuál de las tecnologías de centrales de cogeneración de biomasa produciría mejores réditos económicos, y que actividad productiva permite mejores rendimientos.

Tabla 32. Comparativa económica de todos los casos planteados, con inversiones (azul), costes anuales (rojo) e ingresos/ahorros (verde).

	Planta de Frescos + Invernadero			Planta de Encurtidos + Invernadero		
	1 MWe	2 MWe	0,6 MWe	1 MWe	2 MWe	0,6 MWe
INV_p	7.609.155 €	11.533.322 €	3.570.000 €	7.609.155 €	11.533.322 €	3.570.000 €
INV_{CCU}	649.400 €	1.298.800 €	389.640 €	649.400 €	1.298.800 €	389.640 €
INV_c	1.087.233 €	2.546.960 €	174.576 €	1.214.882 €	2.546.960 €	264.012 €
C_M	250.000 €	250.000 €	43.632 €	250.000 €	250.000 €	46.608 €
C_A	60.000 €	60.000 €	60.000 €	60.000 €	60.000 €	60.000 €
C_{bio_{ext}}	674.225 €	758.428 €	488.735 €	729.763 €	758.428 €	522.274 €
C_{bio_{int}}	30.835 €	30.835 €	30.835 €	30.835 €	30.835 €	30.835 €
A_e	1.657.152 €	1.863.200 €	1.195.517 €	1.793.056 €	1.863.200 €	1.277.059 €
A_H	627.259 €	462.427 €	132.623 €	790.875 €	462.427 €	220.118 €
A_c	91.072 €	213.346 €	14.623 €	101.764 €	213.346 €	22.115 €
TIR	14,62%	8,84%	17,51%	17,16%	8,84%	20,37%

Es llamativo que la central con mayor AEP y REE en ambos casos sea la menos rentable. La explicación radica en que su potencia térmica se emplea sobre todo en dar respuesta a los consumos de refrigeración de alta potencia en los invernaderos, menos rentables dada la menor eficiencia particular de las plantas en su generación y la existencia de tecnologías en el mercado con COP > 1, como las bombas de calor.

Los ahorros en energía térmica resultan menores que los eléctricos por 3 causas:

- La inclusión del sistema de captura de CO₂ que consume un 40% de la energía generada.
- El precio del GN para el análisis usado no refleja el alto coste actual en el análisis, mientras que la electricidad, aún teniendo precios por debajo de la media en la eurozona, está referenciada a precios actuales.
- Las restricciones del diseño permitían la sobreproducción en cualquier periodo de energía eléctrica que podía aprovecharse mediante su venta.

1.3 CONCLUSIONES

Energéticamente, el binomio formado por la planta de encurtidos y los invernaderos supera en rendimiento a sus contrapartes del binomio con la planta de frescos. La distribución de la demanda y la falta de requerimiento de refrigeración son la causa de que la sinergia con el invernadero sea mayor. Estas dos magnitudes también dan pie a la mayor rentabilidad de este modelo de ecología industrial.

Todas las propuestas cumplen con los requisitos establecidos en el MITECO para la obtención de ayudas (TIR > 7,09%; mínimo 30 % autoconsumo eléctrico, etc...) menos uno: el ahorro de energía primaria. Dado que el objetivo principal de este estudio era encontrar un aprovechamiento de las emisiones de CO₂ en un contexto agroindustrial, siendo la cogeneración con biomasa simplemente la opción con más sinergias operativas y medioambientales, el rendimiento energético no ha sido optimizado. Actualmente las tecnologías de captura de CO₂ requieren de una alta inversión económica y energética, por lo que se suelen implantar en centrales térmicas de gran potencia, aunque hay una proliferación de adopción de estas tecnologías con perspectiva comercial (BBC, 2017) vendiendo el gas puro a 600 \$/tn en 2017.



Ilustración 38. Extracción de CO₂ con fines comerciales en Suiza. Fuente: BBC, Climeworks

La contraprestación en este diseño viene dada por la elección de la especie comercial, el pepino, dado el bajo potencial energético de sus residuos, además de su factor de alcalinidad que puede afectar a los componentes de la caldera (Oleszek et al, 2015). Su selección permitía usar un cultivo que se beneficiara ampliamente del aporte de CO₂ y las condiciones controladas de invernadero; además de permitir comparar dos industrias alimentarias diferentes y con diferentes patrones de consumo. Como dato adicional, aunque no se haya tenido en cuenta la venta de pepinillos encurtidos conlleva mayor rentabilidad por el valor añadido (CBI, 2015) con precios de hasta 8 €/kg.

Si se considerara la energía térmica empleada en la captura postcombustión, se optaría a las subasta de cogeneración establecidas por el MITECO en los 6 casos operativos diferentes. Dada la mayor rentabilidad por el menor coste de instalación y mayor cobertura horaria, se recomendaría la instalación de cuatrigeneración con 0,6 MWe en una sistema de planta de encurtidos e invernaderos. Es interesante plantear la adopción de sistemas con un mayor potencial sinérgico, en localizaciones climáticas más propicias, con cultivos más energéticos y menor consumo energético en invernadero, como cultivos tropicales; además de explorar más la optimización en detalle de la cogeneración, con la adopción de biogás como combustible, el estudio de funcionamiento a carga parcial y la adopción de otras tecnologías que aprovechen el calor residual de los gases emitidos por la caldera.

BIBLIOGRAFÍA

- Arcos, J. A. (2018) Bajo el primer invernadero de mango. El Agro Auténtico [online] Descargado en: junio 2021. Disponible en: <https://agroautentico.com/2018/01/malaga-mango-aguacate-tropicales-invernadero/>
- Orús, A. (2021). *Tipos de cultivo según la superficie en invernadero en España en 2020*. Statista [online] Descargado en: julio 2021. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/1218414/superficie-agricola-en-invernadero-en-espana-por-tipo-de-cultivo/#statisticContainer>
- Dekan, K. M. (2021). *Industrial ecology*. January.
- Gobierno de España, Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación, Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística (2020) *Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos*
- Pastor, J. N., Marfà, O., & Savé, C. B. R. (2007). *Influencia de la dosis de CO₂ en aire en el cultivo de plantas arbustivas ornamentales cultivadas en contenedor*. 727-731.
- Langreo, A. (2020). *Las frutas y hortalizas en la economía española*. 3.
- Linthicum, K., Los Angeles Times (2019). *La guerra del narco para controlar la multimillonaria industria del aguacate en México*. [online] Descargado en: febrero 2021. Disponible en: <https://www.latimes.com/espanol/mexico/articulo/2019-11-21/mexico-cartel-violencia-aguacates>
- Namesny, A., Tecnología Hortícola (2021). *Aumentos de producción y calidad aplicando CO₂ en el invernadero* [online] Descargado en: marzo 2021. Disponible en: <https://www.tecnologiahorticola.com/aumentos-produccion-calidad-mediante-aplicacion-co2-invernadero/>
- Peterhansel, C. et al. (2010) *Photorespiration*. Arabidopsis Book v.8
- Bassham J., Benson A., Calvin M. (1950) *The path of carbon in photosynthesis*.
- Leakey, A. et al. (March 2006) *Plant Physiology*.
- Faralli, M. et al. (2017). *Rising CO₂ from historical concentrations enhances the physiological performance of Brassica napus seedlings under optimal water supply but not under reduced water availability*. Plant, Cell and Environment.

Urban Solutions (s.f.) [online] Descargado en: marzo 2021. Disponible en: <https://urbancropsolutions.com/>

Bernat Juanos, C., Vitoria, J. J. A., Martínez Ros, J. (1990). *Invernaderos: Construcción, manejo, rentabilidad*.

G. de Opazo, J. (2017) *Agricultura vertical: vegetales a la carta ultra-locales*. La Huerta Digital [online] Descargado en: junio 2021. Disponible en: <https://lahuertadigital.es/agricultura-vertical/>

Planas, O. (2019) *¿Qué es una central térmica? Tipos de plantas termoeléctricas*. Energía solar [online] Descargado en: junio 2021. Disponible en: <https://solar-energia.net/energia-no-renovable/central-termica>

Novagric (2015) *Clima de un Invernadero. ¿Cómo conseguir la Temperatura Ideal?* Novagric [online] Descargado en: julio 2021. Disponible en: <https://www.novagric.com/es/blog/articulos/clima-invernadero-como-conseguir-temperatura-ideal>

(2020) *Tipos de válvulas de control*. Válvulas Arco [online] Descargado en: junio 2021. Disponible en: <https://blog.valvulasarco.com/tipos-de-valvulas-de-control>

Instituto para la Salud Geoambiental (s.f.) *Dióxido de carbono CO₂*. [online] Descargado en: abril 2021. Disponible en: <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2>

El Ágora (2021) *Invernaderos solares: hortalizas con una huella hídrica 20 veces menor*. El Ágora [online] Descargado en: julio 2021. Disponible en: <https://www.elagoradiario.com/agua/invernaderos-hortalizas-huella-hidrica/>

Chardí Puchalt, L.; Clemente Polo, G.; Sanjuán Pellicer, N.; Forero Canto, G. A. (2016) *Huella de carbono generada por el consumo de frutas y verduras en España*. Universitat Politècnica de València

Residuos Profesional (2021) *Un sistema de economía circular convierte emisiones de CO₂ en gas para uso alimentario*. Residuos Profesional [online] Descargado en: junio 2021. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/emisiones-co2-gas-uso-alimentario/>

Universidad Pontificia de Comillas, ICAI (s.f.) *Tema 5.- Cogeneración, Renovables y Ciclos de Potencia Avanzados*. Asignatura de ingeniería energética.

Universidad Pontificia de Comillas, ICAI (s.f.) *Tema 4.- Ciclos de Refrigeración y Bombas de Calor*

Nikolaou, G.; Neocleous, D.; Christou, A.; Polycarpou, P.; Kitta, E.; Katsoulas, N. (2021). *Energy and Water Related Parameters in Tomato and*

Cucumber Greenhouse Crops in Semiarid Mediterranean Regions. A Review, Part I: Increasing Energy Efficiency. Horticulturae 2021, 7, 521. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120521>

Kempkes, F. (2018). *2018 Winter Light Greenhouse harvest: 122 kg cucumbers per square meter.* HortiDaily Fri 14 Dec 2018. Wageningen University & Research, Business Unit Greenhouse Horticulture, Department Greenhouse Technology. <https://www.hortidaily.com/article/9048132/2018-winter-light-greenhouse-harvest-122-kg-cucumbers-per-square-meter/>

Zhi Quan; Caiyan Lu; Yi Shi; Xin Chen; Bin Huang; Yongzhuang Wang; Yajie Zhao; Jian Ma (2015) *Manure increase the leaching risk of soil extractable organic nitrogen in intensively irrigated greenhouse vegetable cropping systems*, Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 65:3, 199-207. Link: <http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2014.990501>

Nurdan Yildirim, Levent Bilir, (2017) *Evaluation of a hybrid system for a nearly zero energy greenhouse*, Energy Conversion and Management, Volume 148, 2017, Pages 1278-1290, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.068>. Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417306131>

Oleszek, M.; Tys, J.; Wiącek, D.; Król, A.; Kuna, J. (2015) *The Possibility of Meeting Greenhouse Energy and CO₂ Demands Through Utilisation of Cucumber and Tomato Residues.* Bioenerg. Res. (2016) 9:624–632. DOI 10.1007/s12155-015-9705-z Link: <https://www.researchgate.net/journal/BioEnergy-Research-1939-1242/publication/287508475> [The Possibility of Meeting Greenhouse Energy and CO₂ Demands Through Utilisation of Cucumber and Tomato Residues/links/5fc1f521458515b7977c7cbc/The-Possibility-of-Meeting-Greenhouse-Energy-and-CO-2-Demands-Through-Utilisation-of-Cucumber-and-Tomato-Residues.pdf](https://www.researchgate.net/publication/287508475)

Martínez, F. (1988) *Fabricación de encurtidos de pepinillo.* MITECO, Centro de Investigaciones Agrarias,(Comunidad Autónoma de La Rioja) Apartado J056. 26080 Logroño. Link: https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1988_06-07.pdf

infoAgro (s.f.) [online]. Descargado en: julio 2022. *Fabricación de encurtidos* Link: https://www.infoagro.com/conservas/fabricacion_encurtidos.htm

Dion, L.; Lefsrud, M.; Orsat, V. (2011) *Review of CO₂ recovery methods from the exhaust gas of biomass heating systems for safe enrichment in greenhouses*, Biomass and Bioenergy, Volume 35, Issue 8, 2011, Pages 3422-3432, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.013>. Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411003370>

BIORAISE. Ceder CIEMAT Link: <http://bioraise.ciemat.es/Bioraise>

Uris, M.; Arenas, E.; Linares, J.I. (2017) *¿Es rentable la biomasa para producir electricidad y climatización centralizada para viviendas en España?* ICAI, Cátedra R. Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas. XVII Semana de la Ciencia de la Comunidad de Madrid.

Link: <https://www.comillas.edu/documentos/catedras/crm/tecnologias20172018.html>

Chunfeng Song; Qingling Liu; Na Ji; Shuai Deng; Jun Zhao; Yang Li; Yutaka Kitamura. (2017) *Reducing the energy consumption of membrane-cryogenic hybrid CO₂ capture by process optimization*, Energy, Volume 124, 2017, Pages 29-39, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.054>.

Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217302281>

Lai, Q., Toan, S., Assiri, M.A. et al. *Catalyst-TiO(OH)₂ could drastically reduce the energy consumption of CO₂ capture*. Nat Commun 9, 2672 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05145-0>

Patricia Luis; (2016) *Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives*; Desalination; Volume 380; 2016; Pages 93-99; ISSN 0011-9164;

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.004>. Link:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001191641500418X>

REE (2022) Link: [REData - No renovables detalle emisiones CO₂ | Red Eléctrica \(ree.es\)](https://www.ree.es/RedData-No-renovables-detalle-emisiones-CO2)

MITECO, (2022) *FACTORES DE EMISIÓN, REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO, COMPENSACIÓN Y PROYECTOS DE ABSORCIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO* julio 2022, versión 22 [INFORMACIÓN COMPLETA PARA LA TOMA DE DECISIONES SOBRE LA SECCIÓN DE PROYECTOS DE ABSORCIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO Y LA SECCIÓN DE COMPENSACIÓN DEL REGISTRO \(miteco.gob.es\)](https://www.miteco.gob.es/informacion-completa-para-la-toma-de-decisiones-sobre-la-seccion-de-proyectos-de-absorcion-de-dioxido-de-carbono-y-la-seccion-de-compensacion-del-registro)

Uris, M.; Linares, J.I.; Arenas, E.; (2017) *Feasibility assessment of an Organic Rankine Cycle (ORC) cogeneration plant (CHP/CCHP) fueled by biomass for a district network in mainland Spain*, Energy, Volume 133, Pages 969-985, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.160>. Link:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217309490>

MITECO (2021) *Propuesta de Orden para el otorgamiento del Régimen Retributivo Específico a instalaciones de cogeneración* Link:

<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-miteco-lanza-las-subastas-para-adjudicar-1.200-mw-de-cogeneraci%C3%B3n-hasta-el-a%C3%B1o-2024/tcm:30-534681>

TRANE *What is a EER: Energy Efficiency Ratio — What is a Good EER Rating for AC?* Link:

<https://www.trane.com/residential/en/resources/glossary/what-is-eer/>

Fuerte, M.; (2021) *¿Qué es COP y EER? Coeficientes de rendimiento y Eficiencia Energética en refrigeración y bomba de calor* Calor y Frio .Link:

<https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/definiciones-cop-y-eer.html#eer>

Precio Gas (2020) Link: <https://preciogas.com/comparador/precios-energias>

BBC, (2017) *La máquina suiza de vanguardia que puede absorber CO2 de la atmósfera y transformarlo en un producto útil.* Link:

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-41997652>

CBI Market Intelligence (2015) CBI Product Factsheet: *Pickled cucumbers and gherkins in Germany* Link: https://www.cbi.eu/sites/default/files/market-information/product-factsheet-germany-pickled-cucumbers-gherkins-2015_redacted.pdf

Cooperativas agro-alimentarias, (2011) *Manual de ahorro y eficiencia energética del sector: Centrales Hortofrutícolas* Link: <https://www.agro-alimentarias.coop/ficheros/doc/03201.pdf>

ENEA, (2013) *Transferring Energy Save Laid on Agroindustry D 4.4: Current process description Fruit & Vegetables Processing Plants*

(English)IEE/12/758/SI2.644752 Link: <http://teslaproject.chil.me/download-doc/63245>