

## Trabajo Fin de Grado

Análisis y diseño de sistemas de poligeneración  
basados en energía solar térmica para el sector  
residencial-comercial

Analysis and design of solar thermal based  
polygeneration systems applied to the residential-  
commercial sector

Autor

Daniel Sierra Diloy

Directores

Miguel Ángel Lozano Serrano  
Luis María Serra de Renobales

Grado en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2022



## Resumen

Este trabajo de fin de grado tiene como objetivo el análisis hora a hora y diseño de varios sistemas de poligeneración que se encargarán de cubrir la demanda de energía (electricidad, refrigeración y calor) de un centro comercial situado en la ciudad de Zaragoza. Todos estos sistemas están basados en aprovechar la radiación solar para la producción de energía térmica.

Se han descrito los sistemas de poligeneración y las tecnologías que utilizan, entre ellas encontramos: colectores solares, sistema de almacenamiento térmico, máquina de refrigeración por absorción, máquina de refrigeración mecánica, sistema de potencia ORC y caldera de condensación. Concretamente se han propuesto tres sistemas que combinan estos equipos para la producción de los servicios energéticos: sistema de refrigeración solar, sistema de refrigeración solar con producción de electricidad y sistema de trigeneración. Para realizar el análisis se han seleccionado equipos comerciales. Se han desarrollado los correspondientes modelos físico-matemáticos que describen su funcionamiento. Además, se ha realizado un estudio de rentabilidad de los sistemas a partir de los costes de los equipos.

Se han obtenido los datos climatológicos hora a hora de la localización utilizando el software METEONORM. Estos datos determinarán el modo de funcionamiento de los colectores y las máquinas de refrigeración. Además, se han tomado los precios de la energía comercial que se consume (electricidad y gas) para calcular el coste de la factura energética. Se ha considerado la demanda hora a hora de los diferentes servicios energéticos del centro comercial para poder dimensionar la instalación.

Para el análisis de los sistemas se ha utilizado el software de optimización LINGO. Este software permite definir una función objetivo a minimizar o maximizar, en este caso será minimizar el coste total de la instalación, teniendo en cuenta el coste de inversión de los equipos y la factura energética. Con la resolución del problema de optimización quedan fijadas las variables libres, como la capacidad a instalar de los equipos y los flujos de energía del sistema. Se impondrán condiciones adicionales a los modelos, como una generación mínima a partir del campo solar o una variación en los precios de la energía para ver cómo afectan a los resultados.

Una vez obtenidas las soluciones se podrán analizar los resultados de la operación del sistema hora a hora, incluyendo el modo de operación de los equipos y los flujos energéticos. Esto permitirá comparar las diferentes configuraciones de equipos y comprobar cuál es la que mejor se adapta a nuestro caso de estudio.

Finalmente se comentan las conclusiones a las que nos llevan los resultados del trabajo. Es complicado que este tipo de sistemas desplacen a otras tecnologías más usadas actualmente, pero hemos comprobado que tienen potencial para ser usados en ciertas circunstancias y como herramienta para afrontar los desafíos energéticos a los que nos enfrentamos.

## Abstract

The objective of this degree project is the hour-by-hour analysis and design of several polygeneration systems that will cover the energy demand (electricity, cooling and heating) of a shopping center located in the city of Zaragoza. All these systems are based on taking advantage of solar radiation for the production of thermal energy.

The polygeneration systems and the involved technologies have been described, including: solar collectors, thermal energy storage system, absorption chiller, mechanical chiller, ORC power system and condensing boiler. Specifically, three systems have been proposed that combine this equipment for the production of energy services: solar cooling system, solar cooling system with electricity production and trigeneration system. To carry out the analysis commercial equipment has been selected. Physical-mathematical models that describe its operation have been developed. In addition, a study of the profitability of the systems has been carried out based on the costs of the equipment.

The climatological data of the location have been obtained hour by hour using the METEONORM software. These data will determine the operating mode of the collectors and chillers. In addition, the prices of the commercial energy consumed (electricity and gas) have been considered to calculate the cost of the energy bill. The hour-by-hour demand of the different energy services of the shopping center has also been considered in order to size the installation.

For the analysis of the systems, the optimization software LINGO has been used. This software allows defining an objective function to minimize or maximize. In this case it will be to minimize the total cost of the installation, considering the investment cost of the equipment and the operation cost. With the resolution of the optimization problem, the values of the design variables are obtained, such as the capacity of the equipment to be installed and the energy flows of the system. Additional conditions will be imposed on the models, such as a minimum generation from the solar field or variation in energy prices to see how this affect the results.

Once the solutions have been obtained, the results of the system's operation hour-by-hour can be analysed, including the mode of operation of the equipment and energy flows. This will make it possible to compare the different configurations of the equipment and check which one best suits our case study.

Finally, are presented and discussed the main conclusions of this work. It is difficult for this type of system to displace other technologies that are currently more widely used, but we have verified that they have the potential to be used in certain circumstances and as a tool to address the energy challenges that we face.

# Índice

1.	Introducción .....	9
1.1.	Objetivo .....	9
1.2.	Contexto .....	9
1.3.	Alcance .....	10
2.	Descripción de los sistemas solares térmicos .....	11
2.1.	Sistema 1. Refrigeración solar .....	11
2.2.	Sistema 2. Refrigeración solar con producción de electricidad .....	12
2.3.	Sistema 3. Trigeneración solar .....	13
3.	Equipos empleados .....	14
3.1.	Colectores solares térmicos .....	14
3.2.	Sistema de almacenamiento de energía térmica.....	15
3.3.	Enfriadora mecánica.....	15
3.4.	Enfriadora de absorción .....	15
3.5.	Sistema de potencia ORC .....	16
3.6.	Caldera de condensación .....	17
4.	Datos horarios .....	17
4.1.	Datos climatológicos .....	17
4.2.	Demandas energéticas.....	18
4.3.	Precios de la energía comercial.....	20
5.	Análisis de los sistemas .....	21
5.1.	Software .....	21
5.2.	Análisis del Sistema 1 .....	22
5.2.1.	Equipos .....	22
5.2.2.	Restricciones del modelo y función objetivo .....	22
5.3.	Resultados del Sistema 1.....	23
5.3.1.	Comparativa de configuraciones.....	23
5.3.2.	Estudio de la configuración 6 .....	25
5.3.3.	Análisis de sensibilidad a los precios de la electricidad .....	27
5.4.	Análisis del Sistema 2 .....	28
5.4.1.	Equipos .....	28
5.4.2.	Restricciones del modelo y función objetivo .....	29
5.5.	Resultados del Sistema 2.....	30
5.5.1.	Comparativa de las configuraciones .....	30
5.5.2.	Análisis de la producción horaria .....	32

5.6.	Análisis del Sistema 3 .....	35
5.6.1.	Equipos .....	35
5.6.2.	Restricciones del modelo y función objetivo .....	35
5.7.	Resultados del Sistema 3.....	36
5.7.1.	Óptimo económico.....	36
5.7.2.	Análisis de sensibilidad a los precios de la electricidad .....	38
5.7.3.	Comparativa Sistema 3 vs Sistema 2 + Caldera.....	39
6.	Conclusiones.....	40
7.	Bibliografía .....	42
	ANEXO I: Equipos utilizados .....	44
	ANEXO II: Demandas energéticas .....	50

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema del Sistema 1	12
Figura 2. Esquema del Sistema 2	13
Figura 3. Esquema del Sistema 3	13
Figura 4. Esquema de ciclo de refrigeración por absorción [9]	16
Figura 5. Datos climatológicos de la ciudad de Zaragoza	18
Figura 6. Demanda de Refrigeración en Día Laborable	18
Figura 7. Demanda de Refrigeración en Día Festivo	19
Figura 8. Demanda de Electricidad	19
Figura 9. Demanda de calor	19
Figura 10. Temporadas de la tarifa 3.0TD [14]	20
Figura 11. Discriminación horaria en la tarifa 3.0TD [14]	21
Figura 12. Coste total para las seis configuraciones	24
Figura 13. Flujos anuales de calor solar en la Configuración 6	25
Figura 14. Factor de utilización de los equipos en la Configuración 6	26
Figura 15. Costes unitarios de la producción de frío en la Configuración 6	27
Figura 16. Sensibilidad al precio de la electricidad en la Configuración 6	28
Figura 17. Coste total para las tres configuraciones	30
Figura 18. Costes de la configuración 3	31
Figura 19. Capacidad instalada de los equipos para la Configuración 3	31
Figura 20. Factor de utilización de los equipos para la Configuración 3	32
Figura 21. Gráfica de área apilada de demanda y producción de electricidad (FA=50%)	33
Figura 22. Carga de potencia del ORC	33
Figura 23. Flujos horarios de calor solar en julio	34
Figura 24. Flujos horarios de calor solar en diciembre	35
Figura 25. Costes del Sistema 3	36
Figura 26. Factor de utilización de los equipos para el Sistema 3	37
Figura 27. Sensibilidad al precio de la electricidad para el Sistema 3	38
Figura 28. Esquema de funcionamiento del Sistema 2 + Caldera	39
Figura 29. Esquema de colector de placa plana	45
Figura 30. Esquema de colector cilindro-parabólico	45

## Índice de tablas

Tabla 1. Modelos de colectores _____	14
Tabla 2. Demandas del centro comercial _____	20
Tabla 3. Precios en los periodos de la tarifa 3.0TD _____	21
Tabla 4. Configuraciones del Sistema 1 _____	22
Tabla 5. Coste de inversión de los equipos del Sistema 1 _____	23
Tabla 6. Capacidad instalada de colectores y acumulador para las 6 configuraciones _____	24
Tabla 7. Capacidad instalada de los equipos con distintos precios de la electricidad en la Configuración 6 _____	28
Tabla 8. Configuraciones del Sistema 2 _____	29
Tabla 9. Coste de inversión de los equipos del Sistema 2 _____	29
Tabla 10. Capacidad instalada de los equipos para la configuración 3 (FA=50%) _____	32
Tabla 11. Configuración del Sistema 3 _____	35
Tabla 12. Coste de inversión de los equipos del Sistema 3 _____	36
Tabla 13. Capacidad instalada de los equipos para el Sistema 3 _____	37
Tabla 14. Potencia instalada según el precio de la electricidad _____	38
Tabla 15. Comparativa de costes Sistema 3 vs Sistema 2 + Caldera _____	39
Tabla 16. Capacidad instalada Sistema 3 vs Sistema 2 + Caldera _____	40
Tabla 17. Flujos de calor del Sistema 3 _____	40
Tabla 18. Datos de los colectores HTH y TVP _____	46
Tabla 19. Datos del colector NEP _____	47
Tabla 20. Datos del colector SKY _____	47
Tabla 21. Datos de la enfriadora mecánica _____	48
Tabla 22. Datos de las enfriadoras de absorción _____	48
Tabla 23. Datos de los equipos ORC _____	48
Tabla 24. Datos de la caldera _____	49
Tabla 25. Demanda de Frío para Día Laborable [kWh] _____	50
Tabla 26. Demanda de Frío para Día Festivo [kWh] _____	50
Tabla 27. Demanda de Electricidad para Día Laborable [kWh] _____	51
Tabla 28. Demanda de Electricidad para Día Festivo [kWh] _____	51
Tabla 29. Demanda de Calor para Día Laborable [kWh] _____	52
Tabla 30. Demanda de Calor para Día Festivo [kWh] _____	52

# 1. Introducción

## 1.1. Objetivo

Uno de los objetivos de este trabajo es obtener una visión global acerca de los sistemas de poligeneración, empezando por comprender cuál es su lugar para el suministro de energía térmica y eléctrica en el sector residencial-comercial. Se estudiarán las tecnologías que utilizan y qué uso hacer de ellas para conseguir los objetivos de diseño.

En el ámbito ingenieril esto requiere conocer las particularidades de este tipo de sistemas y crear una metodología que sirva como herramienta para diseñar y dimensionar instalaciones para cualquier tipo de edificio. Esta metodología utiliza el software de optimización LINGO para realizar una simulación hora a hora del funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta los datos de los equipos que se utilizan, la demanda a cubrir, la climatología de la zona y los precios de la energía comercial consumida. Además, como ejemplo, se han propuesto tres sistemas hipotéticos en los que se aplicará este método y se comprobarán los diferentes análisis que podemos realizar.

Tras el análisis de los resultados, se pretende la obtención de conclusiones que nos permitan alcanzar un mayor conocimiento acerca del funcionamiento de este tipo de sistemas y nos faciliten la toma de decisiones a la hora de diseñar y dimensionar nuevos sistemas.

## 1.2. Contexto

El consumo de energía mundial está aumentando, y se prevé que lo siga haciendo debido al aumento per cápita de las necesidades de productos y servicios (transporte, alimentación, climatización...) y al crecimiento de la población mundial. Sin embargo, el aumento del consumo de energía conlleva una serie de desafíos como el agotamiento de los recursos de combustibles fósiles, el calentamiento global o el aumento de precios de la electricidad [1]. Es por esto por lo que resulta necesario utilizar sistemas eficientes y que hagan uso de energías renovables y sostenibles. Tal y como se estableció en el Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020, el gobierno español se marcó como objetivo que en el año 2020 el 20% de la energía final bruta procediese de fuentes renovables [2].

La poligeneración consiste en la producción simultánea de dos o más servicios energéticos a través de un sistema integrado energéticamente que puede incluir diversas tecnologías. Los componentes típicos de estos sistemas son un motor térmico, un generador eléctrico, un sistema de recuperación de calor y tecnologías que aprovechen ese calor [3]. Entre los productos que podemos obtener con estos sistemas se encuentran: electricidad, calefacción, agua caliente sanitaria, refrigeración, agua dulce a partir de agua salada, etc. Para la obtención de estos productos los sistemas de poligeneración utilizan diferentes fuentes de energía como pueden ser combustibles fósiles, energía solar, energía geotérmica, energía eólica, biomasa..., o una combinación de varias de estas fuentes. Además, estos sistemas suelen presentar una alta eficiencia

energética al aprovechar recursos que otros sistemas desecharían, como el calor excedente de procesos industriales.

Las características de estos sistemas los hacen especialmente indicados para su aplicación en el sector industrial y en el residencial-comercial, pudiendo conseguirse menores costes de producción, mayor eficiencia energética, ahorro en el consumo de energía primaria y una reducción en las emisiones contaminantes. Por otro lado, para aprovechar las ventajas de este tipo de sistemas, se requiere un buen diseño y dimensionado de los equipos e instalaciones. Esto es debido a que a menudo los sistemas de poligeneración presentan mayor complejidad que otros sistemas convencionales debido a la interdependencia entre las diferentes fuentes de energía disponibles y los diferentes productos que cubren las demandas del consumidor [4].

La energía solar es una de las fuentes de energía renovable que pueden utilizarse para accionar este tipo de sistemas. Se pueden utilizar principalmente dos tecnologías para aprovechar esta energía, la solar fotovoltaica y la solar térmica. La primera transforma la radiación solar en electricidad utilizando células fotovoltaicas. La energía solar térmica utiliza la radiación solar para aumentar la temperatura de un medio material, que posteriormente se puede aprovechar para generar electricidad o suministrar calor. Aunque en las últimas décadas la energía fotovoltaica ha sido la más desarrollada tecnológicamente, en los últimos años se está incrementando la instalación de sistemas solares térmicos. Esto responde a varios factores como son la mayor eficiencia a la hora de aprovechar la energía solar (la térmica puede tener una eficiencia superior al 70% mientras que la fotovoltaica alcanza valores en torno al 20%), y unos costes de los equipos cada vez menores debido a las economías de escala derivadas de una mayor producción de equipos. Además, la capacidad de almacenamiento de energía térmica es muy superior al de energía eléctrica. Se estima que la capacidad de almacenamiento aparejada a sistemas térmicos solares en Europa es de 190 GWh, mientras que la capacidad de almacenamiento para energía eléctrica es de 8 GWh [5]. Esto significa una capacidad de almacenamiento 20 veces mayor en los sistemas térmicos, lo que mejora la flexibilidad de la producción energética.

La capacidad térmica solar acumulada en operación a finales de 2021 fue de 522 GWth correspondientes a 746 millones de m<sup>2</sup> de área de colector. El mercado de energía solar térmica creció un 3% respecto al año 2020. A finales de 2021, estaban en operación 530 sistemas solares térmicos a gran escala (> 350 kWth; 500 m<sup>2</sup>) conectados a redes de calefacción urbana, así como a zonas residenciales, comerciales y edificios públicos. La capacidad total instalada de estos sistemas es de 1.970 MWth (2,8 millones de m<sup>2</sup>). Al menos 78 sistemas de producción de calor solar para aplicaciones industriales se pusieron en funcionamiento en 2021, por lo que el número de proyectos en operación suma al menos 975 con un área de colectores de 1,23 millones de m<sup>2</sup> [6].

### 1.3. Alcance

Este trabajo pretende ampliar y completar el análisis de algunos de los sistemas de refrigeración solar propuestos en el apartado 4 del artículo *Thermal integration in polygeneration energy systems for buildings* [7]. Normalmente en zonas con altos niveles de radiación solar a lo largo del año y en determinados grandes edificios suele existir una elevada demanda de refrigeración. Debido a esta correlación, la utilización

de los sistemas de poligeneración basados en energía solar para la refrigeración de edificios constituye una de las aplicaciones potenciales de la energía solar térmica.

El artículo mencionado propone algunos sistemas de poligeneración que integran diferentes equipos de la forma más conveniente para poder cumplir los objetivos de diseño. Esto se consigue seleccionando tecnologías que se utilizan de forma comercial en la actualidad y teniendo en cuenta, tanto las características técnicas y limitaciones de capacidad de los equipos, como los costes económicos que suponen los equipos y las fuentes de energía comercial. Los tres sistemas que se estudian están descritos en el apartado 2 de esta Memoria.

Se propone un caso práctico en el que se encontrarán los sistemas más convenientes para cubrir la demanda de refrigeración de un centro comercial localizado en la ciudad de Zaragoza. Este tipo de edificios presenta una alta ocupación y poca ventilación natural, lo que conlleva que hagan uso de la refrigeración durante casi todo el año.

Se va a realizar un análisis anual hora a hora de la operación de los sistemas utilizando el software de optimización LINGO. Este software, utilizará las variables hora a hora que intervienen en el sistema para buscar la solución óptima. Esta solución óptima dependerá del objetivo que se quiera alcanzar. Además, se impondrán una serie de restricciones, que corresponderán tanto a la operación de los equipos como a imposiciones para que el sistema diseñado satisfaga algún criterio específico.

Para poder realizar el análisis del sistema son necesarios los modelos que describen el comportamiento de los equipos frente a las diferentes condiciones, que variarán hora a hora. La descripción de los equipos que se han seleccionado y los modelos utilizados están desarrollados en el apartado 3. Por otro lado, para poder simular y dimensionar el sistema, es necesario conocer las demandas energéticas del centro comercial, las condiciones climáticas que determinarán el funcionamiento de los equipos y los precios de la energía comercial que se consume. Por ello, son necesarios todos estos datos para cada una de las 8760 horas del año, como se comenta en profundidad en el apartado 4.

Teniendo en cuenta toda esta información en los modelos de optimización desarrollados, el software LINGO obtendrá unos resultados que permitirán dimensionar las diferentes configuraciones de las instalaciones y comprobar su funcionamiento hora a hora. Además, se podrán variar las restricciones establecidas para comparar diferentes modos de operación de nuestros sistemas y decidir cuál de ellos se adapta mejor a las necesidades de consumo. En el apartado 5, se detallarán estos resultados, tratando de destacar la información más relevante y los análisis que se pueden hacer con la solución hora a hora. Finalmente, en el apartado 6 se expondrán las conclusiones del trabajo.

## 2. Descripción de los sistemas solares térmicos

### 2.1. Sistema 1. Refrigeración solar

Este sistema solo atiende la demanda de refrigeración del centro comercial. El sistema consta de los siguientes equipos:

- Campo de colectores solares (COL)

- Sistema de almacenamiento de energía térmica (ACU)
- Enfriadora de absorción (RABS)
- Enfriadora mecánica (RMEC)

En la Figura 1 se ilustra el esquema de funcionamiento con la disposición de los equipos y los flujos energéticos.

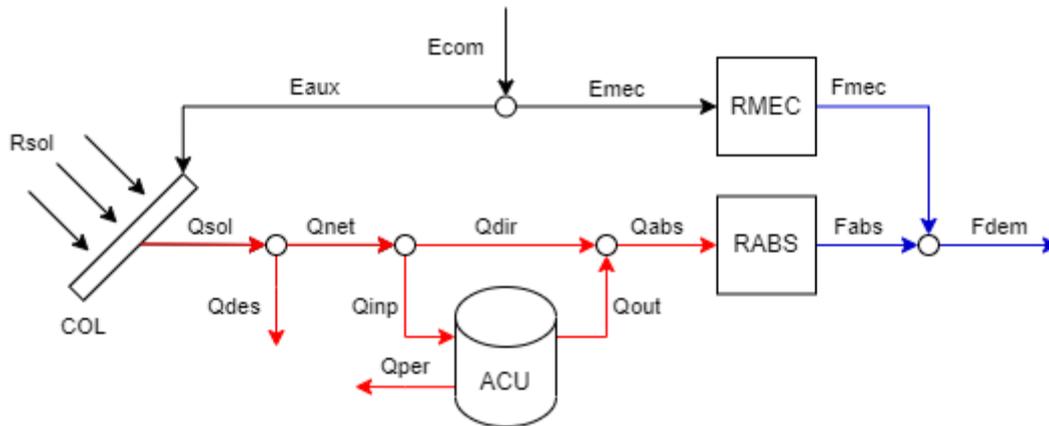


Figura 1. Esquema del Sistema 1

La demanda de frío se puede cubrir con el funcionamiento de la enfriadora mecánica, que consume electricidad de la red, o con la producción de la enfriadora de absorción que consume la energía térmica que proviene de los colectores solares y el acumulador. El campo de colectores solares presenta un pequeño consumo de energía eléctrica para funcionar ( $E_{aux}$ ).

El acumulador puede cargarse con la energía térmica que proviene de los colectores para utilizarla más adelante. Presenta unas pérdidas ( $Q_{per}$ ) que son proporcionales a la energía térmica que acumula en ese momento y al calor descargado hacia la enfriadora de absorción ( $Q_{out}$ ). El calor que no pueda ser aprovechado por la enfriadora y tampoco dirigirse al acumulador, cuando este se encuentre al máximo de carga, será despilfarrado ( $Q_{des}$ ).

## 2.2. Sistema 2. Refrigeración solar con producción de electricidad

En este sistema de cogeneración solar se atiende la demanda de refrigeración y la demanda de electricidad del centro comercial. Para ello se utilizan los siguientes equipos:

- Campo de colectores solares (COL)
- Sistema de almacenamiento de energía térmica (ACU)
- Planta de potencia ORC (ORC)
- Enfriadora mecánica (RMEC)

En la Figura 2 se muestra el esquema de funcionamiento con la disposición de los equipos y los flujos energéticos.

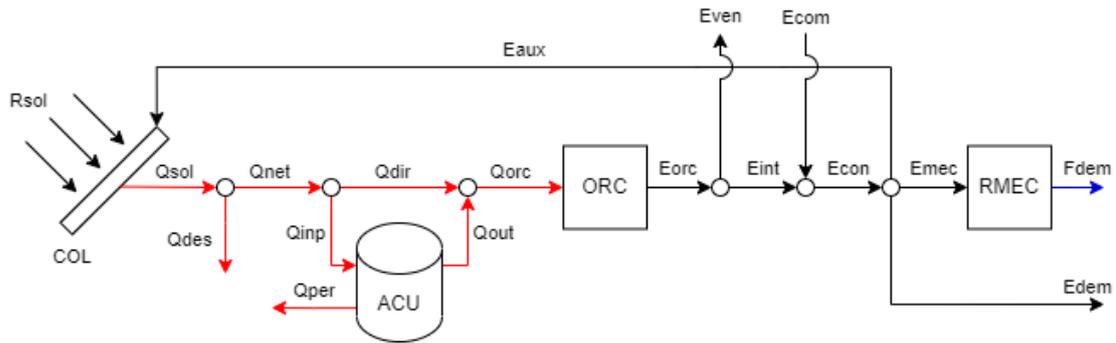


Figura 2. Esquema del Sistema 2

En este sistema, el ciclo ORC genera electricidad ( $E_{orc}$ ) a partir de la energía térmica proveniente de los colectores solares y el acumulador ( $Q_{orc}$ ). Esta electricidad generada se destina a cubrir la demanda de electricidad y refrigeración, accionando la enfriadora mecánica, y si existen excedentes de producción se venden a la red. La enfriadora mecánica puede funcionar tanto con la electricidad generada por el ciclo de potencia ( $E_{int}$ ) como con la electricidad tomada de la red ( $E_{com}$ ).

El acumulador funciona de la misma manera que en el Sistema 1. El campo solar también presenta un pequeño consumo de energía eléctrica para funcionar ( $E_{aux}$ ), en este caso la electricidad puede provenir de la que se genera en el ciclo ORC.

### 2.3. Sistema 3. Trigeneración solar

Este sistema de trigeneración solar cubre la demanda de refrigeración, electricidad y calor del centro comercial. El sistema está compuesto por los siguientes equipos:

- Campo de colectores solares (COL)
- Sistema de almacenamiento de energía térmica (ACU)
- Planta de potencia ORC con cogeneración de calor (ORC)
- Enfriadora mecánica (RMEC)
- Caldera de condensación (CALD)

En la Figura 3 aparece el esquema de funcionamiento con la disposición de los equipos y los flujos energéticos.

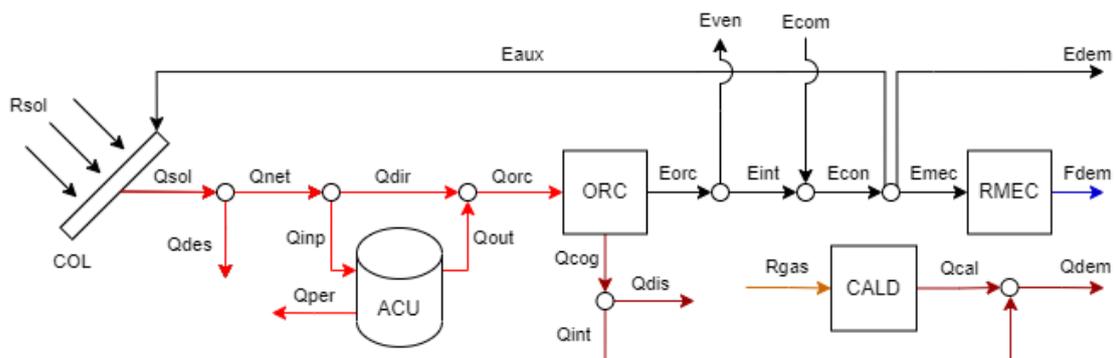


Figura 3. Esquema del Sistema 3

En este sistema el ciclo ORC produce electricidad ( $E_{orc}$ ) y calor ( $Q_{cog}$ ). La electricidad generada tiene el mismo destino que en el sistema 2: cubre la demanda de

electricidad (Edem), alimenta a la enfriadora mecánica y a los colectores, y está conectada a la red para poder vender los excedentes (Edem). El calor cogenerado se utiliza para cubrir la demanda de calor del centro comercial (Qdem). Además, se instala una caldera de condensación de gas que cubrirá la demanda de calor cuando el calor cogenerado no sea suficiente.

### 3. Equipos empleados

Para componer estos sistemas se han utilizado diferentes tecnologías y equipos capaces de generar los servicios energéticos deseados. Entre ellos se encuentran:

#### 3.1. Colectores solares térmicos

Los colectores solares térmicos son equipos diseñados para transformar la radiación solar en energía térmica al elevar la temperatura de un medio, normalmente un fluido térmico. Existen diferentes tipos de colectores (colector solar plano, colector de tubo de vacío, colector cilindro-parabólico, campo de heliostatos...). Cada uno de estos tipos de es capaz de trabajar dentro de un rango de temperaturas del fluido térmico, que limitará los usos que se le pueda dar a la energía térmica obtenida.

Colector	Modelo	Tipo de colector	Tipo de colector
HTH	HT-SolarBoost 35/10	Flat Plate Collector (FPC)	Colector placa plana
TVP	TVP Solar MT-Power v4	Evacuated Flat Plate Collector (EFPC)	Colector placa plana al vacío
NEP	PolyTrough 1800	Parabolic Trough Collector (PTC)	Colector cilindro parabólico
SKY	SkyTrough	Parabolic Trough Collector (PTC)	Colector cilindro parabólico

Tabla 1. Modelos de colectores

Se han seleccionado varios equipos comerciales que corresponden a diferentes tipos de colectores solares y funcionan a diferentes temperaturas (véase la Tabla 1). Para cada uno de estos equipos es necesario conocer cuál es su producción térmica a partir de los datos de sus dimensiones físicas, lugar de instalación, y orientación relativa al sol. Para calcular la producción de calor por unidad de superficie se puede tomar la expresión que es de aplicación general (1) [8].

$\frac{\dot{Q}_u}{A} = \eta_{0b} \cdot [K_b(\theta) \cdot G_b + K_d \cdot G_d] - a_1(t_m - t_a) - a_2(t_m - t_a)^2$		(1)
$\dot{Q}_u$ [W]	Flujo de calor útil	
$A$ [m <sup>2</sup> ]	Superficie del colector	
$\eta_{0b}$	Rendimiento del colector	
$K_b(\theta)$	Modificador del ángulo de incidencia para radiación directa	
$G_b$ [W/m <sup>2</sup> ]	Radiación solar directa	
$K_d$	Modificador del ángulo de incidencia para radiación difusa	
$G_d$ [W/m <sup>2</sup> ]	Radiación solar difusa	
$a_1$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]	Coeficiente pérdidas de calor	
$a_2$ [W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )]	Coeficiente pérdidas de calor	
$t_m$ [K]	Temperatura media del fluido térmico	
$t_a$ [K]	Temperatura ambiente	

Conociendo los datos técnicos de los equipos, su orientación, y teniendo los datos climáticos de radiación solar y temperatura en el lugar de instalación, se determina la producción térmica por unidad de superficie colectora.

### 3.2. Sistema de almacenamiento de energía térmica

Los sistemas de almacenamiento de energía térmica pueden utilizarse para almacenar calor o frío con la posibilidad de aprovecharlo en otro momento. Pueden utilizar varios mecanismos para acumular energía, siendo uno de ellos el de calor sensible. En este caso el sistema acumula energía al elevar o disminuir la temperatura de un medio (agua, aceite, sales fundidas, lecho de rocas...). En nuestro caso se emplea como medio el mismo fluido térmico utilizado en el campo solar.

En el caso de este trabajo se va a utilizar el acumulador para almacenar la energía térmica proveniente de los colectores solares, a una temperatura de almacenamiento adecuada que es función del colector utilizado. Además, se debe tener en cuenta que estos sistemas tienen pérdidas al producirse transferencia de calor con el ambiente.

### 3.3. Enfriadora mecánica

La enfriadora mecánica permite transferir energía en forma de calor desde un cuerpo frío a un cuerpo caliente, consumiendo para ello trabajo exterior. En este caso el trabajo lo produce un motor eléctrico. La enfriadora mecánica opera un ciclo de refrigeración por compresión. Este ciclo se sirve de la capacidad de algunos fluidos denominados refrigerantes, para intercambiar calor con el cuerpo frío en el evaporador, y con el cuerpo caliente en el condensador. Esto se realiza variando la presión del fluido con un compresor, que es el que consume el trabajo exterior, y una válvula de expansión.

### 3.4. Enfriadora de absorción

Este tipo de enfriadoras basan su funcionamiento en el ciclo de refrigeración por absorción. Estos ciclos tienen características similares a los ciclos con compresión de vapor pero difieren en dos aspectos importantes. En lugar de comprimir el vapor entre el evaporador y el condensador, en el ciclo de absorción el refrigerante es absorbido por una sustancia secundaria llamada absorbente para formar una solución líquida. Esta solución se comprime hasta alta presión. Debido a que el volumen específico medio de la solución es mucho menor que el de vapor de refrigerante, el trabajo necesario para comprimirla es significativamente menor.

La otra diferencia entre los sistemas de refrigeración por absorción y los de compresión de vapor es que en los primeros se debe introducir un medio para recuperar el refrigerante vapor a partir de la solución líquida antes de que el refrigerante entre en el condensador. Esto supone transferir calor desde una fuente a temperatura relativamente alta [9].

En la Figura 4 se muestra el esquema con los componentes de un sistema de refrigeración por absorción. El refrigerante pasa a través del condensador, la válvula de expansión y el evaporador en la misma secuencia que en un sistema con compresión de vapor. El compresor es sustituido por el conjunto absorbedor, bomba, generador y

válvula que aparecen en la parte derecha del diagrama. En el absorbedor el absorbente absorbe el refrigerante vapor que viene del evaporador. A continuación, la solución rica sale del absorbedor y aumenta su presión en la bomba. En el generador, el calor transferido desde una fuente a una temperatura relativamente alta hace que el refrigerante vapor salga de la solución, dejando una solución pobre en el generador. El vapor liberado pasa al condensador y la solución pobre restante fluye a través de la válvula hacia el absorbedor para continuar el ciclo. El trabajo consumido es solamente el necesario para operar la bomba, que es pequeño en comparación con el que se necesita para comprimir un refrigerante vapor entre los mismos niveles de presión.

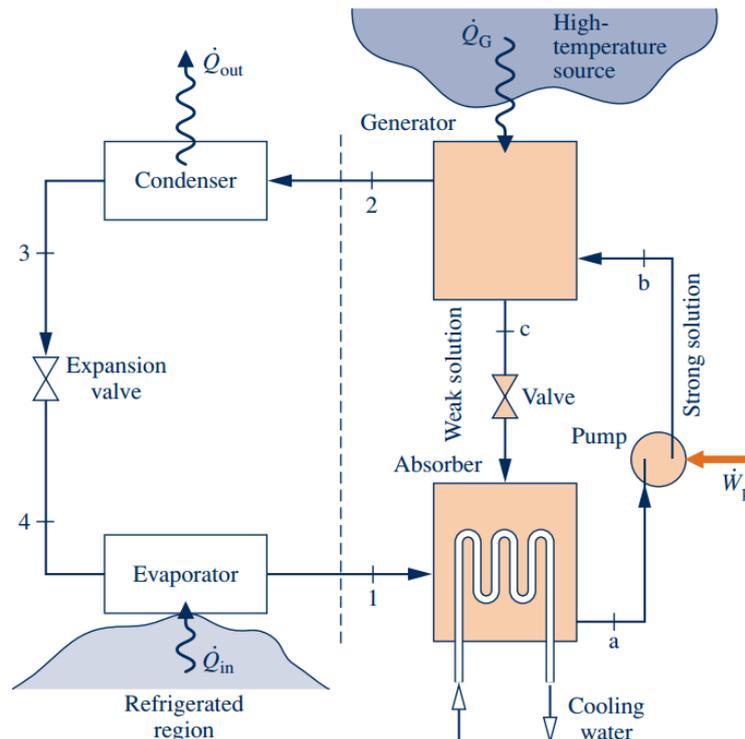


Figura 4. Esquema de ciclo de refrigeración por absorción [9]

Si la fuente de calor tiene una temperatura suficientemente elevada, es posible utilizar enfriadoras con más de un generador. En este caso se estaría hablando de enfriadoras por absorción de doble o triple efecto. Estas enfriadoras presentan un mayor rendimiento.

### 3.5. Sistema de potencia ORC

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico de potencia que convierte calor en trabajo. Un ORC (del inglés, Organic Rankine Cycle) es un ciclo Rankine que utiliza como fluido de trabajo un aceite o fluido orgánico en vez de agua. Este fluido tiene una elevada masa molecular y temperaturas de ebullición más bajas que el agua.

Para incrementar la eficiencia del ciclo ORC se pueden utilizar las mismas estrategias que en un ciclo Rankine convencional como por ejemplo la regeneración o el precalentamiento. En el sistema 2 utilizaremos este ciclo para la producción de electricidad. En el sistema 3 el ciclo ORC será de cogeneración produciendo electricidad y calor útil.

### 3.6. Caldera de condensación

Estos equipos se utilizan para la producción de calefacción o ACS al quemar combustible, en este caso gas natural, en la cámara de combustión. Mediante intercambiadores se transmite la energía al fluido que transportará el calor.

Se puede encontrar una descripción más detallada acerca de las características de los equipos y los modelos que describen su funcionamiento en el Anexo I.

## 4. Datos horarios

### 4.1. Datos climatológicos

Para realizar el estudio de los sistemas son necesarios los datos climatológicos de la localidad de instalación, en nuestro caso la ciudad de Zaragoza. Hemos utilizado el software comercial METEONORM [10], que proporciona datos climatológicos de prácticamente todos los lugares del mundo. METEONORM es una herramienta ampliamente utilizada para aplicaciones que requieran información meteorológica tales como investigación ambiental, diseño de edificios, agricultura, silvicultura, sistemas energéticos y especialmente sistemas solares térmicos y fotovoltaicos.

El software posee una base de datos que recoge la información de más de 8000 estaciones meteorológicas alrededor del mundo. A partir de estos datos junto a modelos de interpolación, es capaz de generar un año tipo con más de 30 parámetros meteorológicos. Estos años tipo no son un año histórico real ni una media de un cierto periodo, sino que representan los datos que se podrían dar en un año hipotético en la ubicación que hayamos seleccionado. El software permite la salida de datos en múltiples formatos. En nuestro caso utilizaremos una hoja Excel que recoja los datos hora a hora para un año tipo en la ciudad de Zaragoza.

Para los casos de este trabajo, los datos climatológicos son especialmente importantes ya que determinan el funcionamiento de los equipos que estamos utilizando, especialmente los colectores solares y las enfriadoras. Los datos que se necesitan principalmente son los de temperatura, posición solar y radiación solar (véase la Figura 5).

	A	B	C	D	E	J	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
1	Zaragoza SP																	
2	Latitude	41.65	°	-0.9														
3																		
4	Año	Mes	Día del mes	Hora	Hora del año	Temp. aire seco, °C	Elevación solar	Azímüt solar	Rad. extraterrestre, W/m2	Rad. Dir. Normal, W/m2	Rad. Global Horiz., W/m2	Rad. Dir. Horiz., W/m2	Rad. Dif. Horiz., W/m2	Rad. Global Incl., W/m2	Rad. Dif. Incl., W/m2	Rad. Global 2 ejes, W/m2	Rad. Global 1 eje, W/m2	
5	y	m	dm	h	hy	Ta	hs	Az	G_Gex	G_Bn	G_Gh	G_Bh	G_Dh	G_Gk	G_Dk	G_Gn2	G_Gn1	
6	2005	1	1	1	1	12.1		0	-154.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	2005	1	1	2	2	11.6		0	-163.3	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	2005	1	1	3	3		11	0	-130.2	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	2005	1	1	4	4	10.7		0	-110.4	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	2005	1	1	5	5	10.4		0	-97.3	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	2005	1	1	6	6	10.1		0	-87.1	0	0	0	0	0	0	0	0	
12	2005	1	1	7	7	9.9		0	-77.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	2005	1	1	8	8	9.7		0	-68.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
14	2005	1	1	9	9	9.7		0	-59.2	19	0	3	0	3	2	2	-1	3
15	2005	1	1	10	10	11.3	8.2	-48.5	201	361	108	51	56	270	93	501	108	
16	2005	1	1	11	11	13	15.8	-37.1	385	556	221	152	69	485	116	711	448	
17	2005	1	1	12	12	14.8	21.5	-23.5	518	716	337	263	74	691	127	875	482	
18	2005	1	1	13	13		16	24.7	591	686	375	287	88	735	147	860	402	
19	2005	1	1	14	14	16.8	25.1	5.6	598	550	367	233	133	670	195	765	377	
20	2005	1	1	15	15	16.9	22.5	20.5	540	310	267	119	148	443	192	513	315	
21	2005	1	1	16	16	16.6	17.3	34.2	419	307	197	91	106	354	140	465	311	
22	2005	1	1	17	17	15.9		10	46.3	245	175	105	30	74	198	105	311	105
23	2005	1	1	18	18	14.7	1.2	57.1	43	0	2	0	2	1	1	-1	2	
24	2005	1	1	19	19	14		66.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 5. Datos climatológicos de la ciudad de Zaragoza

## 4.2. Demandas energéticas

Para realizar el análisis de los sistemas solares térmicos y poder dimensionar los equipos es necesario conocer las demandas energéticas a cubrir. En el caso de estudio, las demandas a satisfacer son las de refrigeración, electricidad y calor. Además de los valores anuales son necesarios los valores hora a hora de las demandas a lo largo del año.

El centro ubicado en la ciudad de Zaragoza tiene una superficie comercial de 35.000 m<sup>2</sup> y un aforo máximo para 3.500 personas. Está ocupado durante 18h al día, 12h de ellas abierto al público (de 09 a 21h) y el resto para servicios y suministros (de 06 a 09h y de 21 a 24h) [11].

Para la demanda de refrigeración se ha considerado que está distribuida por meses. Cada mes tiene dos días tipo, uno para día laboral y otro para festivo, con un perfil de consumo hora a hora. Esto es debido a que la ocupación de un centro comercial para un día laborable es menor que la ocupación que tiene un fin de semana o un día festivo. En las Figura 6 y Figura 7 podemos observar los valores de esta demanda hora a hora para los diferentes días tipo [12].

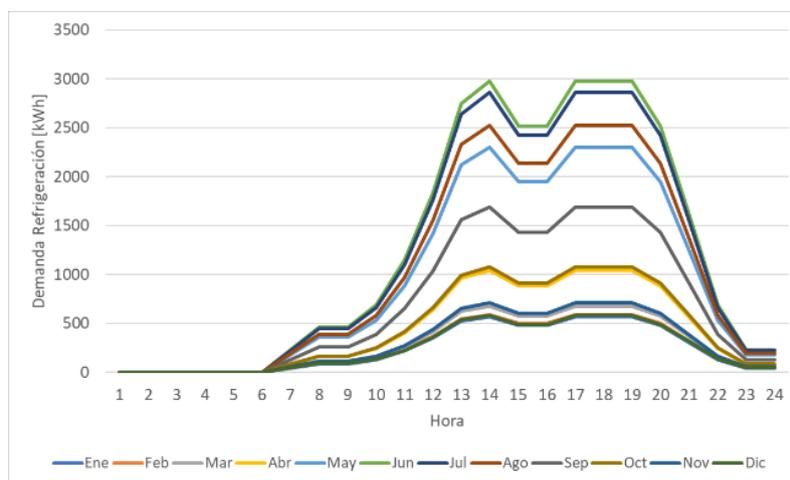


Figura 6. Demanda de Refrigeración en Día Laborable

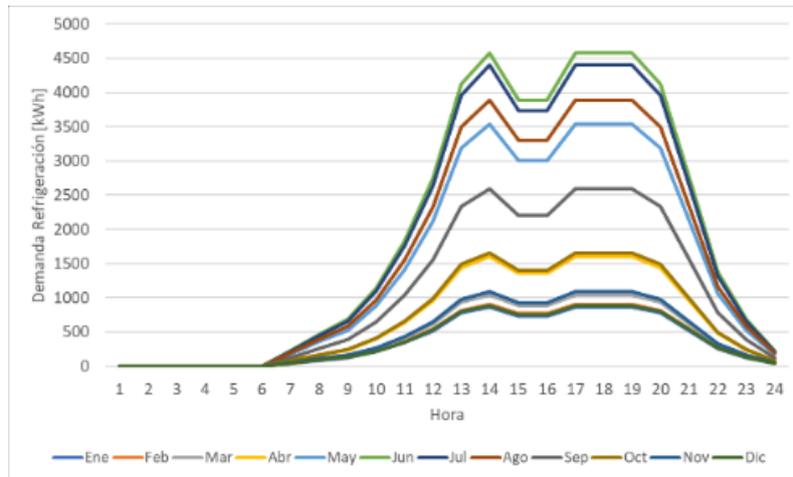


Figura 7. Demanda de Refrigeración en Día Festivo

Para la demanda de electricidad y calor hemos considerado un consumo igual para todos los meses, pero haciendo diferencia entre día laboral y día festivo. En las Figura 8 y Figura 9 se pueden observar los perfiles de consumo.

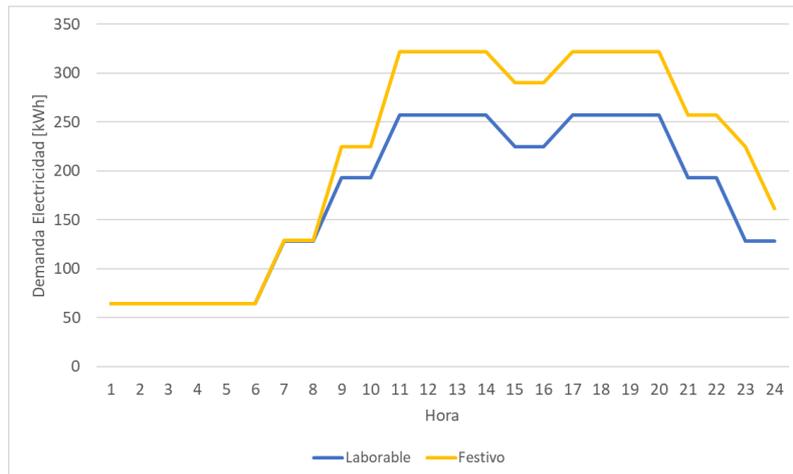


Figura 8. Demanda de Electricidad

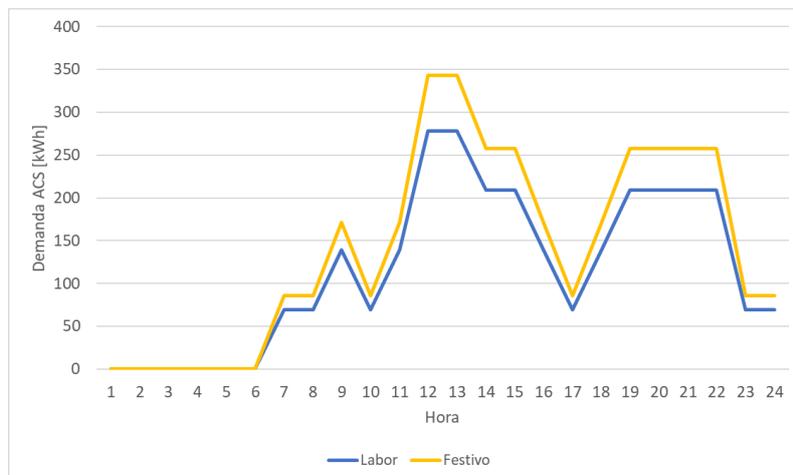


Figura 9. Demanda de calor

A partir de esta información y teniendo en cuenta el calendario anual, ya están definidas las demandas del centro comercial hora a hora para las 8.760 horas que componen el año. Varios parámetros importantes relacionados con la demanda son el consumo anual y la demanda pico (véase la Tabla 2), dan una idea general de los servicios energéticos requeridos por el centro comercial.

Tipo demanda	Demanda pico	Total anual
Refrigeración	4.580 kW	6.450 MWh
Electricidad	322 kW	1.650 MWh
Calefacción	343 kW	1.100 MWh

Tabla 2. Demandas del centro comercial

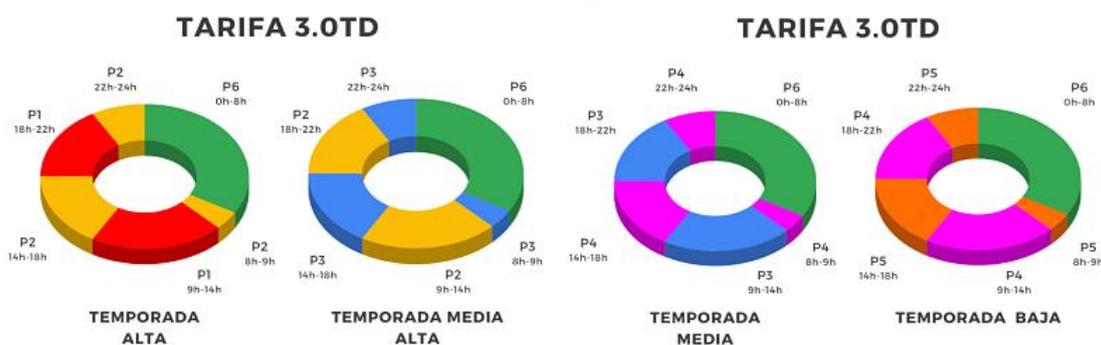
### 4.3. Precios de la energía comercial

Uno de los datos de entrada importante para realizar el análisis de los sistemas es el precio de la electricidad. Se ha seleccionado la tarifa Naturgy 3.0TD con fecha de junio del año 2021 [13], la cual está específicamente dirigida a pequeñas y medianas empresas. Esta tarifa incluye diferentes tramos que marcan distintos precios, tanto en potencia contratada como en consumo.

TEMPORADAS TARIFA 3.0TD			
MES	PENÍNSULA	CANARIAS	BALEARES
ENERO	ALTA	MEDIA	MEDIA
FEBRERO	ALTA	MEDIA	MEDIA
MARZO	MEDIA ALTA	MEDIA	BAJA
ABRIL	BAJA	BAJA	BAJA
MAYO	BAJA	BAJA	MEDIA ALTA
JUNIO	MEDIA	BAJA	ALTA
JULIO	ALTA	ALTA	ALTA
AGOSTO	MEDIA	ALTA	ALTA
SEPTIEMBRE	MEDIA	ALTA	ALTA
OCTUBRE	BAJA	ALTA	MEDIA ALTA
NOVIEMBRE	MEDIA ALTA	MEDIA ALTA	BAJA
DICIEMBRE	ALTA	MEDIA ALTA	MEDIA

Figura 10. Temporadas de la tarifa 3.0TD [14]

La tarificación se divide en 4 temporadas al año (véase la Figura 10), con variaciones en función del territorio en el que se encuentre el punto de suministro, que en nuestro caso es la península. Para cada temporada existe una discriminación horaria con diferentes periodos, siendo P1 el más caro y P6 el más barato (véase la Figura 11). En la Tabla 3 podemos observar los precios para estos periodos. Estos precios incluyen impuestos (21% IVA y 5,11% IE).



## TARIFA 3.0TD



Figura 11. Discriminación horaria en la tarifa 3.0TD [14]

Periodo	€/kWh
P1	0,2003
P2	0,1763
P3	0,1406
P4	0,1218
P5	0,1075
P6	0,1067

Tabla 3. Precios en los periodos de la tarifa 3.0TD

Teniendo en cuenta estos detalles, queda definido el precio de la electricidad para cada una de las 8.760 horas del año. Para el precio de venta de electricidad se ha tomado un 80% del precio de compra.

La otra fuente de energía comercial que utilizamos es el gas natural, para el cual hemos tomado un precio fijo de 0,040 €/kWh [15].

## 5. Análisis de los sistemas

### 5.1. Software

Para realizar el análisis de nuestros sistemas se ha utilizado el software LINGO. LINGO es un software de optimización que permite formular y resolver problemas de optimización tanto lineales como no lineales. Utiliza un lenguaje sencillo, con una notación similar a la matemática, que facilita la comprensión de los modelos elaborados para representar los sistemas analizados. Además, tiene la capacidad de importar y exportar datos y resultados a partir de ficheros de texto, bases de datos y hojas de cálculo. Esto facilita introducir los datos y el análisis posterior de los resultados.

El software LINGO utiliza variables para elaborar los modelos; ‘Constraints’ o restricciones, que limitan los valores que las variables pueden alcanzar; y funciones objetivo, que expresan la función que queremos optimizar. Además, LINGO utiliza lo que denomina “Sets”, que son conjuntos de variables que describen características comunes para un grupo de objetos. Estos “Sets” facilitan la formulación, comprensión y resolución de los problemas de optimización [16].

En este caso se ha utilizado una hoja de cálculo Excel como fuente de datos para el programa LINGO. Una vez resuelto el problema de optimización, se han volcado los

resultados de las variables a otra hoja de cálculo Excel para poder analizar los resultados de forma más cómoda.

## 5.2. Análisis del Sistema 1

Para poder analizar los sistemas utilizando el software de optimización, se debe definir de forma precisa los parámetros que se van a utilizar y las restricciones que se van a aplicar a los modelos. De esta forma el software optimizará la función objetivo, y determinará las variables libres como la capacidad a instalar de los equipos.

### 5.2.1. Equipos

Para este sistema se han propuesto seis configuraciones (véase la Tabla 4), que siguen el esquema ya mostrado en el apartado 2 (véase Figura 1) de esta memoria. Las configuraciones combinan diferentes tipos de colectores y máquinas de absorción (de simple, doble y triple efecto). Éstas últimas, trabajan a diferentes temperaturas, por lo que la elección de los colectores variará con cada máquina de refrigeración. La capacidad a instalar para los colectores y las enfriadoras de absorción se ha dejado como una variable libre. Se supone un consumo eléctrico para el campo solar de un 1% del calor solar producido.

En todos los casos se ha propuesto la instalación de un equipo de acumulación de calor, cuya capacidad también es una variable libre. Se ha supuesto que el equipo de acumulación de calor tiene pérdidas del 1% del calor acumulado en la hora previa, y del 1% del calor descargado ( $Q_{out}$ ).

Además, se instalan enfriadoras mecánicas con la potencia necesaria para cubrir toda la demanda de frío por sí mismas (4700 kW).

Configuración	Colector solar	Enfriadora absorción	$T_m$ (°C)
1	HTHa	RASE	95
2	TVPb	RASE	95
3	TVPa	RADE	180
4	NEPb	RADE	180
5	NEPa	RATE	215
6	SKYb	RATE	215

Tabla 4. Configuraciones del Sistema 1

### 5.2.2. Restricciones del modelo y función objetivo

La función objetivo a minimizar es el coste total anual del sistema (2) que es la suma del coste de inversión de los equipos y la factura energética a lo largo de un año.

$CTOT_{anu}[\text{€}] = CINV_{anu} + FACE_{anu}$	(2)
--	-----

Equipo	Coste Inversión
HTH	300 €/m <sup>2</sup>
TVP	330 €/m <sup>2</sup>
NEP	350 €/m <sup>2</sup>
SKY	400 €/m <sup>2</sup>
RASE	320 €/kW
RADE	350 €/kW
RATE	385 €/kW
RMEC	160 €/kW
ACU	65 €/kWh

Tabla 5. Coste de inversión de los equipos del Sistema 1

El coste anual de inversión de los equipos queda definido según la expresión (3) indicando el subíndice  $i$  cada uno de los equipos instalados. El coste unitario de inversión de los equipos (CINVEQU) se muestra en la Tabla 5.

$$CINV_{anu}[\text{€}] = (FCR + FOM) \cdot \left( \sum_i CINVEQU(i) \cdot CAPINS(i) \right) \quad (3)$$

FCR es el factor de recuperación del capital (4) y FOM el factor de operación y mantenimiento.

$$FCR = \frac{INT \cdot (1 + INT)^{NYR}}{(1 + INT)^{NYR} - 1} = 0,067 \text{ año}^{-1} \quad (4)$$

$INT = 0,03$	Tasa de interés anual
$NYR = 20$	Años de operación
$FOM = 0,015$	Factor de operación y mantenimiento

El coste de la factura eléctrica es el producto de la electricidad tomada de la red por el precio, para cada hora del año (5).

$$FACE_{anu}[\text{€}] = \sum_{h=1}^{8760} PEP(h) \cdot Ecom(h) \quad (5)$$

$PEP(h)$ [€/kWh]	Precio según tarifa eléctrica para cada hora del año
$Ecom(h)$ [kWh]	Electricidad consumida de la red para cada hora del año

Además, hemos definido un parámetro relevante, la Fracción Solar, que representa la porción de frío que es cubierta por el sistema de refrigeración solar en base anual (6).

$$FS_{anu} = Fabs_{anu} / Fdem_{anu} \quad (6)$$

### 5.3. Resultados del Sistema 1

#### 5.3.1. Comparativa de configuraciones

En primer lugar, se han comparado las seis configuraciones bajo las mismas condiciones, para determinar las diferencias entre ellas.

En todos los casos, el óptimo económico se encuentra con una fracción solar del 0% con un coste total anual de 245.832 €. Es decir, la forma más económica de cubrir la demanda de frío es no instalando colectores solares, acumulador, ni enfriadoras de absorción y utilizar las enfriadoras mecánicas para cubrir toda la demanda. A continuación, se han impuesto diferentes fracciones solares mínimas para las configuraciones y se ha comparado el coste total de cada una de ellas (véase la Figura 12).

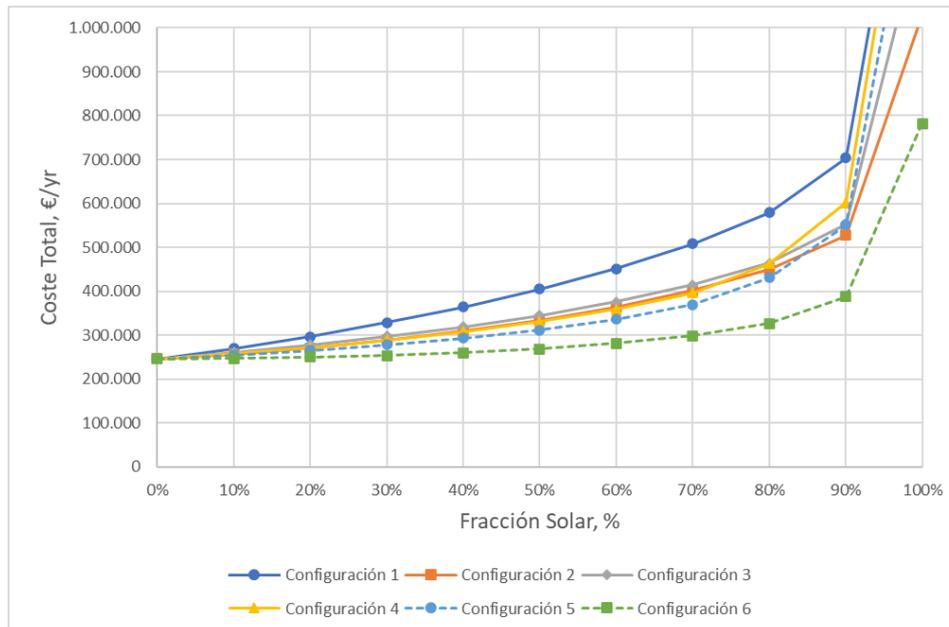


Figura 12. Coste total para las seis configuraciones

Si nos fijamos en la curva de costes totales con respecto a la fracción solar, podemos observar varios fenómenos. En primer lugar, se comprueba que, para las 6 configuraciones, se obtienen curvas con una forma similar. A medida que aumenta la fracción solar, aumenta el coste total del sistema. Al principio crece de forma casi proporcional, pero a medida que la fracción solar aumenta, la curva de costes crece a mayor velocidad. Esto es debido a que la capacidad de los equipos, principalmente colectores solares y acumulador (véase la Tabla 6) tiene que ser cada vez mayor para cubrir la demanda en los momentos más desfavorables para el sistema de refrigeración solar (alta demanda de refrigeración y baja radiación).

FS	Colectores [m2]						Acumulador [kWh]					
	Conf.1	Conf. 2	Conf.3	Conf.4	Conf.5	Conf.6	Conf.1	Conf. 2	Conf.3	Conf.4	Conf.5	Conf.6
0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10%	1.293	792	853	704	562	327	146	105	414	190	346	259
20%	2.641	1.623	1.724	1.439	1.144	667	1.110	778	1.340	906	1.097	803
30%	4.012	2.483	2.620	2.201	1.755	1.016	3.176	2.113	2.744	1.842	1.868	1.450
40%	5.472	3.361	3.569	2.982	2.382	1.367	5.114	3.897	4.304	3.114	2.737	2.043
50%	6.998	4.337	4.596	3.822	3.028	1.745	7.940	5.684	5.861	4.589	3.798	2.763
60%	8.652	5.430	5.729	4.768	3.777	2.165	11.252	7.802	7.551	6.047	4.848	3.658
70%	10.594	6.642	7.007	5.857	4.658	2.649	14.638	10.394	9.682	8.028	6.319	4.619
80%	12.811	8.040	8.474	7.443	6.000	3.255	19.185	14.090	12.408	11.356	10.227	6.219
90%	16.311	10.173	10.442	10.258	8.598	4.238	26.298	18.744	18.778	21.685	17.965	10.253
100%	43.692	19.380	28.700	31.778	28.998	9.268	78.994	60.927	50.761	100.974	77.714	49.736

Tabla 6. Capacidad instalada de colectores y acumulador para las 6 configuraciones

Además, también podemos comprobar que, para cualquier fracción solar, la configuración 6 es la más económica. Esto se debe, principalmente, a que los colectores solares utilizados en esta configuración son los más eficientes. En el caso de la configuración 6, el área de colectores instalada es mucho menor que en el caso de las otras configuraciones. El mayor precio por unidad de superficie de estos colectores está justificado por su mayor eficiencia. La máquina de refrigeración por absorción de triple efecto aprovecha el calor de mayor temperatura producido en los colectores y trabaja con un COP más elevado.

### 5.3.2. Estudio de la configuración 6

Después de comprobar que la configuración 6 es la más económica en todos los casos, se realiza un estudio más detallado del funcionamiento de este sistema.

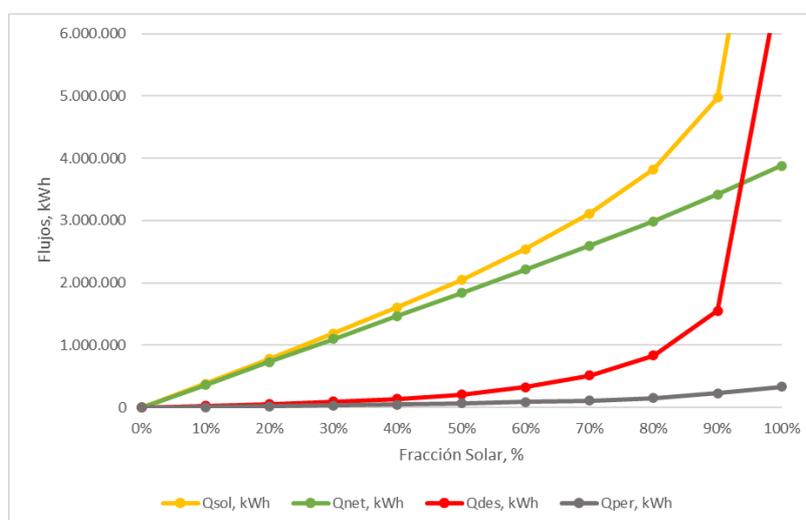


Figura 13. Flujos anuales de calor solar en la Configuración 6

Si se analizan los flujos de calor solar anuales (véase la Figura 13), se observa que a medida que aumenta la fracción solar el calor solar despilfarrado ( $Q_{des}$ ) también aumenta. Con fracciones solares elevadas, el despilfarro relativo de calor es mucho mayor. Esto es debido a la obligación, antes comentada, de instalar una gran superficie de colectores para satisfacer gran parte de la demanda de refrigeración con frío solar (elevada fracción solar). En estos casos los colectores están generando más calor del necesario para cubrir la demanda durante gran parte de las horas del año. Esto provoca que los costes de inversión no se rentabilicen y, en definitiva, hacen un sistema menos eficiente.

Podemos hacer un análisis sobre el aprovechamiento que estamos haciendo de los equipos, para ello podemos definir un factor de utilización. Este factor es la relación entre el producto anual que nos proporciona el equipo y el máximo que nos podría generar funcionando a plena carga (7).

$FU_{Qsol} = Q_{net_{anu}}/Q_{sol_{anu}}$	(7)
$FU_{Fabs} = F_{abs_{anu}}/(CAPINS_{RABS} \cdot 8760)$	(8)

$FU_{Fmec} = Fmec_{anu}/(CAPINS_{RMEC} \cdot 8760)$	(9)
$FU_{ACU} = Qout_{anu}/(CAPINS_{ACU} \cdot 365)$	(10)

Se observa que, para todos los equipos, una fracción solar elevada supone una importante disminución del factor de utilización. Esto se traduce en que hemos invertido en unos equipos que estamos utilizando muy por debajo de su capacidad. Esto es especialmente notable en el caso de los colectores solares y el acumulador (véase la Figura 14).

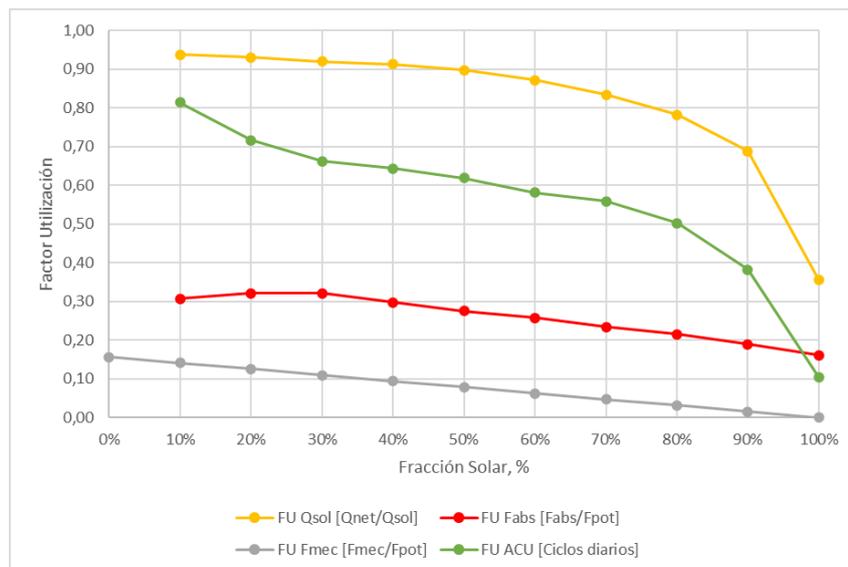


Figura 14. Factor de utilización de los equipos en la Configuración 6

Para cuantificar el sobrecoste que conlleva cubrir la demanda con frío solar podemos hacer un análisis económico. Se han definido unas variables que representan la relación entre el aumento de los costes y la generación del frío solar. El coste unitario de frío (11) establece el precio que cuesta producir una unidad de frío, el coste unitario de frío solar (12) representa el sobrecoste asociado a la generación de frío solar, y el coste marginal de frío solar (13) representa el sobrecoste marginal asociado a la generación de la última unidad de frío solar.

$CostUnit_{Frío} [€/kWh] = CTOT/Fdem_{anu}$	(11)
$CostUnit_{FríoSolar}(FS) [€/kWh] = \frac{CTOT(FS) - CTOT(0\%)}{Fabs_{anu}}$	(12)
$CostMarg_{FríoSolar}(FS) [€/kWh] = \frac{CTOT(FS) - CTOT(FS - 10\%)}{Fabs_{anu}(FS) - Fabs_{anu}(FS - 10\%)}$	(13)

Si se representan estos costes en una gráfica para los diferentes valores de fracción solar mínima (véase la Figura 15), se puede apreciar que el coste unitario del frío varía poco con la fracción solar cuando esta no supera el 50%. Y tanto el coste unitario del

frío solar, como el coste marginal del frío solar nos indican que cada unidad de frío solar adicional que se exige producir tiene un coste cada vez más elevado.

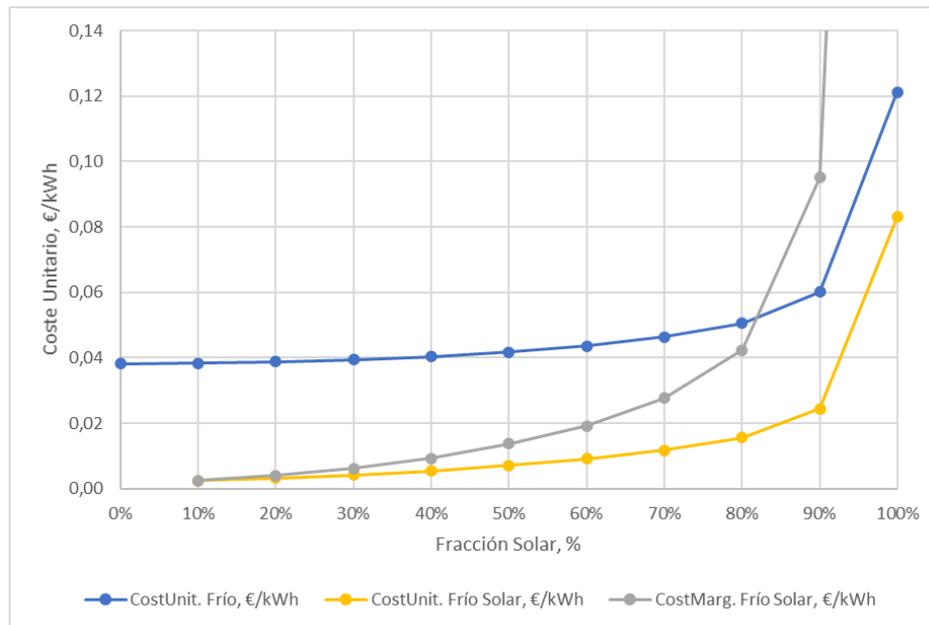


Figura 15. Costes unitarios de la producción de frío en la Configuración 6

### 5.3.3. Análisis de sensibilidad a los precios de la electricidad

Un interesante análisis que se puede realizar consiste en comprobar cómo afecta al comportamiento de nuestro sistema el precio de la electricidad. Si aumentamos el precio de la electricidad llegará un punto en el que será viable económicamente la instalación de colectores y enfriadoras de absorción.

Se ha aplicado un aumento proporcional al precio de la electricidad hora a hora, y se ha calculado el óptimo económico. Como se puede observar en la gráfica (véase la Figura 16), al aumentar el precio de la electricidad, llega un punto (con precios de la electricidad de un 110% respecto a los originales) en el que el programa determina que el óptimo económico se produce con una fracción solar del 9%. Si se siguen aumentando los precios de la electricidad, las fracciones solares siguen aumentando, al igual que la capacidad instalada de los equipos (véase la Tabla 7), aunque lo hacen cada vez de forma menos acusada. La curva tiene forma asintótica, esto indica la dificultad del sistema para cubrir la demanda en los momentos más desfavorables sin tener que invertir una gran cantidad en equipos que no se aprovechan la mayor parte del año.

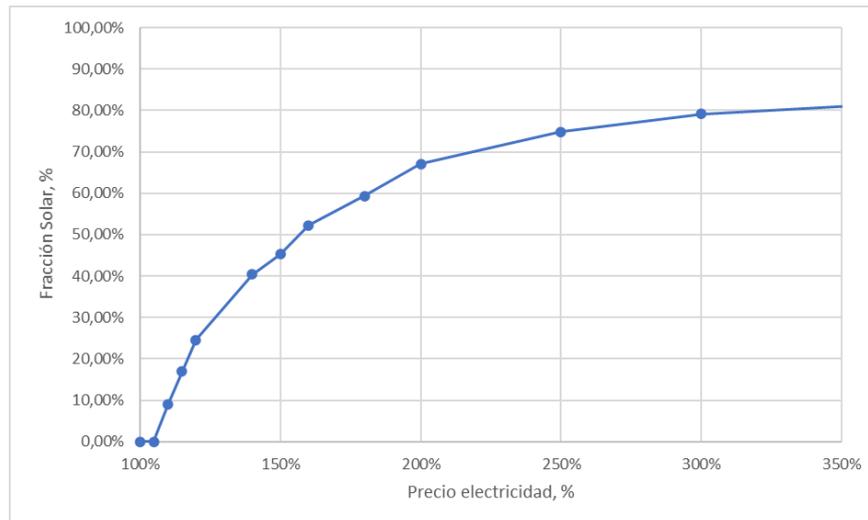


Figura 16. Sensibilidad al precio de la electricidad en la Configuración 6

P. Elec	Colectores [m <sup>2</sup> ]	Ref. Absor. [kW]	Acumulador [kWh]	Ref. Mec. [kW]	FS
100%	-	-	-	4.700	0%
105%	-	-	-	4.700	0%
110%	294	219	234	4.700	9%
115%	559	401	579	4.700	17%
120%	820	579	1.052	4.700	25%
140%	1.379	1.037	2.032	4.700	40%
150%	1.564	1.197	2.394	4.700	45%
160%	1.832	1.448	2.931	4.700	52%
180%	2.137	1.750	3.507	4.700	59%
200%	2.491	2.136	4.278	4.700	67%
250%	2.918	2.525	5.193	4.700	75%
300%	3.183	2.802	6.013	4.700	79%
400%	3.499	2.977	7.098	4.700	83%

Tabla 7. Capacidad instalada de los equipos con distintos precios de la electricidad en la Configuración 6

## 5.4. Análisis del Sistema 2

### 5.4.1. Equipos

Para este sistema, que cubre la demanda de frío y electricidad, se han seleccionado tres configuraciones que combinan diferentes colectores solares y sistemas ORC (véase la Tabla 8), que siguen el esquema de funcionamiento y los flujos energéticos mostrados en el apartado 2 (véase Figura 2) de esta memoria. Estas configuraciones trabajan a dos niveles de temperatura por lo que la producción de calor de los colectores y el rendimiento de los ORC serán diferentes. La capacidad a instalar de colectores y potencia de los ORC es una variable libre. Al igual que en el sistema 1, se supone un consumo eléctrico para el campo solar de un 1% del calor solar producido.

Configuración	Colector solar	ORC	Tm (°C)
1	NEPa	ORCB	215
2	SKYb	ORCB	215
3	SKYa	ORCA	265

Tabla 8. Configuraciones del Sistema 2

Para las tres configuraciones se ha propuesto la instalación de un equipo de acumulación de calor, cuya capacidad también es una variable libre. Se ha supuesto que el equipo de acumulación de calor tiene pérdidas del 1% del calor acumulado en la hora previa y del 1% del calor descargado ( $Q_{out}$ ).

Se instalarán enfriadoras mecánicas con la potencia necesaria para cubrir toda la demanda de frío por sí mismas (4700 kW).

#### 5.4.2. Restricciones del modelo y función objetivo

La función objetivo a minimizar es el coste total anual del sistema, la misma ya presentada para el Sistema 1 pero con los costes de equipos correspondientes (véase la Tabla 9).

Equipo	Coste Inversión
NEP	350 €/m <sup>2</sup>
SKY	400 €/m <sup>2</sup>
ORCA	2000 €/kW
ORCB	1800 €/kW
RMEC	160 €/kW
ACU	65 €/kWh

Tabla 9. Coste de inversión de los equipos del Sistema 2

Además, se debe tener en cuenta que con este sistema existe la posibilidad de vender electricidad a la red, por lo tanto, la facturación eléctrica tiene que incluir este término (14).

$FACE_{anu}[\text{€}] = CELE_{anu} - VELE_{anu}$	(14)
$CELE_{anu}[\text{€}] = \sum_{h=1}^{8760} PEP(h) \cdot Ecom(h)$	(15)
$VELE_{anu}[\text{€}] = 0,8 \cdot \sum_{h=1}^{8760} PEP(h) \cdot Even(h)$	(16)

En este sistema la fracción solar se ha definido como la fracción de electricidad que deja de consumirse en relación a un sistema convencional que cubriera la demanda de electricidad y frío con el consumo de la red (17). Además, hemos definido el factor de autoconsumo (FA), que es la relación entre la electricidad que proviene del ORC y la total consumida por el sistema (18).

$FS_{anu} = 1 - \frac{Ecom_{anu} - Even_{anu}}{Edem_{anu} + Emec_{anu}}$	(17)
--	------

$$FA_{anu} = E_{int_{anu}}/E_{con_{anu}}$$

(18)

## 5.5. Resultados del Sistema 2

### 5.5.1. Comparativa de las configuraciones

Tal y como se ha hecho con el Sistema 1, en primer lugar, se van a comparar las 3 configuraciones de este sistema bajo las mismas condiciones.

En este caso, el óptimo económico también se encuentra con una fracción solar del 0%, un coste total anual de 459.921€. De nuevo, la manera más económica de cubrir la demanda es utilizando un sistema de refrigeración mecánica convencional y tomando toda la electricidad de la red.

Se han impuesto diferentes fracciones solares mínimas para las configuraciones para comprobar el comportamiento de cada una (véase la Figura 17). En la gráfica se aprecia que la configuración 3 es la que tiene un coste total menor en todos los casos, seguido de cerca por la configuración 2, que utiliza los mismos colectores, pero un ORC que trabaja a menor temperatura y por tanto tiene menor eficiencia.

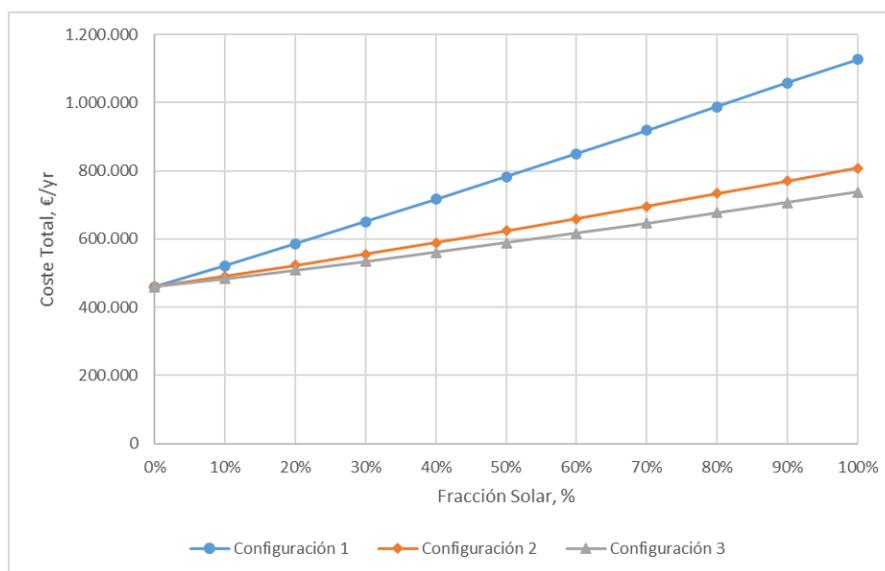


Figura 17. Coste total para las tres configuraciones

Se ha realizado un estudio más detallado de la Configuración 3 por ser la más económica en todos los casos. Si resolvemos el problema imponiendo diferentes factores de autoconsumo mínimo (18), obtenemos la gráfica de costes (véase la Figura 18). Vemos que al principio al aumentar el factor de autoconsumo el coste total aumenta de forma casi lineal, pero a partir de un 80% el coste se dispara. Para estos valores se vende más electricidad de la que se compra y por eso los costes de la factura eléctrica son negativos.

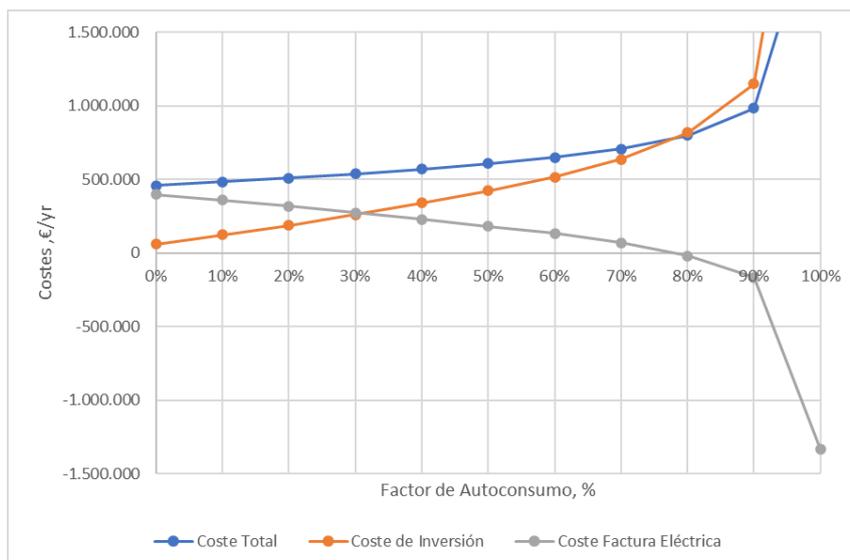


Figura 18. Costes de la configuración 3

Si nos fijamos en la capacidad instalada de los equipos (véase la Figura 19) vemos como aumenta cada vez más la superficie de colectores. Además, podemos observar un aumento importante de la relación entre la capacidad del acumulador y la superficie de colectores en el tramo del 20 al 50%. Por otro lado, la potencia del ORC aumenta de forma proporcional hasta acercarse a valores de FA del 90%.

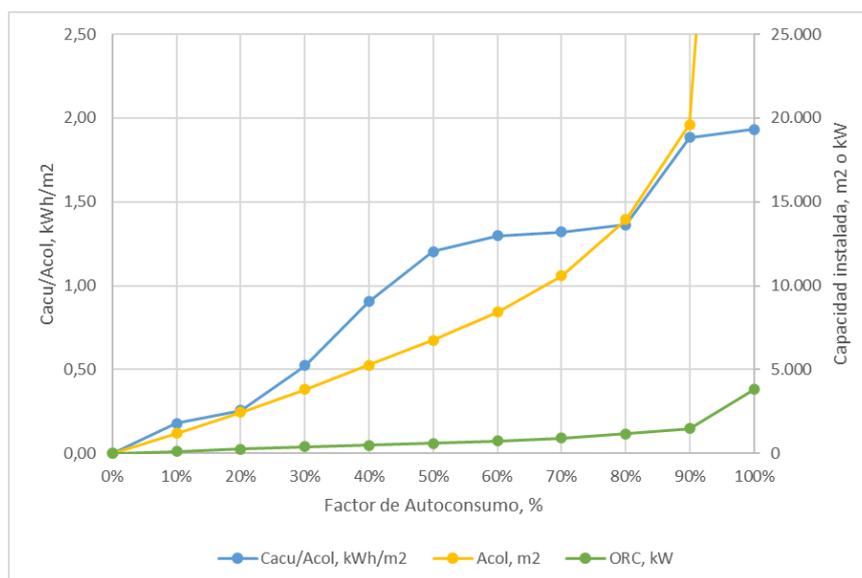


Figura 19. Capacidad instalada de los equipos para la Configuración 3

Si analizamos la utilización de los equipos (19), comprobamos que, aunque para altos valores del factor de autoconsumo la capacidad instalada crece mucho, los equipos se están aprovechando (véase la Figura 20). El sistema está aprovechando la mayor parte del calor solar para generar electricidad tanto para consumo como para verterla en la red.

$FU_{Qsol} = Q_{net\,anu} / Q_{sol\,anu}$	(19)
---	------

$FU_{ORC} = E_{orc_{anu}} / (CAPINS_{ORC} \cdot 8760)$	(20)
$FU_{ACU} = Q_{out_{anu}} / (CAPINS_{ACU} \cdot 365)$	(21)

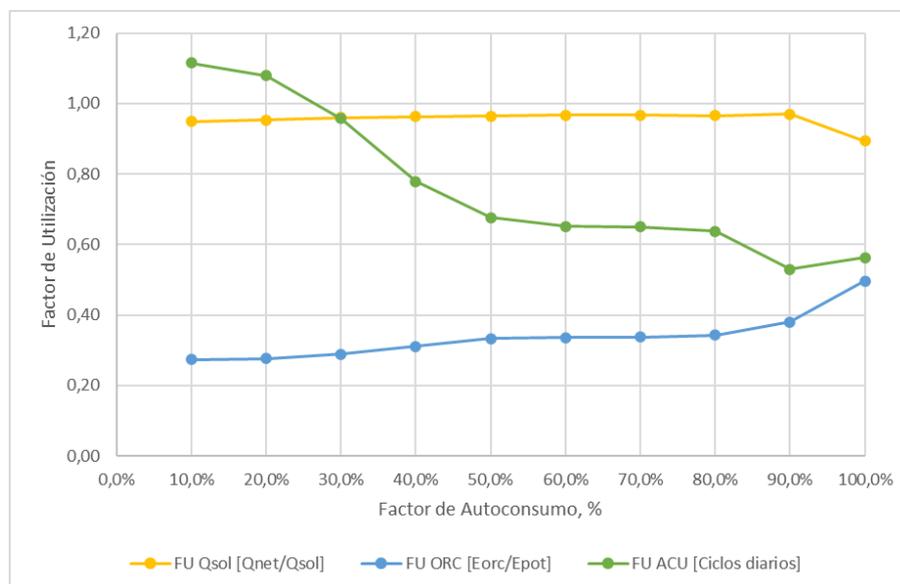


Figura 20. Factor de utilización de los equipos para la Configuración 3

En nuestro caso de análisis se ha supuesto un precio de venta de la electricidad del 80% del precio de compra y que no hay ningún límite para verter esta electricidad en la red. Si en una situación real se presentaran diferentes límites como, por ejemplo, que solo nos compensasen en la factura los kWh que consumimos de los excedentes, la situación sería muy diferente. Este es un factor muy importante a la hora de analizar estos sistemas.

### 5.5.2. Análisis de la producción horaria

Para hacer un análisis más profundo hora a hora del sistema, se ha escogido la configuración 3 y se ha impuesto un factor de autoconsumo mínimo del 50%. Con esta restricción, la potencia a instalar de cada equipo se muestra en la Tabla 10.

Equipo	Capacidad Instalada
Colectores	6.745 m <sup>2</sup>
Acumulador	8.117 kWh
ORC	593 kW
RefMec	4.700 kW

Tabla 10. Capacidad instalada de los equipos para la configuración 3 (FA=50%)

Si se analiza la relación entre demanda de electricidad, tanto para consumo ( $E_{dem}$ ) como para la producción de frío ( $E_{mec}$ ), y la producción de electricidad del ORC ( $E_{orc}$ ); se observa que, mientras la demanda de electricidad para consumo es prácticamente constante, la demanda de electricidad para la enfriadora mecánica es mayor para los meses más cálidos (véase la Figura 21). La demanda conjunta presenta una curva que coincide con la mayor producción de electricidad en la planta de potencia

ORC. Esto es algo que supone una de las ventajas de nuestro sistema tal y como está diseñado, una mayor demanda va aparejada con mayor recurso solar disponible.

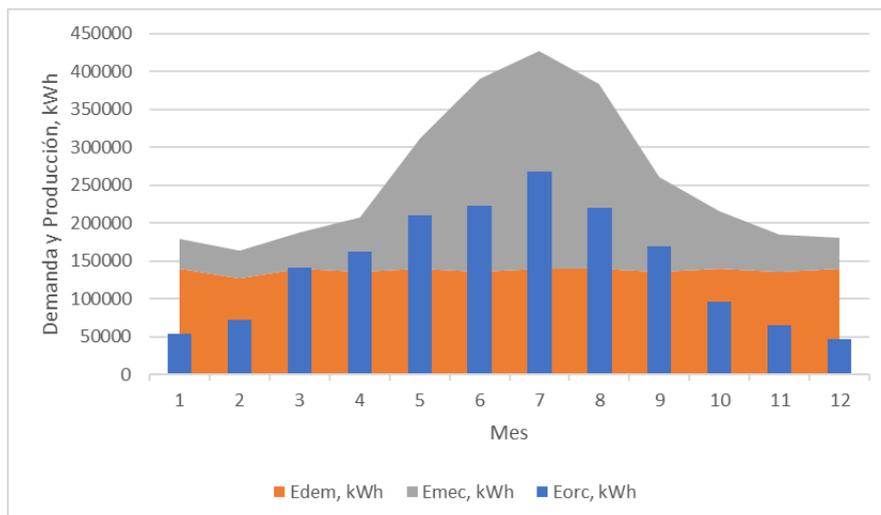


Figura 21. Gráfica de área apilada de demanda y producción de electricidad (FA=50%)

En este sistema el ORC es el equipo principal junto a los colectores. En el siguiente gráfico se representa el acumulado de la carga de potencia a la que trabaja el equipo a lo largo del año (véase la Figura 22). El equipo está funcionando durante 4228 horas al año (48,3% del total); de estas, 3025 horas (34,5%) está funcionando a una potencia superior al 50%, y trabaja al 100% de su capacidad durante 1576 horas al año (18% del total).

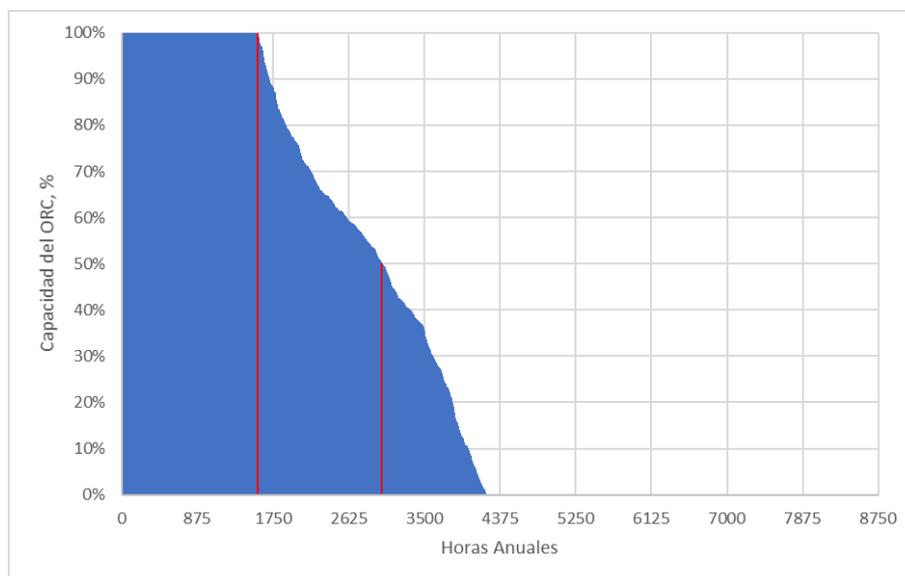


Figura 22. Carga de potencia del ORC

Por consiguiente, el ORC está funcionando prácticamente la mitad de las horas del año, y buena parte de ellas lo hace a máxima potencia. A la hora de analizar este tipo de instalaciones es importante conocer el factor de utilización de los equipos para poder comprobar si la inversión que se realiza en ellos se aprovecha, pues no es interesante invertir capital en equipos que se utilizan muy poco.

Para analizar el comportamiento del acumulador, se han tomado dos meses de referencia (julio como el mes con mayor producción de calor solar y diciembre como el de menor producción).

Se puede observar cómo en julio el promedio (que se ha calculado como la media a la misma hora sobre cada uno de los días del mes) de calor que se destina al ORC durante gran parte del día se acerca al máximo de potencia de la máquina (2510 kW), y el calor restante durante las horas de mayor producción solar se utiliza para cargar el acumulador (véase la Figura 23).

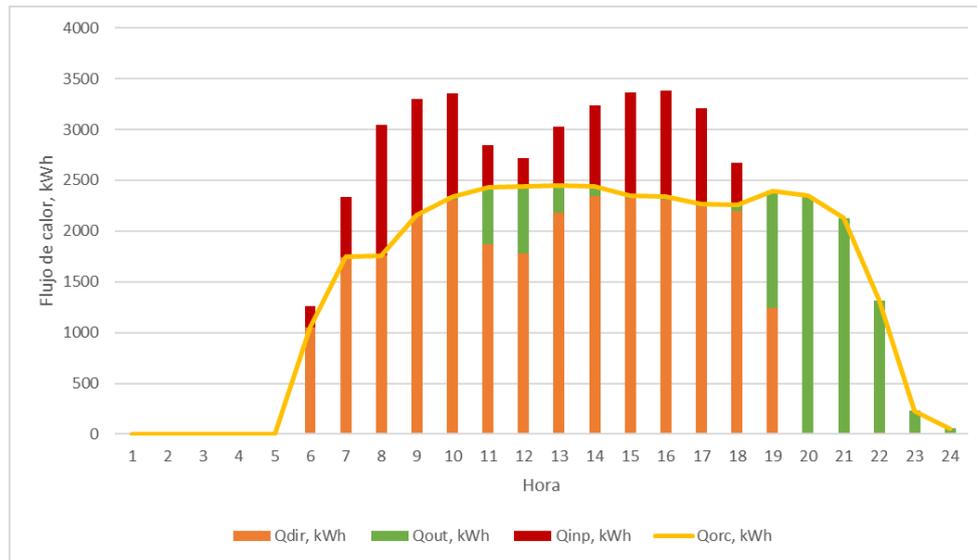


Figura 23. Flujos horarios de calor solar en julio

En el caso de diciembre (véase la Figura 24) se ve como el promedio del flujo de calor hacia el ORC está lejos de alcanzar el máximo (apenas llega al 32% de la capacidad máxima de producción). Se puede apreciar que, aunque el ORC está lejos de alcanzar su potencia máxima, el acumulador se carga durante algunas horas del día para descargarse posteriormente. Esto se puede explicar debido a que, al tener la tarifa eléctrica horaria, el software de optimización estima más conveniente acumular calor durante el día para gastarlo posteriormente durante las horas con mayor precio de la electricidad.

Aunque en la realidad este comportamiento es difícil de analizar por las variables que involucra (producción solar, carga del acumulador, demanda eléctrica, precio de la electricidad), el estudio del modo de operación del acumulador puede ofrecer interesantes ventajas dentro de nuestro sistema. Además, teniendo en cuenta la variabilidad estacional tanto de la demanda como de la producción solar, puede dar lugar a que haya diferentes modos de operación óptimos para diferentes épocas del año.

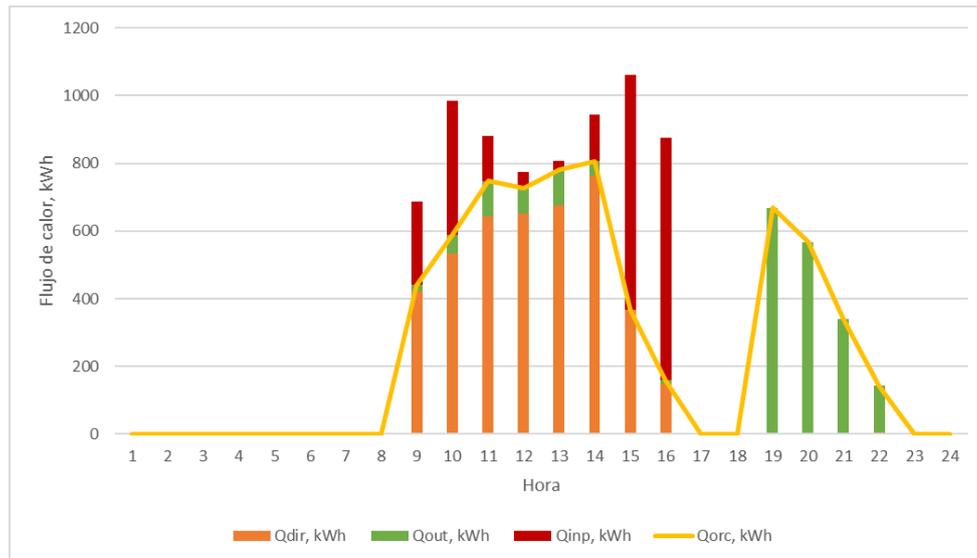


Figura 24. Flujos horarios de calor solar en diciembre

## 5.6. Análisis del Sistema 3

### 5.6.1. Equipos

En el caso del Sistema 3, que cubre la demanda de refrigeración, electricidad y calor (trigeneración), se ha propuesto una única configuración de equipos (véase Figura 3). Este sistema utilizará una planta de potencia ORC con recuperación de calor cogenerado a 60°C. Al igual que en los anteriores sistemas, la capacidad a instalar de colectores y potencia del ORC son variables libres, y se supone un consumo eléctrico para el campo solar de un 1% del calor solar producido.

Configuración	Colector solar	ORC	Tm (°C)
1	SKYc	ORCC	280

Tabla 11. Configuración del Sistema 3

En este caso también se ha propuesto la instalación de equipo de acumulación de calor con las mismas condiciones de capacidad y pérdidas que en los dos casos anteriores. Además, la demanda de frío se cubrirá mediante la instalación de enfriadoras mecánicas con la potencia necesaria para cubrir toda la demanda de frío por sí mismas (4700 kW). Se supone la instalación de una caldera con potencia nominal suficiente para cubrir la demanda de calor por sí misma en todo momento (350 kW).

### 5.6.2. Restricciones del modelo y función objetivo

La función objetivo a minimizar es el coste total anual del sistema y es la misma que para los anteriores sistemas. Considera los costes de todos los equipos presentes (véase la Tabla 12). En este sistema también se contempla la posibilidad de vender electricidad a la red. Además, también se consume gas natural para accionar la caldera por lo que la factura energética incluye los tres términos (22).

Equipo	Coste Inversión
SKY	400 €/m <sup>2</sup>
ORCC	2100 €/kW
RMEC	160 €/kW
CALD	90 €/kW
ACU	65 €/kWh

Tabla 12. Coste de inversión de los equipos del Sistema 3

$FACE_{anu}[\text{€}] = CELE_{anu} - VELE_{anu} + CGAS_{anu}$	(22)
$CGAS_{anu}[\text{€}] = CUG \cdot \sum_{h=1}^{8760} Rgas(h)$	(23)

En este sistema la fracción solar y la fracción de autoconsumo se han definido de igual manera que en el Sistema 2.

## 5.7. Resultados del Sistema 3

### 5.7.1. Óptimo económico

En este caso solo hay una configuración de equipos. En primer lugar, se ha resuelto el sistema imponiendo diferentes fracciones solares mínimas (17) para ver dónde está el óptimo económico. Como se puede comprobar en el diagrama (véase la Figura 25) el óptimo se encuentra con una fracción del 3,3%, con un coste total de 504.624€. A diferencia de los dos primeros sistemas, en este caso sí que es rentable económicamente hacer la inversión en los equipos de producción solar, a pesar de que en el óptimo la capacidad a instalar sea muy baja (véase la Tabla 13).

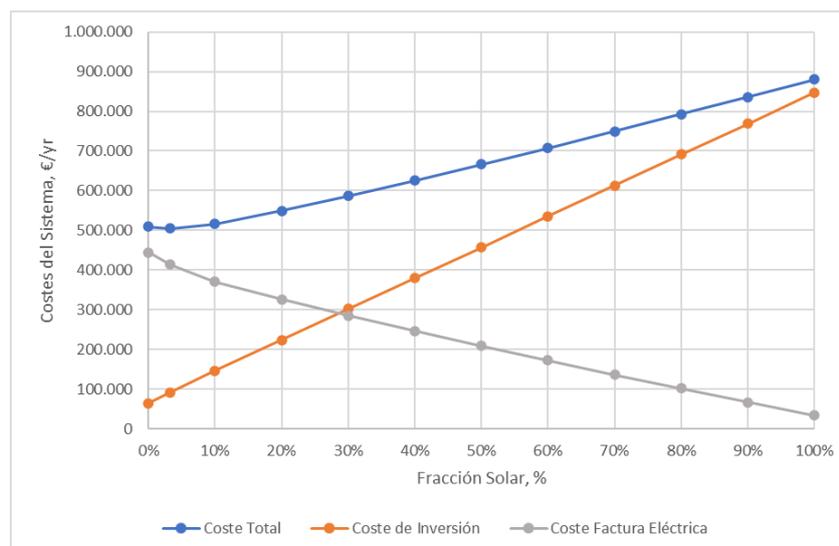


Figura 25. Costes del Sistema 3

FS	Colectores [m2]	Acumulador [kWh]	ORC [kW]	Caldera [kW]	Ref. Mec. [kW]
0%	-	-	-	350	4.700
3,3%	529	474	41	350	4.700
10%	1.618	1.470	119	350	4.700
20%	3.204	1.613	262	350	4.700
30%	4.794	1.900	404	350	4.700
40%	6.377	2.022	548	350	4.700
50%	7.959	2.130	693	350	4.700
60%	9.542	2.345	836	350	4.700
70%	11.136	2.624	976	350	4.700
80%	12.716	2.757	1.121	350	4.700
90%	14.304	3.071	1.261	350	4.700
100%	15.889	3.312	1.404	350	4.700

Tabla 13. Capacidad instalada de los equipos para el Sistema 3

Si se pone el foco en el funcionamiento de los equipos dentro del sistema, se observa como el campo solar y el ORC, tienen factores de utilización casi constantes para cualquier fracción solar (véase la Figura 26). La utilización del acumulador aumenta hasta llegar a un máximo cerca del 50% de fracción solar. Y lo que más destaca es que el calor cogenerado del ciclo ORC se desaprovecha rápidamente al aumentar la fracción solar. Esto es debido a que la demanda de calor del centro comercial es baja comparada a la demanda de electricidad y frío.

$FU_{Qsol} = Q_{net\,anu} / Q_{sol\,anu}$	(24)
$FU_{ORC} = E_{orc\,anu} / (CAPINS_{ORC} \cdot 8760)$	(25)
$FU_{ACU} = Q_{out\,anu} / (CAPINS_{ACU} \cdot 365)$	(26)
$FU_{Qcog} = Q_{int\,anu} / Q_{cog\,anu}$	(27)
$FU_{Cald} = Q_{cal\,anu} / (CAPINS_{Cald} \cdot 8760)$	(28)

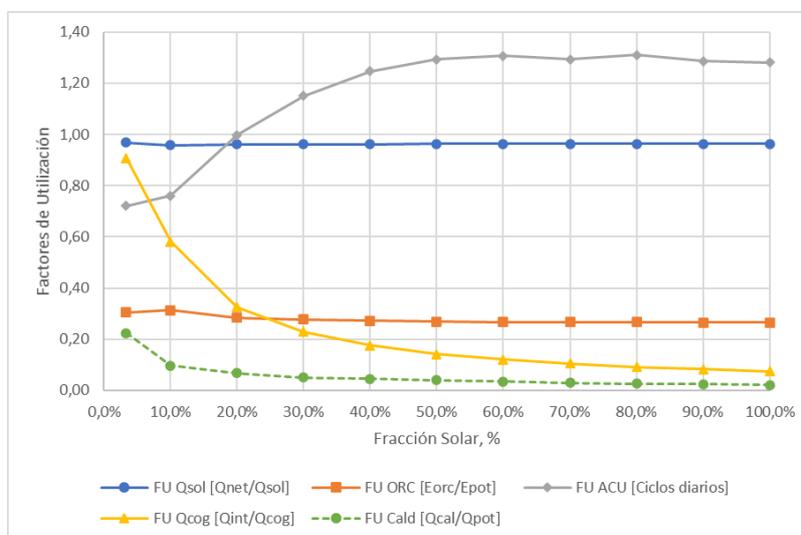


Figura 26. Factor de utilización de los equipos para el Sistema 3

### 5.7.2. Análisis de sensibilidad a los precios de la electricidad

Al igual que se ha hecho con el Sistema 1, se ha realizado un análisis de sensibilidad del sistema con el precio de la energía eléctrica. Se ha aplicado un aumento proporcional al precio de la electricidad hora a hora, y se ha calculado el óptimo económico.

Como se puede observar en la Figura 27, para precios en torno al 180% del precio de la tarifa elegida, tanto la fracción solar como el factor de autoconsumo empiezan a aumentar rápidamente; al igual que la potencia instalada de los equipos (véase la Tabla 14). Cabe destacar que el Sistema 3 es capaz de vender electricidad a la red y, como el precio de venta va aparejado al de compra, al aumentar los precios de esta última, aumentan los beneficios de verter los excedentes a la red. Al vender mucha más electricidad de la que se compra, la curva de Fracción Solar (17), que incluye el término de venta de electricidad, aumenta de forma súbita al aumentar mucho los precios de la electricidad. De esta forma estaríamos ante una planta rentable de producción de energía eléctrica para la red.

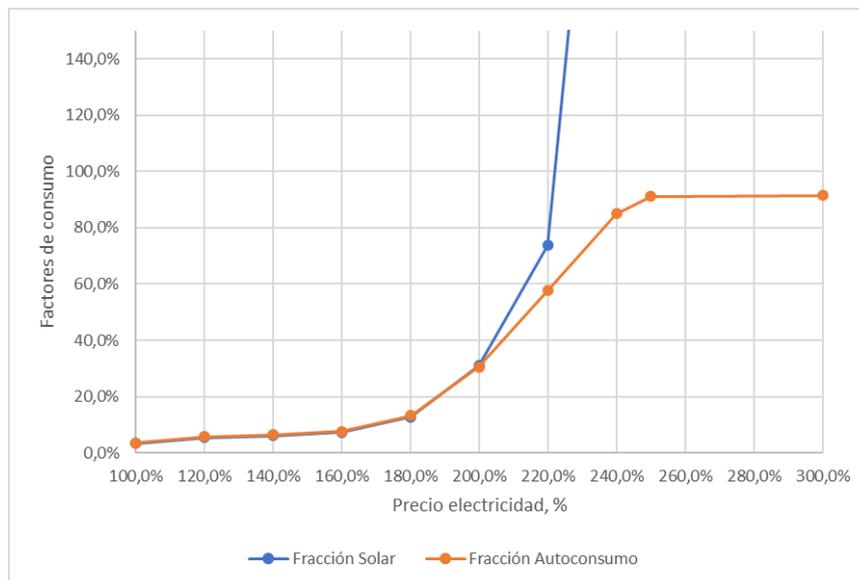


Figura 27. Sensibilidad al precio de la electricidad para el Sistema 3

Precio elec.	Colectores [m2]	Acumulador [kWh]	ORC [kW]
100%	529	474	41
120%	873	1.091	61
140%	989	1.231	66
160%	1.188	1.334	81
180%	2.052	1.571	159
200%	4.964	2.234	416
220%	11.821	6.915	959
240%	51.290	16.027	4.438

Tabla 14. Potencia instalada según el precio de la electricidad

### 5.7.3. Comparativa Sistema 3 vs Sistema 2 + Caldera

Ante la observación de que en este Sistema 3 gran parte del calor cogenerado ( $Q_{cog}$ ) se desaprovecha (para una fracción solar del 15% ya se está desaprovechando el 50% de este calor cogenerado), y teniendo en cuenta las similitudes de composición entre este sistema y el Sistema 2 más una caldera convencional, se ha decidido hacer un estudio comparativo.

En este sistema alternativo (véase la Figura 28), la demanda de frío y electricidad son cubiertos igual que en el Sistema 2, y se instala una caldera independiente para cubrir la demanda de calor. Son dos las razones que hacen pensar la posibilidad de que éste último sistema sea más económico bajo ciertas condiciones: el ORC instalado en el Sistema 2 tiene mayor eficiencia eléctrica al producir este único producto, y además su ORC tiene un coste de inversión menor por unidad de potencia eléctrica que el ORC del Sistema 3.

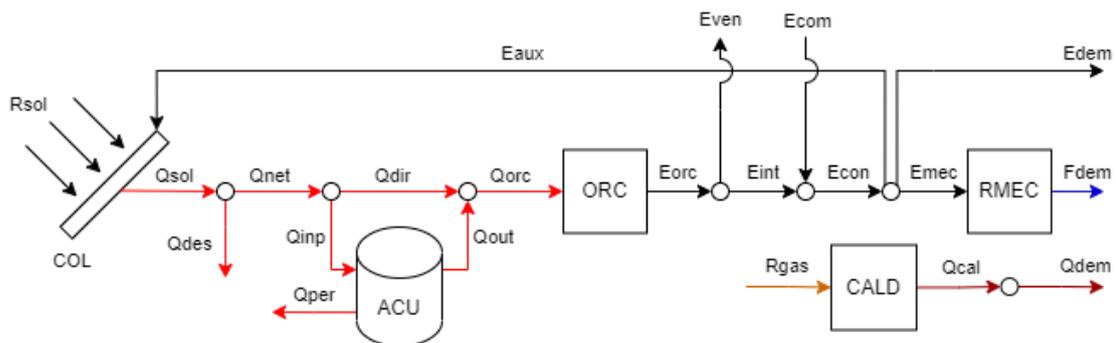


Figura 28. Esquema de funcionamiento del Sistema 2 + Caldera

Para hacer la comparativa se han tomado unas condiciones particulares, en primer lugar, se han tomado precios de la energía de un 190% de los propuestos en las tarifas iniciales (gas natural y electricidad). Además, se han comparado los sistemas bajo variaciones de la demanda de calor (100%, 200%, 400% y 600%), en todos los casos se instalará una caldera con la potencia suficiente para cubrir la demanda de calor por sí misma.

Tras obtener el óptimo económico para cada uno de los dos sistemas bajo las diferentes demandas (véase la Tabla 15) se observa que, para la demanda de calor del 100%, el coste de los dos sistemas es prácticamente el mismo. Cuanto más aumentamos la demanda de calor, el Sistema 3 resulta más económico respecto al sistema alternativo. Además, la potencia instalada de los equipos también es cada vez mayor (véase la Tabla 16), mientras para el sistema alternativo la potencia instalada de colectores, acumulador y ORC es la misma pues es independiente de la producción de calor.

Qdem	Sistema 3			Sistema 2 + Caldera		
	Coste Total [€/yr]	Coste Inversión [€/yr]	Coste Fact Energ [€/yr]	Coste Total [€/yr]	Coste Inversión [€/yr]	Coste Fact Energ [€/yr]
100%	841.049	264.372	576.678	846.347	730.535	115.812
200%	869.952	377.239	492.714	936.714	733.124	203.590
400%	935.136	551.732	383.404	1.117.449	738.304	379.145
600%	1.007.599	710.836	296.763	1.298.183	743.484	554.699

Tabla 15. Comparativa de costes Sistema 3 vs Sistema 2 + Caldera

Qdem	Sistema 3				Sistema 2 + Caldera			
	Colectores [m2]	Acumulador [kWh]	ORC [kW]	CALD [kW]	Colectores [m2]	Acumulador [kWh]	ORC [kW]	CALD [kW]
100%	3.985	2.604	319	350	12.708	7.936	1.252	350
200%	6.146	5.097	468	700	12.708	7.936	1.252	700
400%	9.450	9.833	673	1.400	12.708	7.936	1.252	1.400
600%	12.480	13.552	872	2.100	12.708	7.936	1.252	2.100

Tabla 16. Capacidad instalada Sistema 3 vs Sistema 2 + Caldera

Respecto a la utilización del calor cogenerado ( $Q_{cog}$ ), observamos que cuando aumentamos la demanda de calor ( $Q_{dem}$ ) el Sistema 3 despilfarra menos calor a pesar de que la porción de la demanda cubierta con este calor cogenerado es menor (véase la Tabla 17). Podríamos decir que las demandas están mejor “balanceadas” y se aprovecha el recurso solar mejor a través del funcionamiento del ORC.

Qdem	Qcog [kWh]	Qint [kWh]	Qcal [kWh]	Qdem [kWh]	FU Qcog [Qint/Qcog]	FA Qsol [Qint/Qdem]
100%	3.416.919	956.982	142.985	1.099.967	28,0%	87,0%
200%	5.235.557	1.864.445	335.489	2.199.934	35,6%	84,8%
400%	7.973.797	3.596.828	803.040	4.399.868	45,1%	81,7%
600%	10.509.935	5.246.352	1.353.450	6.599.802	49,9%	79,5%

Tabla 17. Flujos de calor del Sistema 3

## 6. Conclusiones

En el trabajo se ha expuesto la situación actual de los sistemas de poligeneración solar, que tecnologías utilizan, que variables influyen en su comportamiento y cuáles son los criterios a emplear en su diseño.

Uno de los objetivos era desarrollar una metodología que permita utilizar los conceptos detallados en este documento para su aplicación en otros sistemas similares (diferentes configuraciones, equipos comerciales, demandas, localización...) obteniendo resultados que permitan tomar decisiones sobre la configuración más apropiada y el dimensionado de los equipos. Esto se ha ilustrado aplicando el método en los sistemas propuestos.

A través del análisis de los resultados se concluye que, con las tecnologías y precios de la energía actuales, es complicado que este tipo de sistemas de poligeneración reemplace a los sistemas actuales, salvo alguna aplicación específica en la que se obtengan otros beneficios, como subvenciones para la inversión de los equipos. Pero la situación mundial actual muestra un encarecimiento de las fuentes de energía, escasez de recursos e inseguridad de suministro, y el empeoramiento de las consecuencias del cambio climático. Como se ha comprobado, ciertos sistemas pueden empezar a ser económicamente viables con pequeñas variaciones en los precios de la energía. Además, también hay que tener en cuenta la probable reducción del coste de los equipos debido a su producción en escala.

Considerando la aplicación de estos sistemas en el centro comercial en Zaragoza se ha podido comprobar cómo en el sistema Sistema 1 es viable la instalación de los equipos de refrigeración solar con precios de la electricidad del año 2022. Si estos precios siguiesen aumentando en el futuro, cabría la posibilidad de que este tipo de sistemas fuesen productores rentables de energía eléctrica para la red, como se ha comprobado para el Sistema 3.

Al trabajar con energías renovables, y particularmente con energía solar, hay que tener en cuenta la variabilidad de la irradiación en el tiempo, tanto estacional como horaria. El almacenamiento de grandes cantidades de energía térmica tiene un coste muy elevado, por lo tanto, cuanto más coordinada esté la producción de energía y la demanda del centro consumidor, tendremos un sistema más eficiente. Como ejemplos, podemos destacar la refrigeración solar, que tiene un uso más intensivo en los meses cálidos; otro ejemplo sería una industria que utilice los colectores para algún proceso que requiera calor. También resulta interesante integrar diferentes demandas para hacer un uso más eficiente de los recursos, como podría ocurrir en una red de distrito. Aun teniendo esto en cuenta, cabe destacar que el uso de estas energías como única fuente de energía es complicado y extremadamente caro.

Gracias al análisis hora a hora, se ha podido observar cómo varían los flujos de energía en los sistemas a lo largo de algún día representativo, y nos dan información del modo de funcionamiento óptimo que podría tener un sistema real. Además, hemos podido comprobar si alguno de estos flujos de energía era desaprovechado, o alguno de los equipos estaba siendo infrautilizado.

Como conclusión podríamos destacar la importancia del análisis en estos y otros tipos de sistemas energéticos, que nos permitan hacer un uso más eficiente de los recursos para poder afrontar los retos que nos depara el futuro.

## 7. Bibliografía

- [1] A. Kasaeian, E. Bellos, A. Shamaeizadeh y C. Tzivanidis, «Solar-driven polygeneration systems: Recent progress and outlook,» *Applied Energy*, vol. 264 114764, 2020.
- [2] IDAE, «Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020,» Madrid, 2011.
- [3] L. Zhao, Y. Zhang, S. Deng, J. Ni, W. Xu, M. Ma, S. Lin y Z. Yu, «Solar driven ORC-based CCHP: Comparative performance analysis between sequential and parallel system configurations,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 131, pp. 696-706, 2018.
- [4] A. Rong y R. Lahdelma, «Role of polygeneration in sustainable energy system development challenges and opportunities from optimization viewpoints,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 363-372, 2016.
- [5] Solar Heat Europe ESTIF, «Energising Europe with Solar Heat: A Solar Thermal Roadmap for Europe,» 2021.
- [6] W. Weiss y M. Spörk-Dür, «Solar Heat Worldwide: Global Market Development and Trends in 2021,» AEE - Institute for Sustainable Technologies, Gleisdorf, Austria, 2022.
- [7] M. Á. Lozano, E. A. Pina, J. C. Ramos y L. M. Serra, «Thermal integration in polygeneration energy systems for buildings,» de *XI Congreso Nacional y II Internacional de Ingeniería Termodinámica*, 2018.
- [8] M. Á. Lozano, «Colectores solares térmicos,» Zaragoza, 2019.
- [9] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner y M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, United States of America: Wiley, 2014.
- [10] Meteotest AG, «Meteonorm Software,» [En línea]. Available: <https://meteonorm.com/en/>. [Último acceso: 5 2022].
- [11] E. Pina, L. Serra, M. Lozano, A. Hernández y A. Lázaro, «Comparative Analysis and Design of a Solar-Based Parabolic Trough-ORC Cogeneration Plant for a Commercial Center,» *Energies*, vol. 13 4807, 2020.
- [12] Daikin Europe NV, «System optimization for air cooled chiller applications,» Oostende, 2018.
- [13] NATURGY, «Tarifas de luz para negocios y autónomos,» [En línea]. Available: [https://www.naturgy.es/negocios\\_y\\_autonomos/contratar/electricidad\\_y\\_gas/plan\\_electricidad](https://www.naturgy.es/negocios_y_autonomos/contratar/electricidad_y_gas/plan_electricidad). [Último acceso: 28 06 2021].
- [14] GSE, «Gestión Servicios,» [En línea]. Available: <https://gestionservicios.com/tarifa-3-0td-la-nueva-tarifa-electrica-para-empresas/>. [Último acceso: 05 2022].
- [15] D. Mengod, «Diseño y evaluación técnico-económica de sistemas de poligeneración con concentradores solares térmicos y Ciclo Rankine Orgánico para edificios,» Trabajo Fin de Máster Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2021.

- [16] L. S. INC., «LINGO The Modeling Language and Optimizer,» LINDO SYSTEMS INC., Chicago, Illinois, 2020.
- [17] C. Kutscher, F. Burkholder y J. Stynes, «Generation of a Parabolic Trough Collector Efficiency Curve From Separate Measurements of Outdoor Optical Efficiency and Indoor Receiver Heat Loss,» *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 134, p. 6, February 2012.